

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Thème :**

Traitement et caractérisation des rejets de la mine de Boucaïd  
(W.Tissemsilt) et de la mine de Kherzet-Youcef (W.Sétif)

**Réalisé par :**

Medjitena Mehdi et Mekdour Mohamed Islem

Sous la direction de Mlle Merchichi Amira

Présenté(e) et soutenue publiquement le (21/06/2017)

**Composition du Jury :**

Président	M. Malek Ould Hamou	Docteur	ENP
Rapporteur	Mlle, Merchichi Amira	Enseignante	ENP
Examineur	M. Rezki Akkal	Docteur	ENP



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Thème :**

Traitement et caractérisation des rejets de la mine de Boucaïd  
(W.Tissemsilt) et de la mine de Kherzet-Youcef (W.Sétif)

**Réalisé par :**

Medjitena Mehdi et Mekdour Mohamed Islem

Sous la direction de Mlle Merchichi Amira

Présenté(e) et soutenue publiquement le (21/06/2017)

**Composition du Jury :**

Président	M. Malek Ould Hamou	Docteur	ENP
Rapporteur	Mlle, Merchichi Amira	Enseignante	ENP
Examineur	M. Rezki Akkal	Docteur	ENP

## Remerciements

*A Mamdemoiselle Merchíhí, pour nous avoir encadré, suivi, encouragé et beaucoup conseillé durant la rédaction de mon mémoire, je vous serai à jamais reconnaissant, mille mercis.*

*A l'ensemble des professeurs qui m'ont énormément aidé et soutenu durant tout mon parcours d'étudiant pour tout ce qu'ils ont pu me transmettre, je les remercie tous.*

*Je remercie M. Ould Hamou Malek d'avoir accepté de présider ce jury et aussi pour nous avoir aidés lors de nos travaux au sein de notre laboratoire*

*Mes plus sincères remerciements à Monsieur AKKAL d'avoir accepté d'être membre de jury et examiner mon mémoire.*

*Enfin, nous voulons exprimer notre reconnaissance envers nos famille familles respectives, nos proches, nos camarades de classe et tous nos amis qui nous ont apporté leur support moral, intellectuel tout au long de cette démarche et leurs soutiens inconditionnels.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Ma famille :*

*Ma mère ZAHRA NADJIA qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père ABDELKADER, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes frères TOUFIK et CHEMSEDDIN et mes sœurs FAZO et IKRAM qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*Mes grands-mères FATMA et KHEIRA, mon oncle AHMED et ma tante BAKHTA et ces petites familles.*

*Mes cousins et mes amis proches qui m'ont soutenu et encouragé.*

*A la mémoire de tous les proches qui nous ont quittés. Que dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.*

## *Dédicaces*

*Ce travail vient clôturer 19 ans du dur labeur au cours desquelles j'ai pu compter sur le soutien inébranlable de mes parents qui ont su m'encourager et contribuer à ma réussite.*

*Je dédie donc ce travail à ces deux êtres chers qui n'ont rien ménager pour voir ce jour bénit arriver.*

*Je tiens aussi à dédier ce travail à tous ceux qui ont contribué à son élaboration, sans qui, il n'aurait pu voir le jour.*

*Ce travail est aussi pour vous mes chères sœurs.*

*Une fière chandelle à mes camarades de classes, spécialement à ceux que j'ai côtoyé au sein de notre laboratoire durant ces 4 derniers mois.*

*Aussi, un grand merci à tous ceux qui se sont donnés de la peine de se déplacer lors de ce mois de ramadan dans l'unique but de partager cette joie avec moi.*

*Mehdi*

## ملخص:

النفايات المنجمية تعتبر نتائج حتمية لإستغلال المناجم، و تساهم بشكل رئيسي في التدهور البيئي و تلويث المساحات المحيطة بها.

الهدف من عملنا هو القيام بمعالجة هذه النفايات المنجمية المأخوذة من مجمع خرزة يوسف (وسطيف) و منجم بوقايد (و.الشلف) من أجل معرفة مدى قابلية المعادن النافعة الموجودة فيها، و هي: البارييت، الرصاص و الزنك للثمين باستعمال عملية التعويم و ذلك بتغيير مختلف الثوابت المتعلقة بها من أجل ضبطها.

هذا العمل سيمكننا من القول إن كانت طريقة التثمين قابلة للتحقيق بالإعتماد على الكتل النسبية للمعادن النافعة الموجودة في كل عينة و تأثيرها على البيئة. كلمات مفتاحية:

النفايات المنجمية- مجمع خرزة يوسف- منجم بوقايد -التثمين- التعويم- الكتل النسبية

## Abstract :

Mining wastes are an unavoidable result of mining exploitation; these ones contribute to the deterioration of the environment and to the pollution of the surrounding spaces.

The purpose of this work is to treat the mining wastes of Kherzet-Youcef complex (W.Sétif) and of Boucaïd's mine (W.Chlef) to establish if the ore's minerals ,namely: barite, lead and zinc are recoverable using the flotation process by varying maximum of its settings to define optimal ones for flotation.

This work will allow to determine if these recovery process is achievable using the results of useful mineral's weights in each sample and their impact over the environment Key words:

mining waste- Kherzet-Youcef complex- Boucaïd's mine- recovery- flotation- weight

## Résumé :

Les rejets miniers sont une conséquence inévitable de l'exploitation minière ; ceux-ci contribuent à la dégradation de l'environnement et à la contamination des espaces environnants.

Le but de notre travail est de traiter les rejets miniers du complexe de Kherzet-Youcef (W.Sétif) et de la mine de Boucaïd (W.Chlef) dans le but de déterminer si les minéraux utiles qu'ils contiennent, c'est-à-dire la baryte, le plomb et le zinc sont valorisables en utilisant la méthode de la flottation en faisant varier le maximum de ses paramètres afin d'établir les paramètres optimaux de la flottation.

Ce travail permettra de déterminer si cette valorisation est réalisable en se basant sur les rendements pondéraux des minéraux utiles dans chaque échantillon et l'impact qu'elle pourrait avoir sur l'environnement.

## Mots clés :

Rejets miniers- Complexe de Kherzet-Youcef- Mine de Boucaïd- Valorisation- Flottation- Rendement Pondéral

# Table des matières

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des Symboles

<b>1</b>	<b>Introduction Générale</b>	<b>18</b>
<b>I</b>	<b>Flottation et valorisation des rejets miniers :</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>Flottation : procédé de valorisation</b>	<b>21</b>
2.1	Historique . . . . .	21
2.2	Généralités sur la Flottation . . . . .	22
2.2.1	Définition de la Flottation . . . . .	22
2.2.2	Principe de la flottation . . . . .	22
2.3	Classification des minéraux . . . . .	23
2.4	Interfaces de la flottation . . . . .	25
2.4.1	Interface solide-liquide . . . . .	25
2.4.2	Interface liquide-gaz . . . . .	25
2.4.3	Système solide-liquide-gaz . . . . .	25
2.5	Réactifs de la Flottation . . . . .	25
2.5.1	Exigences aux réactifs de flottation . . . . .	26
2.5.2	Collecteurs : . . . . .	26
2.5.3	Déprimants . . . . .	28
2.5.4	Activants : . . . . .	29
2.5.5	Régulateurs de milieu . . . . .	30
2.5.6	Moussants . . . . .	30
2.6	Paramètres de flottation . . . . .	31
2.6.1	Influence des dimensions du minerai . . . . .	31
2.6.2	Importance du pH . . . . .	31

2.6.3	Importance de la densité de la pulpe . . . . .	32
2.6.4	Importance de la température . . . . .	32
2.6.5	Importance du potentiel rédox . . . . .	32
2.6.6	Influence d'un champ magnétique sur l'eau . . . . .	33
2.7	Types de Flottation . . . . .	33
2.7.1	Flottation directe . . . . .	33
2.7.2	Flottation indirecte . . . . .	34
2.7.3	Electro-Flottation . . . . .	34
2.8	Machines de Flottation . . . . .	34
2.8.1	Historique des machines de flottation . . . . .	35
2.8.2	Classification des machines de flottation . . . . .	35
2.8.3	Comparaison entre les machines de flottation . . . . .	37
<b>3</b>	<b>L'environnement et Les rejets miniers</b>	<b>39</b>
3.1	Introduction . . . . .	39
3.2	Enjeux liés aux rejets miniers . . . . .	40
3.3	Déchets miniers . . . . .	41
3.4	Types de rejets dans la nature . . . . .	41
3.4.1	Stériles francs de découverte . . . . .	42
3.4.2	Résidus d'exploitation . . . . .	42
3.4.3	Résidus de traitement(tailings) . . . . .	42
3.4.4	Autres types de résidus . . . . .	43
3.5	Baryte, Plomb et Zinc . . . . .	43
3.5.1	Barytine . . . . .	43
3.5.2	Zinc . . . . .	44
3.5.3	Plomb . . . . .	46
3.6	Les mines et l'environnement . . . . .	47
3.6.1	Défis environnementaux de l'industrie minière . . . . .	47
3.6.2	Drainage minier . . . . .	49
3.6.3	Drainage minier acide (DMA) . . . . .	49
3.6.4	Drainage neutre contaminé (DNC) . . . . .	54
<b>II</b>	<b>Présentation de la zone d'étude</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>Gisement de Boucaïd</b>	<b>57</b>
4.1	Situation géographique . . . . .	57
4.2	Historique des Travaux . . . . .	58
4.3	Aspect Climatologique . . . . .	58
4.4	Hydrologie et Hydrogéologie . . . . .	59
4.4.1	Eaux Superficielles . . . . .	59

4.4.2	Eaux souterraines . . . . .	59
4.5	Géologie . . . . .	60
4.5.1	Géologie Régionale . . . . .	60
4.5.2	Tectonique . . . . .	62
4.5.3	Géologie Locale ( Des Gisements) . . . . .	63
4.5.4	Travaux Géologiques . . . . .	65
4.5.5	Gisement De Sidi-Belabbes . . . . .	65
4.5.6	Gisement de Lakhdar [17] . . . . .	65
4.6	Minéralisation . . . . .	66
4.7	Réserves Géologiques . . . . .	67
4.8	Traitement du Minerai au Niveau de l'Usine [21] . . . . .	68
4.8.1	Station de Concassage : . . . . .	68
4.8.2	Enrichissement . . . . .	69
4.8.3	Station de Pulvérisation et de conditionnement . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Gisement de Kherzet Youcef</b>	<b>71</b>
5.1	Situation Géographique . . . . .	71
5.2	Historique des Travaux . . . . .	72
5.3	Topographie . . . . .	72
5.4	Aspect Climatologique . . . . .	73
5.4.1	Précipitations : . . . . .	73
5.4.2	Température : . . . . .	74
5.4.3	Vents et Evapotranspiration : . . . . .	74
5.5	Hydrologie et Hydrogéologie . . . . .	74
5.6	Géologie . . . . .	76
5.6.1	Géologie Régionale . . . . .	77
5.6.2	Géologie Locale . . . . .	77
5.7	Minéralisation . . . . .	79
5.8	Réserves Géologiques . . . . .	80
5.8.1	Réserves du gisement . . . . .	80
5.9	Traitement du Minerai au Niveau de l'Usine . . . . .	81
5.9.1	Les différentes installations de la laverie [6] . . . . .	82
5.9.2	Traitement : . . . . .	83
<b>III</b>	<b>Essais de Laboratoire</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>Méthodologie et Protocole Analytique</b>	<b>87</b>
6.1	Description des échantillons à analyser . . . . .	87
6.2	Echantillons de Boucaïd . . . . .	87
6.3	Echantillons de Kherzet Youcef . . . . .	88

6.4	Échantillonnage . . . . .	88
6.5	Préparation de l'échantillon . . . . .	88
6.5.1	Concassage et broyage . . . . .	89
6.5.2	Homogénéisation . . . . .	89
6.5.3	Quartage Manuel . . . . .	89
6.5.4	Diviseur rotatif . . . . .	90
6.6	Caractérisation Physique . . . . .	90
6.6.1	Méthode de Perte au Feu (PAF) . . . . .	91
6.6.2	Détermination de la teneur en eau pondérale $w$ (norme NF P 94-050) .	92
6.6.3	Détermination du poids volumique apparent . . . . .	93
6.6.4	Détermination du poids volumique des particules solides . . . . .	94
6.7	Analyse Granulométrique . . . . .	94
6.7.1	Principe de l'essai . . . . .	95
6.7.2	Mode Opératoire . . . . .	95
<b>7</b>	<b>Analyses de Flottation</b> . . . . .	<b>97</b>
7.1	Paramètre n° 1 : Le collecteur . . . . .	98
7.1.1	Echantillon N° 1 de Boucaïd . . . . .	98
7.1.2	Echantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	100
7.1.3	Echantillon de Kherzet Youcef . . . . .	102
7.2	Décantation et Filtration . . . . .	102
7.3	Flottation en fonction des classes granulométriques . . . . .	103
7.3.1	Classes granulométriques choisies . . . . .	104
7.3.2	Utilité des essais sur les classes granulométriques . . . . .	104
7.4	Paramètre n° 2 : Rapport Solide-Liquide . . . . .	105
7.4.1	Echantillon n° 1 de Boucaïd . . . . .	106
7.4.2	Echantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	107
7.4.3	Echantillon de Kherzet-Youcef . . . . .	107
<b>IV</b>	<b>Résultats et Interprétations</b> . . . . .	<b>109</b>
7.5	Analyse Granulométrique . . . . .	110
7.5.1	Résultats de l'Echantillon n° 1 . . . . .	110
7.5.2	Résultats de l'Echantillon n° 2 . . . . .	111
7.5.3	Résultats de l'Echantillon n° 3 (Kherzet-Youcef) . . . . .	112
7.5.4	Calculs des différents coefficients . . . . .	112
7.5.5	Interprétation . . . . .	113
7.5.6	Echantillon n° 3 . . . . .	114

<b>8</b>	<b>Flottation</b>	<b>115</b>
8.1	Variation de la teneur du collecteur . . . . .	115
8.1.1	Echantillon n° 1 de Boucaïd : . . . . .	116
8.1.2	Echantillon n° 2 de Boucaïd : . . . . .	117
8.1.3	Echantillon de Kherzet-Youcef : . . . . .	118
8.1.4	Conclusion . . . . .	119
8.2	Flottation des classes granulaires . . . . .	120
8.2.1	Echantillon n° 1 . . . . .	120
8.2.2	Echantillon n° 2 . . . . .	121
8.2.3	Echantillon de Kherzet-Youcef . . . . .	123
8.3	Variation du Rapport Solide-Liquide . . . . .	124
8.3.1	Interprétation . . . . .	124
<b>9</b>	<b>Analyse Granulochimique</b>	<b>129</b>
9.1	Echantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	129
9.2	Echantillon de Kherzet-Youcef . . . . .	130
<b>10</b>	<b>Conclusion Générale</b>	<b>131</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>134</b>
	<b>Annexes</b>	<b>136</b>
<b>A</b>	<b>Préparation des Solutions</b>	<b>136</b>
A.1	Régulateurs du Milieu . . . . .	136
A.2	Les autres réactifs . . . . .	136

# Liste des tableaux

4.1	Tableau recensant les réserves des deux principaux gisements plombo-barytiques de Boucaïd au 31/12/2017 . . . . .	68
5.1	Précipitation de la région de Ain-Azal 1990-2010 . . . . .	74
5.2	Tableau montrant les réserves estimées par M.Dolenc selon la méthode des profils parallèles [20] . . . . .	80
5.3	Tableau montrant les réserves estimées par M.Strucl selon la méthode des projections horizontales [20] . . . . .	81
6.1	Coordonnées géographiques des points de prélèvements . . . . .	88
6.2	Tableau regroupant les résultats des essais de la perte au feu . . . . .	91
6.3	Tableau regroupant les résultats des essais de détermination de la teneur en eau dans l'échantillon 1 de Boucaïd . . . . .	92
6.4	Tableau regroupant les résultats des essais de détermination de la teneur en eau dans l'échantillon 2 de Boucaïd . . . . .	92
6.5	Tableau rassemblant les résultats obtenus pour la masse volumique apparente des échantillons de Boucaïd . . . . .	93
6.6	Tableau montrant les résultats obtenus pour le poids volumiques des particules solides . . . . .	94
7.1	Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 1 . . . . .	99
7.2	Tableau regroupant les réactifs de flottation du zinc pour l'échantillon n° 1 . . . . .	100
7.3	Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 2 . . . . .	101
7.4	Tableau regroupant les réactifs de flottation de la baryte pour l'échantillon n° 2 . . . . .	101
7.5	Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 1 pour un rapport liquide-solide = 50% . . . . .	106
7.6	Tableau regroupant les réactifs de flottation du zinc pour l'échantillon n° 1 pour un rapport solide-liquide = 50% . . . . .	106
7.7	Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd avec un rapport liquide-solide= 50% . . . . .	107
7.8	Tableau regroupant les réactifs de flottation de la baryte pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd pour un rapport liquide-solide= 50% . . . . .	107

7.9	Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon de Kherzet-Youcef pour un rapport liquide-solide = 50%	108
7.10	Tableau regroupant les réactifs de flottation du zinc pour l'échantillon de Kherzet-Youcef pour un rapport solide-liquide = 50%	108
7.11	Tableau correspondant aux valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 1	110
7.12	Tableau correspondant aux valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 2	111
7.13	Tableau correspondant aux valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 2	112
7.14	Résultat de la courbe granulométrique	113
7.15	Tableau regroupant les valeurs de $C_c$ et $C_u$	113
8.1	Résultats de flottation de l'échantillon n° 1 de Boucaïd	115
8.2	Résultats de Flottation de l'échantillon n° 2 de Boucaïd	115
8.3	Résultats de Flottation de l'échantillon de Kherzet-Youcef	116
8.4	Tableau renfermant les résultats de flottation des classes granulométriques de l'échantillon n° 1 de Boucaïd	120
8.5	Tableau renfermant les résultats de flottation des classes granulométriques de l'échantillon n° 2 de Boucaïd	121
8.6	Tableau renfermant les résultats de flottation des classes granulométriques de l'échantillon de Kherzet-Youcef	123
8.7	Tableau regroupant les résultats obtenus lors de la flottation des 3 échantillons en changeant le rapport solide-liquide	124

# Table des figures

2.1	Classification des minéraux polaires(Wills' Mineral Processing Technology) . . . . .	24
2.2	Classification des collecteurs[?] . . . . .	27
2.3	L'adsorption d'un collecteur sur la surface d'un minerai . . . . .	28
2.4	schéma montrant l'action des moussants sur la surface d'une particule . . . . .	30
2.5	Schéma descriptif d'une colonne de flottation . . . . .	36
2.6	Schéma descriptif de la cellule de flottation de Denver . . . . .	37
3.1	les différents types de rejets miniers (BRGM) . . . . .	42
3.2	Exemples de différents sites affectés par le DMA . . . . .	50
3.3	Critère de classification des tailings sur base du rapport NP/AP [6] . . . . .	51
3.4	Les éléments nécessaire pour un DMA [14] . . . . .	52
3.5	Schéma de la gestion des résidus issus de la désulfuration . . . . .	53
3.6	Structure d'une couvertrue à barrière capillaire . . . . .	54
4.1	Situation géographique du Massif de l'Ouarsenis dans l'Atlas Tellien . . . . .	61
4.2	Une esquisse géologique du Massif de l'Ouarsenis, D'après Mattaur . . . . .	63
4.3	LOCALISATION DES GISEMENTS DE BARYTE . . . . .	67
4.4	Schéma Technologique de traitement du minerai de baryte de Boucaïd . . . . .	70
5.1	Situation Géographique de la mine de Kherzet Youcef . . . . .	71
5.2	Carte topographique N°143 de Ain-Azel au 1/50 000. . . . .	73
5.3	coupe hydrogéologique de la région de Kherzet-Youcef[5] . . . . .	76
5.4	Situation de la zone d'étude dans le dispositif structural de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale.[6] . . . . .	77
5.5	Schéma structural simplifié de la région d'Ain Azel (extrait de la carte géologique N°143 au 1/50 000 d'Ain Azel) (Villa, 1977) 43 . . . . .	78
5.6	Image satellitaire montrant les installations du complexe minier de Kherzet-Youcef . . . . .	82
5.7	Schéma technologique de traitement du minerai zincifere du complexe de Kherzet Youcef [6] . . . . .	84
6.1	Echantillon n° 1 de Boucaïd . . . . .	87
6.2	Homogénéisation de l'échantillon de Boucaïd et sa préparation au quartage . . . . .	89

6.3	Quartage de l'échantillon de Boucaïd . . . . .	90
6.4	Diviseur rotatif . . . . .	90
6.5	creuset contenant le minerai avant (à gauche)\après (à droite) calcination à 375 °C	92
6.6	Images illustrant les résultats des essais de détermination de la teneur en eau de l'échantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	93
6.7	Tamiseuse Retch du laboratoire du génie minier . . . . .	96
7.1	Cellule de flottation DENVER utilisée lors de nos essais . . . . .	97
7.2	Schéma de Flottation de l'échantillon n° 1 de Boucaïd et Kherzet-Youcef . . . . .	98
7.3	Schéma relatif à la flottation de l'échantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	102
7.4	Décantation et machine de filtration . . . . .	103
7.5	Image illustrant un stéréomicroscope . . . . .	105
7.6	Courbe de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 1 . . . . .	110
7.7	Courbe de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 2 . . . . .	111
7.8	Courbe granulométrique de l'échantillon n° 3 . . . . .	112
8.1	Graphe décrivant la variation du rendement pondéral du Pb et du Zn de l'échantillon n° 1 de Boucaïd en fonction de la concentration de son collecteur ( le xanthate) . . . . .	116
8.2	Graphe représentant la variation des rendements pondéraux des minéraux extraits de l'échantillon n° 2 de Boucaïd en fonction de la concentration du collecteur . . . . .	117
8.3	Concentré de Baryte . . . . .	118
8.4	Graphe représentant la variation du rendement pondéral des minéraux extraits de l'échantillon de Kherzet-Youcef en fonction de la concentration du collecteur	118
8.5	Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de Zinc sur les classes de l'échantillon n° 1 de Boucaïd . . . . .	120
8.6	Images issus du microscope montrant la distribution des particules de Plomb sur les classes de l'échantillon n° 1 de Boucaïd . . . . .	121
8.7	Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de baryte sur les classes de l'échantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	122
8.8	Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des différentes particules de l'échantillon n° 2 de Boucaïd . . . . .	122
8.9	Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de Plomb sur les classes de l'échantillon de Kherzet-Youcef . . . . .	123
8.10	Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de Zinc sur les classes de l'échantillon de Kherzet Youcef . . . . .	124
8.11	Schéma technologique résumant le processus de flottation établi pour l'échantillon n° 1 de Boucaïd (flow-sheet) . . . . .	126
8.12	Schéma technologique résumant le processus de flottation établi pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd (flow-sheet) . . . . .	127

8.13	Schéma technologique résumant le processus de flottation établi pour l'échantillon de Kherzet-Youcef (flow-sheet) . . . . .	128
A.1	Réactifs de flottation du Zinc (à gauche) et du Plomb (à droite) . . . . .	137

# Liste des symboles

°C	Degré Celsius
$BaSO_4$	Sulfate de Baryum
$CuSO_4$	Sulfate de Cuivre
$V_{col}$	Volume du collecteur
AFNOR	Association Française de Normalisation
Ag	Argent
ANRH	Agence National des Ressources Hydrauliques
AP	potentiel de production d'acide
Au	l'or
Ba	Symbole chimique de la barytine
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Cu	Cuivre
DMA	Drainage Minier Acide
DNC	Drainage Neutre Contaminé
DRA	Drainage Rocheux Acide
DRX	Diffraction des Rayons-X
ENOF	Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles
ETM	Elements à trace métallique
g	gramme
i.e	c'est à dire
L	Litre
mm	millimètre
MO	Matière organique
NNP	potentiel net de neutralisation

---

NP	potentiel de neutralisation d'acide
ONM	Office National Météorologique
ORGM	Office National de Recherche Géologique et Minière
PAF	Perte Au Feu
Pb	Symbole chimique du plomb
PbS	Sulfate de plomb connu aussi sous le nom de la galène
pH	Potentiel Hydrogène
Pt	Platine
R.P	Rendement Pondéral
RN	Route Nationale
SAA	spectrométrie d'Absorption Atomique
SONAREM	Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières
t	tonne
T.A	Temps d'Agitation
UTM	Universal Transverse Mercator
Zn	Symbole chimique du zinc
ZnS	Sulfate de zinc connu aussi sous le nom de la sphalérite ou blende
µm	micro-mètre

# Chapitre 1

## Introduction Générale

L'Algérie est un pays très riche en ressources minérales, tout en sachant que le territoire algérien n'a pas été totalement exploré et prospecté, que ce soit des minéraux non métallifères tels que le calcaire, les dolomies, la baryte, le sable...etc ou bien des minéraux métallifères tels que l'or, l'argent, le fer, les phosphates, le plomb, le zinc...etc ainsi que les terres rares tels que le thorium, l'uranium, sans oublier les hydrocarbures. Ceux-ci sont distribués en gisements à ciel ouvert et en gisements souterrains. L'exploitation de ces gisements générera à coup sûr des profits économiques.

Le problème qui se pose dans ce contexte, c'est que lors de l'exploitation minière, le pourcentage de la gangue enlevé du minerai est élevé, ceci est dû tout d'abord au fait que celle-ci comporte des substances minéralisées n'ayant pas d'intérêt économique et aussi aux procédés techniques et technologiques utilisés pour l'extraction du minerai utile qui ne permettent guère son entière extraction. On retrouve d'énormes quantités de rejets mis en terrils lors de l'exploitation qui peuvent s'élever à des millions de tonnes, ceux-ci sont une source majeure qui conduit à la dégradation de l'environnement.

Parmi ces problèmes environnementaux auxquels nous faisons face, l'oxydation des minéraux se trouvant dans la gangue, en contact avec l'eau ou bien l'air, qui polluent les eaux des nappes souterraines, les eaux d'exhaure, la mobilité des ETM...etc.

Afin de minimiser les impacts générés par les rejets miniers sur l'environnement, plusieurs études ont été faites afin de contrôler les contaminations provenant des résidus [26] ainsi que des études géochimiques dans le but de maîtriser les mécanismes des ETM sous différentes conditions.

Ce que nous voulons atteindre à partir de ce travail c'est de voir si la valorisation des rejets mines de Boucaïd, de nature plombo-zincifère et aussi plombo-barytique ainsi que de Kherzet-Youcef qui sont des rejets plombo-zincifères en utilisant le procédé de la flottation, vu

---

l'énorme quantité résidant dans leurs digues respectives, est d'une quelconque utilité que ce soit d'un point de vue environnemental ou bien économique.

L'objectif de ce travail est de :

- Déterminer les classes granulométriques contenant le plus grand pourcentage de minerai utile.
- la valorisation des trois échantillons provenant des rejets cités ci-dessus par flottation.
- Déterminer les paramètres de flottation optimaux afin de valoriser ces rejets.
- Comparer les rendements pondéraux obtenus lors de la variation de chaque paramètre et voir si cette valorisation est utile des deux points de vue cités ci-dessus

## **Première partie**

# **Flottation et valorisation des rejets miniers :**

# Chapitre 2

## Flottation : procédé de valorisation

### 2.1 Historique

L'activité minière est l'une des plus anciennes activités industrielles que les êtres humains ont pratiqué, et ceci depuis l'antiquité. Au fil du temps, celle-ci a connu plusieurs développements et évolutions en y introduisant de nombreux procédés aidant à la valorisation et l'extraction des substances utiles tout en améliorant la qualité du produit.

Vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle, la méthode de séparation gravimétrique était la plus répandue, elle était largement utilisée dans l'industrie minière pour la valorisation de minerais utiles. Le problème posé pour ce processus, c'est que celui-ci est destiné beaucoup plus à l'enrichissement de concentrés ayant des particules dont les dimensions sont grossières, ce qui rendait la valorisation des minerais à minéralisations fines et dispersées extrêmement difficile et coûteuse en terme d'énergie et d'argent.

C'est ainsi, qu'en 1906, le principe de la flottation fut mis au point dans le but de valoriser les minerais ayant de faibles teneurs en minerais utiles et les gisements à minéralisation complexe, étant considérés comme économiquement non-rentables. À titre d'exemple, l'existence de types de rejets issus des procédés gravimétriques dont la teneur en minerai utile est supérieure à des gisements exploités actuellement par flottation.

La flottation est un processus sélectif, pouvant être utilisé pour la séparation de certains métaux renfermés dans des minerais complexes tels que le plomb-zinc, le cuivre-zinc...etc. Elle fut utilisée initialement dans le but de traiter les minéraux sulfurés qui sont les sulfures de cuivre, de plomb et de zinc. Au fil du temps, ce procédé a été développé pour inclure aussi, les platines, le nickel, l'or se trouvant dans des minéralisations sulfurées, ainsi que pour les oxydes tels que : l'hématite, la cassitérite et aussi pour les minéraux oxydés tels que la malachite et la cerussite, sans oublier les minerais non-métalliques tels que la fluorine et les phosphate[22].

Ces développements que la flottation a connu, sont liés à trois grandes périodes, vu la mise sur le marché d'une grande quantité de réactifs appelés collecteurs, ceux-ci confèrent l'hydrophobicité nécessaire aux surfaces minérales. Par exemple : pour la flottation des sulfures, on utilisait les acides gras naturels, ensuite on synthétisa des collecteurs de type dithiocarbonates et dithiophosphates, ayant une grande affinité pour les sulfures conduisant à de faibles consommations. Enfin, arrivèrent sur le marché, dans un troisième temps, d'autres collecteurs de synthèse tels que les amines, les alkyl sulfonates et les alkylsulfates, permettant de flotter des oxydes et des sels ).

Le procédé de flottation est aussi utilisé dans d'autres industries que les industries minières, tel que le traitement des eaux usées afin de séparer les huiles insolubles et les particules en suspension, ainsi que dans l'industrie du papier pour son désancrage et ainsi le préparer pour le recyclage [6].

## 2.2 Généralités sur la Flottation

### 2.2.1 Définition de la Flottation

La flottation est un procédé permettant le traitement d'énormes masses rocheuses, en séparant les particules solides entre-elles, celle-ci est réalisé par la mise en profit des différences existant entre les propriétés superficielles de ces particules (hydrophobie, hydrophilie) dans une solution aqueuse en présence de l'air. Ce procédé peut aussi être appliqué à la séparation solide-liquide ( flottation de précipité) et à l'extraction d'ions en solution ( flottation ionique ).

### 2.2.2 Principe de la flottation

La flottation est une méthode de séparation physico-chimique des particules solides entre-elles, tel que cités ci-dessus. Le principe de la flottation des minerais est le suivant : les particules solides sont mises en suspension par agitation dans l'eau et ceci après que l'échantillon utilisé aurait subi une préparation mécanique au préalable dans le but de séparer un maximum de gangue de l'espèce minérale valorisable.

la pulpe, qui est un mélange solide-eau, est conditionné par des collecteurs qui permettent à la surface du minéral d'acquérir une propriété essentielle lui permettant de flotter, c'est l'hydrophobicité, cette propriété lui confère une plus grande affinité dans sa phase gazeuse, plus que dans la phase liquide. Donc afin de rendre l'activité du collecteur sélective, on fait appelle à d'autres éléments pour mieux modifier certaines surfaces minérales, ce sont les déprimants et les activants. Donc ce procédé de flottation est différentiel, il permet par exemples la séparation des sulfures, des oxydes....etc.

Ainsi après avoir conditionné la pulpe, on l'introduit dans des réacteurs munis d'agitateurs aérés (cellules de flottation) ou d'injecteurs d'air (colonne de flottation) ou bien d'électrodes (électro-flottation) afin de générer des bulles d'air et de les disperser sur la surface du réacteurs. Les particules 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. Ceci conduit à la génération d'une mousse chargée en particules solides flottant à la surface de la pulpe, appelée écume. La taille ainsi que la durée de vie de la mousse dépend étroitement de la qualité et de la quantité du moussant ajouté. Ainsi le liquide est drainé par gravité à l'intérieur de la mousse qu'on recueille par débordement.

Mais tout ceci ne peut donner les modes adéquats permettant de régler la vitesse de flottation, cette dernière est plutôt déterminée par :

- L'indice de flottabilité, plus celui-ci est grand et plus grande est la probabilité de fixation des minéraux sur les bulles d'air ;
- Le nombre et les dimensions des bulles d'air ; plus leurs nombre augmente et plus la probabilité de contact des minéraux entre eux s'élève, sans oublier que la diminution de la dimension des bulles d'air jusqu'à une limite bien définie augmente leurs nombre.
- l'état de la mousse, plus celle-ci est solide et plus les bulles d'air ne s'éclatent pas sur la surface de la pulpe ; dans le cas contraire celle-ci s'éclate et les minéraux tombent au fond de la cellule de flottation.

La variation de l'indice de flottation, du nombre et dimensions des bulles d'air et de la solidité de la mousse sont assurés par l'utilisation des réactifs de flottation.[24]

Donc l'objectif ultime de la flottation dans l'industrie minière est de séparer des minéraux en suspensions dans un liquide en se basant sur les propriétés des surfaces des particules, pour que ce processus aboutisse, il est impératif de réunir ces trois conditions essentielles [6] :

- Réussir à générer des bulles d'air stables dans le but de former une mousse
- Faire adhérer les minéraux qu'on veut flotter aux bulles d'air pour les extraire et en même temps, faire en sorte que les particules qu'on considère comme étant une gangue ne doivent impérativement pas flotter en leur faisant subir un mouillage par l'eau.
- Récupération d'une mousse chargée en minéraux valorisable en faisant en sorte de les accrocher aux bulles d'air.

## 2.3 Classification des minéraux

Tous les minéraux sont classés selon une propriété essentielle qui leurs est propre : la polarité ; ils sont soit polaires ou bien non-polaires, d'après les caractéristiques de leurs surfaces.

Les surfaces des minéraux non polaires sont caractérisés par des liaisons relativement faibles. Leurs molécules sont liées par des liaisons de type Van Der Wals, et leurs surfaces non-polaires ne se lient pas instantanément aux dipôles de l'eau ; ce qui leur confère leurs propriété d'hydrophobicité. Les minéraux de ce type tels que la molybdène, le talc, le diamant, le charbon...etc ont ainsi un niveau très élevé en matière de flottabilité. Il est aussi possible de faire flotter ces minéraux sans avoir recours aux réactifs chimiques. On peut accroître leurs hydrophobicité par l'ajout des hydrocarbures ou bien des agents moussants.

Les minéraux dont les liaisons sont de type covalentes ou bien ioniques sont des minéraux polaires, qui exhibent un très haut niveau d'énergie libérée sur leurs surfaces polaires. Les surfaces polaires réagissent fortement avec les molécules d'eau, et ces minéraux sont naturellement hydrophiles.

Les éléments polaires se subdivisent en plusieurs classes qui dépendent de leurs ordre de grandeur. Celui-ci augmente du groupe 1 jusqu'au 5. Les minéraux se trouvant dans le groupe 3(a) peuvent devenir hydrophobes par sulfuration de la surface du minéral dans un milieu alcalin. Mis à part les métaux à l'état natif, tous les minéraux se trouvant dans le groupe 1 sont des sulfures qui sont faiblement polarisés à cause de leurs liaisons covalentes qui sont relativement faibles comparés aux liaisons ioniques des carbonates ou bien des minéraux sulfatés. En général, le degré de polarité augmente des minéraux sulfurés via les sulfates, aux carbonates, halites, phosphates...etc, ensuite vers les oxydes-hydroxydes et enfin les silicates et le quartz.[22]

<i>Group 1</i>	<i>Group 2</i>	<i>Group 3(a)</i>	<i>Group 4</i>	<i>Group 5</i>
Galena	Barite	Cerrusite	Hematite	Zircon
Covellite	Anhydrite	Malachite	Magnetite	Willemite
Bornite	Gypsum	Azurite	Gothite	Hemimorphite
Chalcocite	Anglesite	Wulfenite	Chromite	Beryl
Chalcopyrite			Ilmenite	Feldspar
Stibnite		<i>Group 3(b)</i>	Corundum	Sillimanite
Argentite		Fluorite	Pyrolusite	Garnet
Bismuthinite		Calcite	Limonite	Quartz
Millerite		Witherite	Borax	
Cobaltite		Magnesite	Wolframite	
Arsenopyrite		Dolomite	Columbite	
Pyrite		Apatite	Tantalite	
Sphalerite		Scheelite	Rutile	
Orpiment		Smithsonite	Cassiterite	
Pentlandite		Rhodochrosite		
Realgar		Siderite		
Native Au, Pt, Ag, Cu		Monazite		

FIGURE 2.1 – Classification des minéraux polaires(Wills' Mineral Processing Technology)

En flottation, lorsqu'une particule de minéral utile en suspension dans une solution aqueuse, est naturellement hydrophobe ou est rendue hydrophobe par l'adsorption d'un collecteur, elle peut adhérer à une bulle d'air provenant de l'injection d'air dans la pulpe ; dans le système obtenu, il y a trois phases en présence, et au contact entre ces différentes phases, on trouve les interfaces suivantes [12] :

## 2.4 Interfaces de la flottation

### 2.4.1 Interface solide-liquide

L'interface solide-liquide est celle qui a le plus d'importance lors du processus de flottation qui est le lieu d'existence des phénomènes électriques ( échange d'ions ) ainsi que celui d'adsorption qui est le phénomène le plus important réalisé par l'ajout des réactifs chimiques de flottation

### 2.4.2 Interface liquide-gaz

C'est l'interface observable lors du processus de flottation, elle met en évidence la relation se trouvant entre la solution aqueuse et les bulles d'air utilisées dans le but d'entraîner les particules hydrophobes au concentré. Cet interface est influencée par l'ajout des moussants ( dont on parlera après) qui abaissent la tension de l'interface liquide-gaz et donc l'énergie potentielle de la bulle d'air dans l'eau afin que cette dernière reste plus à l'aise dans la phase liquide.

### 2.4.3 Système solide-liquide-gaz

Les interfaces telles qu'elles ont été décrites n'existent pas en soi, mais plutôt en relation étroite l'une avec l'autre. Les propriétés du système délimitées par les trois phases de l'eau, la particule minérale et la bulle d'air, soit l'angle de contact et l'adhésion, sont très importants en flottation ; en fait, le comportement de ce système permet de déterminer la flottabilité d'une espèce minérale [24]

## 2.5 Réactifs de la Flottation

Les réactifs de flottation sont des substances chimiques qu'on ajoute à la pulpe dans le but de réaliser une flottation sélective des minéraux et ainsi améliorer son efficacité. Ceux-ci se divisent en deux classes et qui sont :

- Les réactifs de flottation agissant sur la surface des minéraux qu'on divise en groupes selon leurs fonctions et qui sont : Les collecteurs, Les déprimants (deprimeurs), les activateurs, et les régulateurs de milieu.

- Les réactifs de flottation agissant sur la surface de séparation gaz-liquide. Ce sont les moussants qui font disperser l'air aspiré dans la cellule de flottation et contribuent à la formation d'une mousse stable et solide.[24]

### 2.5.1 Exigences aux réactifs de flottation

Les réactifs de flottation doivent être : Non couteux, non déficitaire, stables lors du stockage, solubles dans l'eau, non toxiques, leurs action doit être sélective et leurs qualité doit être standardisé.[24]

### 2.5.2 Collecteurs :

L'hydrophobicité doit être imputé à la plus grande partie des minéraux afin de les faire flotter. Dans le but de réaliser ceci, des réactifs connus sous le nom de collecteurs sont ajoutés à la pulpe et du temps devrait lui être accordé lors de l'agitation. Ce temps là est appelé *le temps de conditionnement*.

Les collecteurs sont des substances organiques qui se fixent sur la surface de certains minéraux et augmentent leur flottabilité. Ils permettent la réduction de la mouabilité des minéraux par la formation sur leur surface d'une pellicule hydrophobe contribuant à l'adhésion des minéraux aux bulles d'air. Les collecteurs peuvent être des composants ionisants, aptes à se dissocier dans l'eau comme ils peuvent être des composants non-ionisants, qui sont pratiquement insolubles et tendent à le rendre imperméable en couvrant sa surface avec une couche fine.

Le champ d'application des collecteurs ionogènes est très large dans la flottation. Ceux-ci ont une composition moléculaire complexe qui a une structure asymétrique et sont hétéropolaire, i.e que la molécule contient un groupe hydrocarbure non polaire et un autre polaire. L'hydrocarbure non polarisé offre des propriétés imperméables tandis que le groupe polaire réagit avec l'eau [22].

Les collecteurs ionogènes sont classés selon le type de l'ion, l'anion ou le cation qui produit l'effet d'imperméabilité dans l'eau, cette classification est donnée dans la figure 2.2

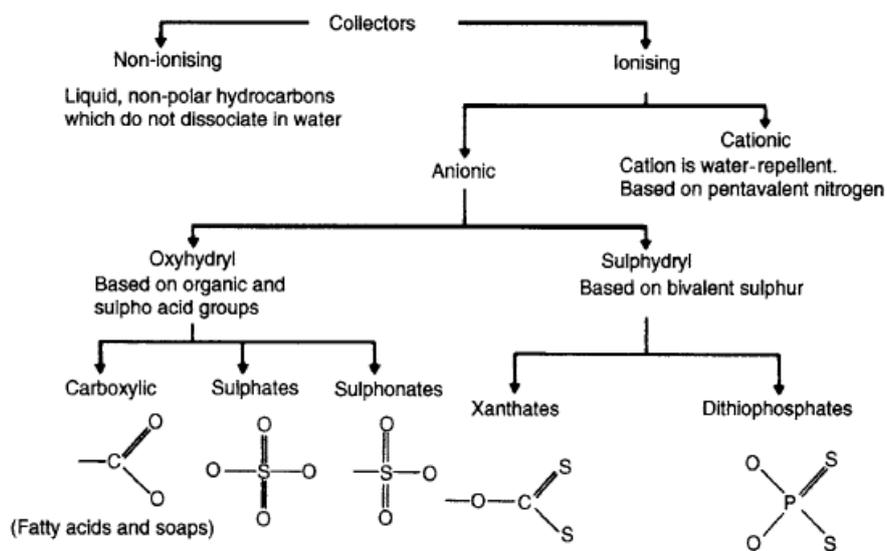


FIGURE 2.2 – Classification des collecteurs[?]

les collecteurs ionogènes se subdivisent donc en deux groupes selon la figure, qui sont des collecteurs anioniques ou bien cationiques mais il existe aussi un autre type de collecteurs ionogènes, ce sont les collecteurs amphoréiques.

À cause de l'attraction chimique, physique ou bien électrique existant entre les parties polaires et la surface du minerai, les collecteurs les adsorbent sur leurs surfaces avec leurs terminaisons non-polaires orientées vers la solution en masse, en offrant ainsi une hydrophobicité aux particules. Ils sont généralement utilisés en petites quantités, surtout ceux utilisés pour former une couche mono-moléculaire sur les surfaces des particules, car mis à part leurs coûts, ceux-ci tendent à flotter d'autres minéraux en réduisant la sélectivité. Il est toujours difficile d'éliminer un collecteur déjà adsorbé de l'éviter son adsorption.

Une concentration excessive du collecteur peut aussi avoir un effet inverse sur la récupération du minerai utile en réduisant la proportion des radicaux d'hydrocarbures orientés sur la solution en masse. Ainsi l'hydrophobicité des particules est ainsi réduite et par conséquent leur flottabilité aussi.[22]

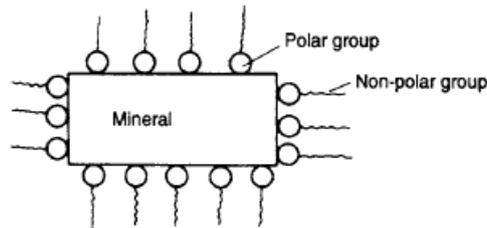


FIGURE 2.3 – L'adsorption d'un collecteur sur la surface d'un minerai

### Les collecteurs amphotériques

Les collecteurs amphotériques tels que les acides aminiques possèdent une fonction anionique ainsi qu'une fonction cationique, ils dépendent du pH du milieu. Ils sont utilisés pour le traitement des dépôts de phosphates sédimentaires et d'améliorer la flottation sélective de la cassitérite.

### Les collecteurs anioniques

Ce type de collecteur est le plus largement utilisé dans la flottation des minéraux, ils regroupent les carboxyles ( Les acides carboxyliques et leurs sels ...etc ) qui sont utilisés pour la flottation des minéraux non sulfurés [24] et aussi les Tiocarboxyl tels que les Aéroflotes ainsi que les Xanthates ( utilisés dans notre projet de fin d'étude ) qui sont utilisés pour la flottation des minéraux sulfurés [24].

### Les collecteurs cationiques

La propriété caractérisant ce groupe de collecteurs est l'imperméabilité produite par leurs cations et qui sont les amines ainsi que leurs sels. Les anions de ce type de collecteurs sont généralement les halites et plus rarement les hydroxydes, qui n'ont aucun effet sur la réaction avec le minerai utilisé.

Les collecteurs cationiques sont très sensibles au pH du milieu, étant plus actifs dans des solutions peu acides et inactifs dans des solutions très alcalines et acides. Ils sont utilisés pour la flottation des oxydes, carbonates, silicates, et les métaux terreux alcalins tels que la baryte et la sylvite.

### 2.5.3 Déprimants

les déprimants ou bien depresseurs sont des substances ayant grand rôle dans la flottation qui consiste à augmenter la sélectivité d'action des collecteurs par rapport aux minéraux à valoriser, 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'effet 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.

#### 2.5.4 Activants :

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 activants 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 fin 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. Afin 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 due 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 afin 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 activants de la galène, la calcite ainsi que la pyrite. Quand la sphalérite est associée avec la pyrite (minerai métallique sulfuré) la sélectivité est assuré par une alcalinité élevé (pH variant de 10.5 à 12) de la pulpe. [22]

### 2.5.5 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'effet de son imperméabilité sur la surface du minéral. Ainsi ils rendent l'action du collecteur plus sélective envers certains minéraux afin d'éliminer les ions indésirables. Les régulateurs du milieu peuvent être aussi classés comme étant des activateurs, déprimeurs ou bien des modificateurs du pH.

### 2.5.6 Moussants

Les moussants sont ajoutés pour stabiliser la formation des bulles dans la pulpe, afin 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 entrain 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 afin 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.[22]

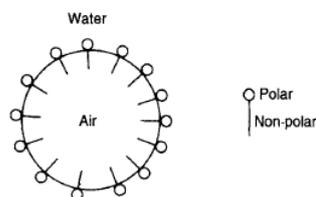


FIGURE 2.4 – schéma montrant l'action des moussants sur la surface d'une particule

D'après leur action de flottation, les moussants sont subdivisés en deux groupes :

**Moussants agissants sélectivement** Ce sont des moussants qui ne possèdent pas l'activité du collecteur, utilisés lors de la flottation sélective, i.e lors de la séparation des minéraux avec

la flottabilité proche. On peut citer comme exemples : le Crésol qui est toxique et les alcools cycliques.[24]

**Moussants agissants non-sélectivement** Ce sont des moussants qui possèdent l'activité du collecteur, sont utilisés lors du cycle de flottation collective, on peut citer comme exemple les alcools aromatiques [24] tel que l'huile de pin qui est le moussant le plus actif et le plus utilisé.[22]

## 2.6 Paramètres de flottation

Dans le but d'optimiser le rendement du processus de flottation ( avoir un maximum de concentré sans avoir à dépenser beaucoup plus qu'il n'en faut de réactifs de flottation ainsi que d'énergie), il faudrait prendre plusieurs paramètres en compte qu'ils aient une relation avec les propriétés physico-chimiques du minerai ou bien en relation avec le milieu de flottation, on cite les plus importants ci dessous :

### 2.6.1 Influence des dimensions du minerai

La préparation mécanique du minerai, avant son enrichissement, est d'une importance capitale car son but principal est la libération du minerai utile en atteignant la maille optimale permettant sa récupération avec un minimum de gangue. Par conséquent, le mode ainsi que le degré de broyage ont une grande importance et influence sur le rendement de l'opération car un sous-broyage ne conduit pas à la libération optimale du minerai utile tandis qu'un sur-broyage créerait probablement un phénomène de *slimecoating* qui conduit au recouvrement des particules minérales par les ultrafines; connus aussi sous le nom de schlamms, et donc la fixation du collecteur sera gênée et ainsi le rendement de l'opération sera diminué considérablement.

### 2.6.2 Importance du pH

Il est évident que l'alcalinité de la pulpe joue un rôle très important, même très complexe, et en pratique, la sélectivité dans les séparations complexes dépendent délicatement de l'équilibre se trouvant entre le réactif utilisé, sa concentration et le pH. Quand c'est possible, la flottation est réalisée dans un milieu alcalin, vu que les collecteurs sont stables dans ces conditions et aussi elle minimise la corrosion des cellules de flottation ou bien les colonnes..etc. On modifie l'alcalinité d'une solution en ajoutant des régulateurs de milieu qui sont souvent utilisés en quantités significatives dans presque tous les processus de flottation. De plus, ils sont moins chers que les collecteurs et les moussants.[22]

### 2.6.3 Importance de la densité de la pulpe

La densité de la pulpe est déterminée par la dilution ou bien par la teneur de celle-ci en solide. Elle est caractérisée par le rapport solide-liquide dans la cellule. La dilution de la pulpe exerce son influence sur les indices technologiques de la flottation (degré extraction du minéral utile dans le produit de mousse, et la teneur de minéral utile dans le concentré) et aussi sur les indices technico-économique (Consommation des réactifs de flottation, le débit des machines de flottation etc ...). En augmentant le rapport solide-liquide lors de la flottation, ceci conduit impérativement à la diminution de la consommation des réactifs de flottation.

Il est indésirable d'avoir des pulpes très denses. Ainsi que des pulpes très diluées. La dilution optimale de la pulpe dépend de la grosseur du minerai à flotter, de la densité, de la destination des opérations de flottation et de la qualité de produit de mousse ; La densité optimale de la pulpe augmente avec l'augmentation de la grosseur et de la densité du minéral à flotter. Lors de la flottation des minéraux deschlammés on utilise une flottation avec une pulpe diluée. Afin de diminuer les pertes du minéral utile dans le rejet, on utilise les pulpes plus denses (flottation principale et de contrôle).

### 2.6.4 Importance de la température

Généralement la température utilisée lors du procédé de flottation est celle du lieu de travail, pour certaines opérations, il est préférable de chauffer la pulpe à environ 45 jusqu'à 55 °C surtout si cette pulpe contient des hydrocarbures lourds [23].

En général, l'influence de la température sur la flottation est difficile à déterminer, car celle-ci agit aussi bien sur la pulpe que sur les réactifs de flottation ajoutés et ainsi elle peut influencer sur le collecteur et plus précisément sur sa stabilité et/ou sur les interactions ion-collecteur. Dans les deux cas, son effet peut être aussi bien bénéfique que néfaste et donc imprévisible.

### 2.6.5 Importance du potentiel rédox

Des travaux conduits en Australie ainsi qu'aux USA ont montré que certains minéraux sulfurés peuvent être flotter en l'absence de collecteurs, sous des conditions bien spécifiques. Toutes ces études laissent entendre que, si ce n'est à cause de l'oxygène lui-même, il faudrait bel et bien avoir recours à un potentiel redox pour pouvoir réaliser une flottation sans collecteurs. Il fut bien établi que la flottation sans collecteurs est bien plus efficace sous l'influence de conditions d'oxydation seulement, tandis que la surface minérale du minerai utilisé ne doit être sujette à aucune réaction d'oxydation [?].

Toutefois, le rôle du potentiel redox est jusqu'à aujourd'hui mal compris et que son application sur des pulpes ayant une minéralisation complexe (un mélange de sulfures) soit encore

très limitée.

### 2.6.6 Influence d'un champ magnétique sur l'eau

Cette technique est récente, celle-ci, dans de nombreux cas, a influé considérablement sur l'augmentation de l'efficacité du traitement. Son mode d'action n'est pas encore bien éclairci. Ce traitement consiste à faire passer l'eau à travers un champ magnétique. L'eau acquiert certaines propriétés anormales et qu'il va conserver pendant plusieurs heures voir même des jours. V.I.Klassen cite trois cas différents de traitement magnétique du liquide et qui sont :

**Traitement de la pulpe avant flottation :** Des essais faits sur des minerais de phosphate, de cuivre et de manganèse ont montré une augmentation considérable des teneurs des concentrés ainsi que leurs rendements. Ce procédé est aussi utilisé sur un minerai plombo-zincifère dans la laverie de Soumarsk.

**Traitement des solution de réactifs** L'effet du champ magnétique sur l'action des xanthates est très bénéfique ainsi que sur les acides gras et sur les moussants.

**Traitement des suspensions de solides fins :** Il permet d'améliorer l'action de clarification de certaines suspensions ( celle du kaolin par exemple) et les résultats sont meilleurs que ceux obtenus à l'aide de coagulants.

Ceci nous permet de dire que, dans n'importe quel cas, le traitement magnétique des solutions influe sur la cinétique du phénomène [27]

## 2.7 Types de Flottation

Il existe plusieurs types de flottation utilisés dans l'industrie et qui sont connus sous les noms de la flottation directe et la flottation indirecte

### 2.7.1 Flottation directe

La flottation directe est utilisée dans le but d'extraire la substance utile (celle qu'on veut valoriser) comme étant le produit moussant, remontant en surface et prêt à déborder tout en faisant en sorte de laisser la gangue plonger au fond de la cellule ( respectivement au niveau inférieur de la colonne). Ce type de flottation est le plus souvent utilisé si la quantité du minerai à valoriser est petite ou bien pour purifier un concentré déjà obtenu des impuretés qui sont restés collés à celui-ci, et ceci afin de minimiser l'utilisation des réactifs de flottation ainsi que le temps de flottation et d'avoir un rendement optimal d'extraction du concentré.

### 2.7.2 Flottation indirecte

Ce procédé consiste à faire flotter la gangue, et de laisser le minerai utile comme étant un produit de cellule. Ce procédé là est beaucoup plus utilisé lorsque la flottation sélective de certains types de minéraux s'avère difficile car les conditions de réalisation sont ardues et très difficiles à conserver.[7]

Toutefois, il existe aussi un autre type de flottation qui est rarement utilisé, c'est l'Electro-Flottation.

### 2.7.3 Electro-Flottation

La flottation dans les industries de traitement et de valorisation des minerais est rarement appliquée à des particules dont les dimensions sont inférieures à  $10\mu\text{m}$  à cause des difficultés rencontrées pour le contrôle des dimensions des bulles d'air. Pour des particules ultra-fines, des bulles extrêmement fines doivent être générées pour améliorer leurs attachement. Ce type de bulles est apte à être généré par des procédés d'électrolyse in-situ dans des cellules de flottation modifiées ; c'est l'Electro-flottation. l'Electro-Flottation fut utilisée pendant une certaine période pour le traitement des rejets afin de faire flotté des solides à partir des suspensions. On fait passer un courant continu à travers la pulpe dans la cellule à l'aide de deux électrodes, générant ainsi un flot de bulles d'hydrogènes et d'oxygènes.

Ce type de flottation est beaucoup plus utilisé pour le traitement des eaux usées à cause de son excellente sélectivité ainsi que dans les industries alimentaires. Celle-ci pourrait avoir un rôle dans le futur pour le traitement des minerais utiles renfermés dans des particules très fines.[22]

## 2.8 Machines de Flottation

Les principaux objectifs qu'une machine de flottation doit accomplir sont l'aération de la pulpe et d'assurer la dispersion homogène des particules solides dans la pulpe. Ces deux critères là sont les critères les plus importants sur lesquelles se base toute analyse de performance d'une machine de flottation.[11]

Ces critères sont nécessaires mais pas suffisants pour le choix de la méthode de flottation, car il ne faudrait surtout pas oublier de prendre en compte des paramètres cités auparavant, et qui influent sur le rendement du processus de flottation malgré leurs indépendance de la machine de flottation, mais dont on doit impérativement prendre en compte dans le but d'optimiser le rendement de ce processus.

### 2.8.1 Historique des machines de flottation

Lorsque le procédé de flottation fut mis en marche, les bulles de gaz ont eu comme origine au départ l'action des acides, et on utilisait aussi la flottation pelliculaire dans le procédé de BAVAY et MAC QUISTEN ainsi que la flottation sous vide [11]. C'est bien après que le procédé de flottation par écumes ( mousses ) fut mis en place.

À partir de 1927, l'utilisation des machines de flottation dans les installations de préparation des minerais augmenta considérablement ainsi que les technologies utilisées pour améliorer leur travail.

### 2.8.2 Classification des machines de flottation

Plusieurs machines ont été mises en place pour réaliser les procédés de flottation et plusieurs autres furent développées ou bien placardées au fil du temps. On constate que les machines de flottation sont partagés en deux différents groupes : les machines pneumatiques et les machines mécaniques

#### **Machines pneumatiques :**

Les machines pneumatiques utilisent ou bien l'air généré par l'ajout de la pulpe en turbulence ou bien plus communément l'ajout de l'air ; qu'il soit soufflé ou bien induit, dans ce cas, l'air doit être dispersé sur tout le volume de la cellule\colonne.

Généralement le rendement des machines pneumatique n'est pas tout à fait satisfaisant car celles-ci donnent une basse teneur en concentré et génèrent des troubles lors du processus.

Les machines de flottation pneumatiques les plus connus sont : La cellule de Jameson, La cellule de Davcra ainsi que la colonne de flottation .

**La colonne de flottation :** La colonne de flottation fut réalisé dans les années 60 par Pierre Boutin et Rémi Tremblayau, au Canada. Elle est formée par un simple tube ayant une hauteur plus grande que la surface de section transversale, ainsi que des cellules traditionnelles ne contenant aucune partie mobile en son enceinte.

Deux types de zones sont distinguées dans la colonne de flottation : une zone de collection et une zone d'écume, séparées par une interface qui détermine la longueur de chacune de ces zones. La pulpe est ainsi introduite dans la colonne et en son bas on injecte de l'air à l'aide d'un générateur de bulles, qui cheminent en contre courant à la pulpe. Dans la partie supérieure, on asperge de l'eau dans le but d'assurer le lavage des mousses recueillies.[6]

Dans une colonne de flottation la taille des bulles peut être modifiée sans avoir à changer la concentration des collecteurs (contrairement aux cellules), en modifiant la pression du diffuseur d'air. Cette particularité nous permet ainsi d'assurer une compatibilité optimale entre les dimensions des bulles d'air et celles des particules solides.

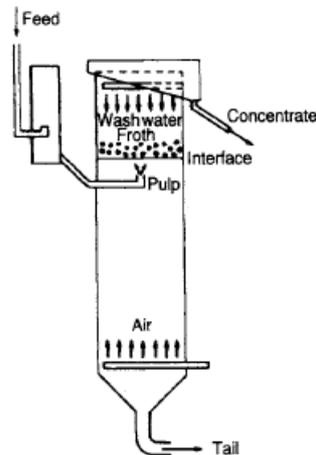


FIGURE 2.5 – Schéma descriptif d'une colonne de flottation

### Machines mécaniques

Ce type de machines\cellules est composé d'une section très turbulente produite par une turbine qui génère l'agitation nécessaire afin de maintenir la suspension des particules, disperser les bulles d'air et aussi maintenir le contact entre les particules minéralisées et les bulles. En plus, la cellule doit contenir une zone inactive où les bulles chargées de minerai utile peuvent aller à la surface de la cellule sans perte de particules due à la turbulence disruptive.

Différents types de cellules ont été fabriqués et développés afin de satisfaire ces besoins. La récolte de la mousse à partir de la cellule peut être réalisée soit par son débordement ou bien par un raclage. Parmi les exemples les plus courants pour ce type de machines de flottation on trouve : les cellules de Denver.[22]

**Cellule de flottation de Denver** La cellule de flottation de Denver est constituée d'un bac cubique. On y'introduit l'air par l'espace prévu autour de l'axe de la turbine, l'aspiration est due à la cavitation de la turbine tandis que ses aubes produisent à l'aide des déflecteurs un mélange de bulles d'air et de pulpe. Des aérateurs mécaniques sont utilisés dans le but d'ajouter de l'air afin d'augmenter le nombres de bulles et ainsi multiplier les interfaces liquide-air

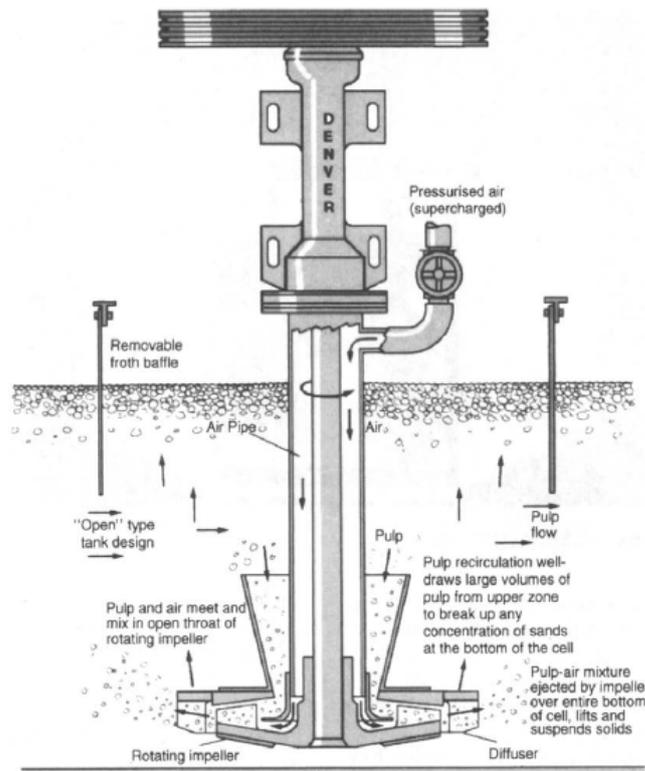


FIGURE 2.6 – Schéma descriptif de la cellule de flottation de Denver

### 2.8.3 Comparaison entre les machines de flottation

Sélectionner un type particulier de machine de flottation fut un sujet à de nombreux et grands débats et controverses, les critères majeures pour déterminer la performance d'une cellule par rapport à une autre sont :

- La performance métallurgique , i.e : la quantité du produit récupéré ainsi que sa pureté.
- La rentabilité économique du minerai traité en prenant tous les coûts nécessaires à la production de ce minerai.
- La capacité de production i.e, le nombre de tonnes de produit fini par unité de volume.

En plus des facteurs cités ci-dessus, il existe d'autres facteurs moins tangibles, tels que la facilité des opérations et les expériences antérieures peuvent aussi contribuer à faire le choix. Donc, faire une comparaison directe entre les cellules n'est pas aussi simple qu'il y paraît.

En général, il n'existe que de petites différences entre les différents équipements mécaniques de la flottation et la sélection de l'un par rapport à un autre. Cela dépend beaucoup plus d'un

choix personnel de l'opérateur. L'un des problèmes fondamentaux qui entravent cette comparaison, c'est qu'une cellule de flottation est nécessaire pour accomplir bien plus qu'une opération de flottation sélective ; elle est nécessaire afin de recueillir un maximum de particules de minerai utile dans un concentré avec un minimum de pulpe, ceci dépend du ratio de raclage de la mousse, qui peut aussi être affecté par plusieurs autres paramètres, tels que la quantité ainsi que le type de réactifs ajoutés, la vitesse de rotation de la turbine , de l'aération ainsi que de la position de l'interface pulpe-mousse.[22]

Des recherches ont montré que la taille de la bulle contenant les particules solide dans ce type de machines est comprise entre 0.1 et 1mm, ces dimensions sont contrôlées par les mousants et les collecteurs et donc la machine n'influe que sur le schéma d'écoulement dans la cellule, de maintenir les particules solides en suspension ainsi que de disperser les bulles d'air grâce à la vitesse de rotation de la turbine. Pour les colonnes de flottation, la taille de la bulle est de 0.01mm à 0.1mm dont la formation est assurée par un diffuseur de porosité variable et par conséquent, on peut changer leurs tailles en activant le nombre de pores voulu en faisant varier la pression de l'air comme cité précédemment.[23]

Pour conclure, des analyses établis par Young en 1982 montrent que les colonnes de flottation sont plus performantes que les machines mécaniques alors que ce dernier type constitue le parti dominant dans les industries occidentales ainsi que la familiarité des ingénieurs juste avec ce type de machines, et ceci est due à des raisons purement commerciales qu'à des raisons de conception. Cependant, dans un futur proche, il est plus que probable que les machines mécaniques de flottation feront face à l'ascension d'un autre type de machine qui aurait un rendement plus efficace tout en étant moins couteux en matière d'argent et d'énergie. [22]

# Chapitre 3

## L'environnement et Les rejets miniers

### 3.1 Introduction

Les rejets miniers sont le résultat de dépôts générés par une extraction minière métallifère ou bien non-métallifère. Dans le cas d'une exploitation minière métallifère, les rejets miniers générés sont énormes car la teneur des métaux dans le minerai est relativement faible par rapport à la gangue. À vrai dire, les rejets miniers représentent la proportion la plus élevée de rejets/déchets par rapport aux autres activités industrielles, des milliards de tonnes sont produits annuellement à travers le monde. Ces rejets sont soit déposés en surface, en terril, ou bien stockés dans des digues, ce qui contribue à la défiguration du paysage ainsi qu'à favoriser un drainage minier acide (DMA).

Ce type de rejet peut être inerte ou bien peut contenir des matériaux à faible toxicité. Les caractéristiques chimiques des rejets miniers et des eaux environnantes dépendent étroitement du type de minerai exploité ainsi que des agents chimiques ayant été utilisés dans le but d'extraire le métal ou bien pour son enrichissement.

Du fait de leurs volume élevé, les rejets miniers sont disposés aux plus bas prix, et souvent sans égard aux conditions de sécurité et sans considération aux impacts environnementaux, ce qui a conduit à plusieurs reprises à des catastrophes dues à des glissements des terrils causant même des pertes de vie de certains travailleurs.

Sans oublier l'impact nocif des différents effluents et les eaux due aux activités minières. Celles-ci peuvent augmenter à cause des processus d'extraction, de préparation, et d'enrichissement des minerais utiles et aussi de leurs mise en terril. La composition minéralogique affecte aussi les types d'effluents produits. Les problèmes de drainage sont aussi des résultats des opérations minières passées.

Avec les développements que les techniques et technologies d'exploitation ont connu, plus

particulièrement dans le cas des minerais métallifères, et aussi pour des conditions économiques favorables, certains rejets miniers sont re-exploités par moments. On peut citer comme exemple, les vieilles mines d'or autour de Joahnaesburg en Afrique du sud. L'exploitation de la galène en Grande Bretagne produit aussi des volumes notables de rejets contenant de bonnes teneurs en calcite et en baryte. Certaines aires de stockages de rejets ont été retravaillées dans le but d'extraire de la baryte utilisée comme boue de forage pour l'exploitation des hydrocarbures.

Et c'est ce que nous voulons faire pour les minerais plombo-zincifères et plombo-barytique dont la quantité et le volume des rejets sont très élevés, dans le but de réduire les différents impacts environnementaux pouvant être générés en premier lieu, et pourquoi pas si leur valorisation peut être économiquement rentable dans le futur

### 3.2 Enjeux liés aux rejets miniers

En Algérie, et selon la loi minière de 2014, une énorme importance fut donnée pour la gestion des rejets miniers dans le cadre de la réhabilitation des lieux d'exploitation ( carrières\mines) dans un cadre de respect de l'environnement afin d'assurer un développement durable. Pour ce faire, des aménagements spéciaux devraient être mis en évidence dans le but d'assurer un bon entreposage de ces déchets afin de faciliter, de gérer et de contrôler leurs impacts sur l'environnement car si leur gestion n'est pas faite correctement, leurs impacts seront catastrophiques sur l'environnement. Leur nocivité dépend en grande partie de leur composition chimique et minéralogique ainsi que de leur stabilité chimique.

La présence de minerais sulfureux ( résidu de la sphalérite par exemple) dans ces rejets engendre une baisse significative du pH dûe notamment à l'oxydation des sulfures, causant par ce biais le phénomène connu sous le nom du *Drainage minier acide (DMA)*; et de moindre ampleur le *drainage neutre contaminé (DNC)* pouvant entraîner dans l'environnement des métaux lourds ayant des concentrations supérieures à celles des seuils de sécurité. Plus spécifique aux exploitations de l'or et de l'argent, le cyanure utilisé lors de la cyanuration doit impérativement être retiré des rejets pour éviter toute contamination ( le cas de la mine de Amesmassa-Tamenrasset où on remarque que de nombreux oiseaux migrateurs périssent à cause du problème de cyanuration). Les techniques utilisées pour traiter ces deux derniers sont cependant bien développées. Enfin, les ouvrages nécessaires à l'entreposage des rejets miniers causent sans le moindre doute des modifications dans l'usage de ces territoires.

Donc il est impératif de ne pas ignorer cette grave problématique afin d'éviter la destruction irréversible de ces habitats naturels

### 3.3 Déchets miniers

Chaque année, des millions de tonnes de résidus de concentrés et de stériles miniers sont produits et qui sont entreposés dans des aires prévues pour cet effet ( comme cité précédemment ). Cette production est cependant inévitable : c'est une conséquence de la production minière et une partie intégrante du processus d'extraction et de traitement du minerai.

Il est à noter que les rejets\déchets miniers sont des matériaux naturels ou bien artificiels générés par les travaux miniers et sont déposés en surface en formant des ouvrages de stockage. Ils font parti des enjeux majeurs nécessaires aux phases de fermeture et post-fermeture d'une mine.

l'impact de déchet minier sur l'environnement est souvent en fonction de :

- Sa quantité totale ;
- Ses caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques ;
- La méthode de stockage et sa localisation dans un contexte environnemental donné [6] .

Il dépend aussi plus particulièrement des caractéristiques de la mine dont il provient et qui sont :

- La substance minérale exploitée ;
- Le type de la minéralisation ( minerai utile+ gangue) ;
- Sa taille ;
- La méthode d'exploitation utilisée ;
- Les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la roche encaissante ;
- La méthode de traitement utilisée ( réactifs chimiques utilisés ) ;
- Le contexte environnemental de sa localisation géographique.

### 3.4 Types de rejets dans la nature

Les principaux types de rejets miniers peuvent être classés selon quatres différents groupes (B.R.G.M 1997) et qui sont :

- Les stériles francs de découverte et\ou de traçage de galeri ;.
- Les résidus d'exploitations qu'ils soient des résidus de gangue ou bien de la couche minéralisé (les pertes) ;

- Les résidus de traitement ( issus de l'usine de traitement après avoir extrait le concentré);
- Les autres résidus ( les scories...etc).

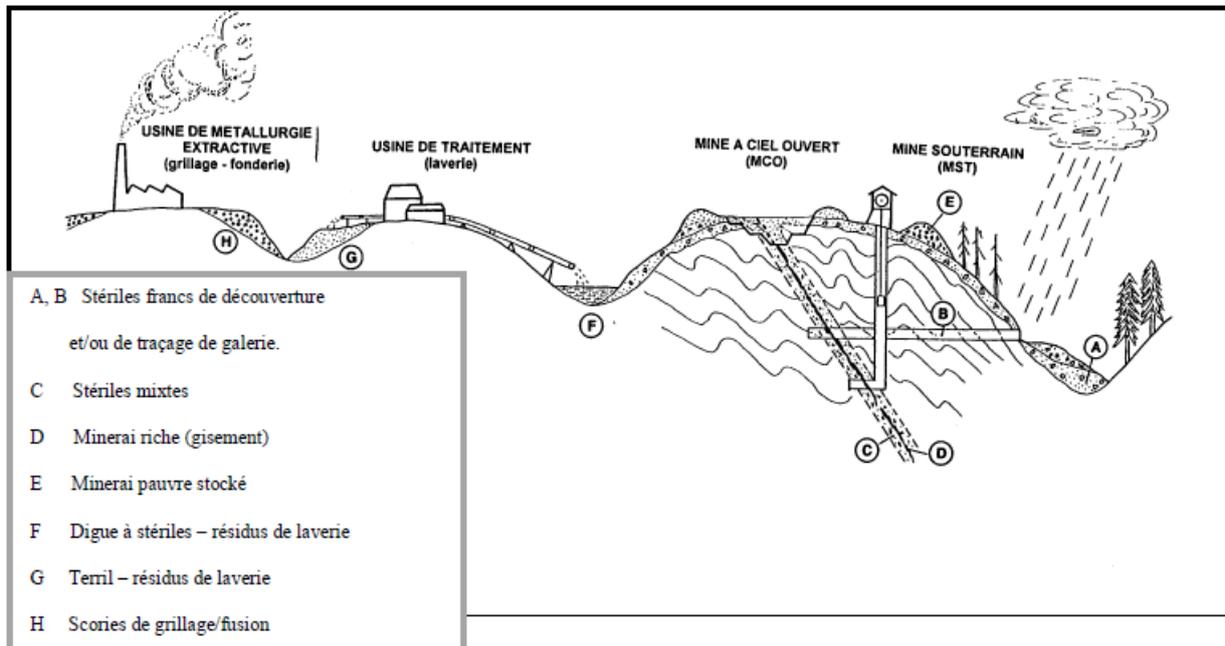


FIGURE 3.1 – les différents types de rejets miniers (BRGM)

### 3.4.1 Stériles francs de découverte

Ce sont les morts terrains qui recouvraient le minerai avant le début des travaux miniers, décapés. Ces résidus, généralement, contiennent de faibles teneurs en minerais utiles. D'une certaine façon, ses caractéristiques physiques et chimiques ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction d'un ouvrage d'art (autoroute, tunnel, barrage, etc) dans le même contexte régional

### 3.4.2 Résidus d'exploitation

Appelés aussi stériles de sélectivité, ce sont les minerais dont la teneur en minéraux utiles est faible par rapport à ceux étant extrait lors de l'étape de l'exploitation, et donc non-rentables. Ceux-ci sont sujets à un stockage sur place dans l'attente d'une éventuelle augmentation du coût de ce minerai/métal afin de le traiter.

### 3.4.3 Résidus de traitement(tailings)

Lors de la valorisation du minerai utile, celui-ci est sujet à de nombreuses opérations d'enrichissement ; ces dernières produisent deux types de solides : un concentré riche en substances

valorisables, et un ou plusieurs autres solides pauvres formant la gangue.

Cette gangue, issu de la laverie, comportant 40 à 70% de liquide et 30 à 60% de matière solide est retenue dans des digues ou déposée en terril. Elle contient des teneurs significatives en éléments accompagnateurs, en minéraux secondaires ainsi que leurs produits d'oxydation et même des concentrations résiduelles en réactifs utilisés pour la séparation et la concentration en métaux valorisables.

Les résidus de lixiviation sont formés, parfois sur une surface de plusieurs hectares, par des tas de minerais broyés ou concassés dont on a extrait les métaux par lixiviation ("heapleaching", par cyanuration pour les métaux précieux, « dam leaching » ou par utilisation d'acide pour le cuivre et l'uranium).[6]

#### 3.4.4 Autres types de résidus

Dans certains anciens sites d'exploitation polymétallique (fer, cuivre, étain, plomb/zinc, or...), le minerai concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand de qualité. Dans ce cas, les rejets sont soit des suies ou des scories.(Merchichi 2014)

### 3.5 Baryte, Plomb et Zinc

Notre croûte terrestre est constituée de minéraux, dire qu'un minéral est utile, relève purement de ses caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques. Un gisement minier est donc une concentration anormale d'une substance sur la croûte terrestre pouvant être exploitée ainsi qu'assurer une rentabilité économique pour l'exploiteur.

Toutefois, certains facteurs anthropiques peuvent générer une augmentation considérable des concentrations en certains minéraux dans les eaux et les sédiments des régions affectées, telle que l'activité minière. alors dans ce cas, ces éléments peuvent être considérés comme des éléments majeurs dans le milieu étudié.[6]

Dans ce qui suit nous allons présenter certains minéraux existants dans nos deux régions d'étude :

#### 3.5.1 Barytine

La Barytine est la forme général du Sulfate de baryum ( $BaSO_4$ ), son nom est dérivé du mot grec "barns" qui veut dire lourd. C'est un minéral industriel d'une valeur relativement faible.

Le nom de *Baryte* est réservé à l'oxyde de Baryum  $BaO$ , et du point de vue minéralogique, la barytine correspond à la composition :  $BaO$  à 65.7 % et le  $SO_3$  en 34.3%.[13]

### Aspect

La barytine se présente sous forme de facettes ayant une forme tabulaire très aplaties, mais le plus souvent des concrétions globulaires ou fibreuses ou en masses lamellaires plus ou moins translucides. Elle est d'une couleur blanche, et parfois grisâtre ou bien jaunâtre. Les minerais de barytine colorés qu'on peut rencontrer parfois sont des minerais qui ont subis des inclusions de matières étrangères tels que les oxydes, les sulfures ou bien de la matière organique.

### Propriétés

La barytine est caractérisée par sa densité élevée qui est d'environ de 4.48 à 26°C, mais d'une faible dureté oscillant entre 2.5 et 3.5 sur l'échelle de Mohs. Son point de fusion est relativement élevé, il atteint 1580°C.

La barytine est relativement fragile car ses cristaux présentent trois clivages parfaits. Elle est peu soluble dans l'eau pure, tout en pouvant se dissoudre facilement dans les chlorures. Lorsqu'elle est réduite, celle-ci nous permet d'obtenir le sulfure de baryum qui est la base de nombreuses dérivées barytiques. [13]

### Applications de la Barytine

En 1992 la production mondiale annuelle de la barytine s'élevait à environ 5.2 millions de tonnes [13], ses utilisations industrielles dépendent largement de sa dureté, sa stabilité chimique, sa blancheur et son abondance relative dans la nature. Les secteurs industriels dépendant de son utilisation sont :

- L'industrie pétrolière qui correspond à plus de 78% de la consommation mondiale du fait de sa densité qui est adéquate, pouvant équilibrer le poids important des sondeuses ainsi que les remontées de gaz sous-pression et les débris de roches produite
- L'industrie chimique qui absorbe environ 16% de la consommation mondiale afin de fabriquer les produits en terre cuite, les briques (carbonate de baryum), le traitement des eaux, du cuir et des tissus ainsi comme durcisseur d'acier ( chlorure de baryum)...etc
- Comme étant une charge minérale car elle est inerte, blanche, non-abrasive, résistante aux intempéries et absorbe les radiations [13]

### 3.5.2 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 :

- la Sphalérite ( $Zn, Fe$ )S : 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 oxydés. En Grande Bretagne ce terme est utilisé pour la Smithsonite.
- La Smithsonite ( $ZnCO_3$ ) c'est un minerai de zinc associé avec la sphalérite, elle est d'une couleur jaune, grise, marron ou bien verdâtre.
- La Willemite ( $Zn_2SiO_4$ ) c'est un minerai de zinc mineur dont la couleur varie du blanc au marron et exhibe une fluorescence de jaune brillant sous les rayonnement ultra-violet

Les minerais zincifères se trouvent généralement côte-à-côte avec d'autres minéralisations métalliques tel que celles du plomb, cuivre et d'argent ainsi que d'autres métaux nobles. En plus de ça le Cadmium est toujours associé aux minéralisation 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<sup>e</sup> 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 pyrometallurgie ou bien des techniques d'électrolyse. [16]

### Aspect et propriétés

Le zinc est un métal bleûatre-blanc, soluble dans les acides et les solution alcalines. Pouvant être oxydé par l'air humide et ainsi apte à la corrosion. Sa densité est de 7.14 qui est relativement élevée tandis que sa dureté est relativement faible d'environ 2.5 sur l'échelle de Mohs. Son point de fusion est de 419.5 °C qui est relativement faible par rapport aux autres métaux. [16]

### Utilisations et applications du zinc

Environ trois quarts de la production du zinc est utilisée 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 antirouille ;
- 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 fins agricoles. C'est aussi un élément essentiel pour la croissance des êtres humains, les animaux ainsi que pour la végétation.

### 3.5.3 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 :

- 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

#### Caractéristiques et propriétés

Le plomb est l'un des métaux les plus anciens. Celui-ci est toxique et par conséquent son utilisation doit être évitée tant que possible pour des raisons environnementales. Malgré ceci, c'est le 5<sup>e</sup> métal le plus utilisé dans le monde.

Sa densité est de 11.35 qui est très élevée et son point de fusion est atteint à la température 327.5°C. C'est aussi un bon élément réfractant de la lumière

#### 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 due 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 hopitaux 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

## 3.6 Les mines et l'environnement

L'industrie minière en Algérie est très importante avec un nombre de mines élevé et plus particulièrement métallifères plombo zincifère, tels que Chaâbet El Hamra et Kherzet Youcef et non métallifères comme les mines Barytiques de Boucaïd et Ain Mimoune.

Les activités d'exploitations minières et de traitement génèrent une quantité énorme de rejets qui ont un impact négatif sur l'environnement.

Il est à noter que dans n'importe quel projet d'entreposage de rejets miniers, la géotechnique, l'hydrogéologie et la géochimie jouent un rôle très important dans le but de se préoccuper de la stabilité et de l'intégrité des ouvrages, tout en ayant à l'esprit la sécurité publique et le respect de l'écosystème. Ce problème constitue un défi majeur auquel les industries minières doivent faire face.

### 3.6.1 Défis environnementaux de l'industrie minière

Comme cité précédemment, l'industrie minière génère une quantité énorme de rejets qui sont entreposés dans des aires spécifiques pour cet objectif. Chaque type de rejets doit être traité de manière spécifique, en fonction de ses propriétés, des caractéristiques de l'opération minière, et des particularités du site.

Dans le cas de rejets ne possédant pas de réactivité chimique, les impacts environnementaux seront beaucoup plus liés au transport [6] tel que :

- la poussière générée lors du tir ou bien du transport des matériaux ( stériles ou concentré) ;
- Dégradation du paysage environnant ;

- Augmentation de la quantité de sédiments suite à leurs érosion.

Pour les rejets contenant des réactifs chimiques, en plus de ceux cités précédemment, on ajoute ceux-ci :

- Contamination chimique des eaux de surface et/ou souterraines, comme le drainage minier acide ou le drainage neutre contaminé ;
- Infiltration des matières solides dans les sols et les alluvions.

En faisant nos recherches bibliographiques, les répercussions de l'activité minière les plus remarquées et qu'il est impératif de gérer sont :

### **Rejets solides**

Ils comportent généralement les stériles de découverte et les résidus d'exploitation, ils regroupent des empilements de matériaux rocheux, ayant une granulométrie grossière dans la plus grande partie des cas avec un indice de vide élevé. Leur mode de disposition fait en sorte qu'une ségrégation de matériaux grossiers et de matériaux fins existent, ce qui complique le comportement mécanique, hydraulique et géochimique de l'ouvrage.

Les principaux problèmes pouvant résulter de ces empilements de stériles sont :

- La stabilité physique des terrils affectée par la géométrisation et la topographie des lieux, pouvant causer une rupture qui engendre d'énormes catastrophes dont l'impact se répercutera sur la population, les équipements, les infrastructures et les écosystèmes environnants.
- La stabilité chimiques des terrils, lorsque les stériles contiennent par exemple des minéraux sulfurés générateurs de drainage minier acide. La grande porosité effective des empilements entraîne, dans la plupart des cas, des taux de réaction très élevés, supérieurs à ceux observés dans les parcs à rejets de concentrateur, en raison des phénomènes de transport de l'oxygène par advection qui s'ajoutent à ceux par diffusion.

### **Rejets du concentrateur (laverie)**

Les rejets du concentrateur ou bien de la laverie sont généralement sous forme de pulpe, on les transporte aux sites d'entreposage ( les digues ). Les problèmes que ce type de rejets pose sont la stabilité physique des ouvrages de retenue et de confinement ainsi que la stabilité chimique des rejets.

Les problème de stabilité physique rencontrés avec les rejets du concentrateur sont en fonction des matériaux en place et surtout de leur état ( état mou et fortement saturé en solution ) ce qui pose un problème de consolidation et donc possibilité de provoquer un tassement et

donc une rupture du sol sur lequel ils sont entreposés.

Tout comme pour les stériles miniers, la stabilité chimique des rejets de concentrateur stockés en surface durant la phase opérationnelle est une préoccupation. La stabilité chimique des rejets de concentrateur utilisés comme matériaux de base pour du remblai cimenté sous terre est également importante. En effet, la résistance du remblai est affectée par la composition minéralogique et chimique du rejet de concentrateur. Dans certains cas, il peut y avoir une perte de résistance du remblai avec le temps, attribuable à une altération chimique [?] .

### 3.6.2 Drainage minier

Le drainage minier est un résultat de la circulation des eaux à travers tout le site minier en passant à travers ces différentes installations et composants; qu'elles soient des eaux superficielles ou bien celles des nappes souterraines alimentant ainsi par ce biais les effluents miniers.

Les deux types de drainage minier affectant de manière inquiétante l'environnement sont le drainage minier acide (DMA) et le drainage neutre contaminé (DNC).[6]

### 3.6.3 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 concentrateurs ( 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 suffisante de matériaux alcalins ayant une capacité à neutraliser les acides.



FIGURE 3.2 – Exemples de différents sites affectés par le DMA

### Caractérisation du DMA

Le critère le plus utilisé pour déterminer si des rejets ou bien quelqu'autre zone de stockage est génératrice d'acide est la détermination du potentiel net de neutralisation (NNP) ou bien le rapport entre le potentiel de neutralisation d'acide (NP) et le potentiel de production d'acide (AP), tel que  $NNP = NP - AP$ .

- Lorsque NNP est positif et le rapport  $\frac{NP}{AP} > 1$ , ces matériaux sont non-générateurs d'acide.
- Lorsque ce rapport est compris entre 1 et 2 il n'est pas certain de considérer ce matériau comme étant non-générateur d'acide.

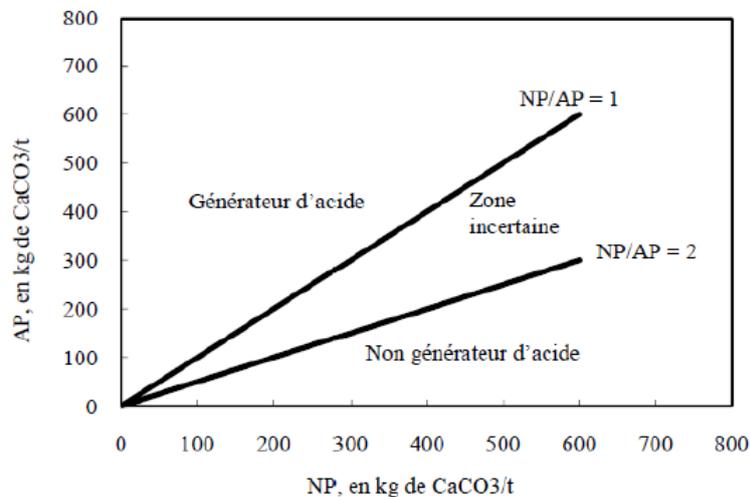


FIGURE 3.3 – Critère de classification des tailings sur base du rapport NP/AP [6]

### Prédiction contrôle et traitement du DMA

Il est impératif de réaliser des prédictions précises du drainage minier acide afin de déterminer comment le mettre sous contrôle. L'objectif du contrôle du drainage minier acide est de satisfaire les exigences environnementales en utilisant les techniques les plus efficaces.

Depuis plusieurs années, les recherches furent concentrées sur les causes générant le DMA afin de pouvoir mieux cerner ce problème et donc de prendre les mesures préventives nécessaires pour lui faire face et aussi pour le contrôler. Comme point de départ, chose évidente, fut de retirer l'un des éléments nécessaires aux réactions le provoquant (figure 3.5) lors des exploitations minière, ceci contribua de façon significative à réduire la production du DMA dans les surfaces où sont entreposés les différents types de rejets.

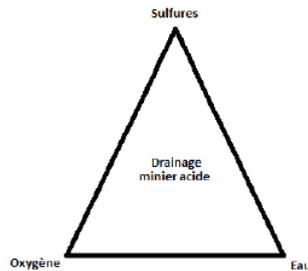


FIGURE 3.4 – Les éléments nécessaires pour un DMA [14]

**La désulfuration des rejets miniers** L'une des techniques les plus utilisées dans le but de minimiser la production du DMA est la désulfuration environnementale des différents rejets miniers du fait de son coût relativement bas et de son efficacité. Elle consiste à retirer les sulfures restant dans les minéraux, et en connaissant le potentiel de neutralisation des rejets miniers en place, on ne fera que séparer de ceux-ci la quantité suffisantes en minéraux acidogènes, tandis que le reste sera neutraliser par la présence des minéraux neutralisant de ces derniers dans le site.[?]

On utilise lors de la désulfuration différentes techniques, parmi les plus répandus on trouve la flottation non-sélective qui a pour objectif la récupération des sulfures se trouvant en surface (comme cité dans le chapitre précédent). Cette technique a donné des résultats très promettant, pouvant retiré même jusqu'à 96% de minéraux sulfurés [14] permettant de réduire le volume de résidus générateurs d'acides dont le résidu pauvre en sulfure sera utilisé pour différentes fin . Mais cette technique a aussi ses limites, l'une des plus importante est la manière d'utiliser ces sulfures extraits qui nécessite la mise en place de nouvelles techniques de gestion qui seront éclairci dans le schéma suivant :

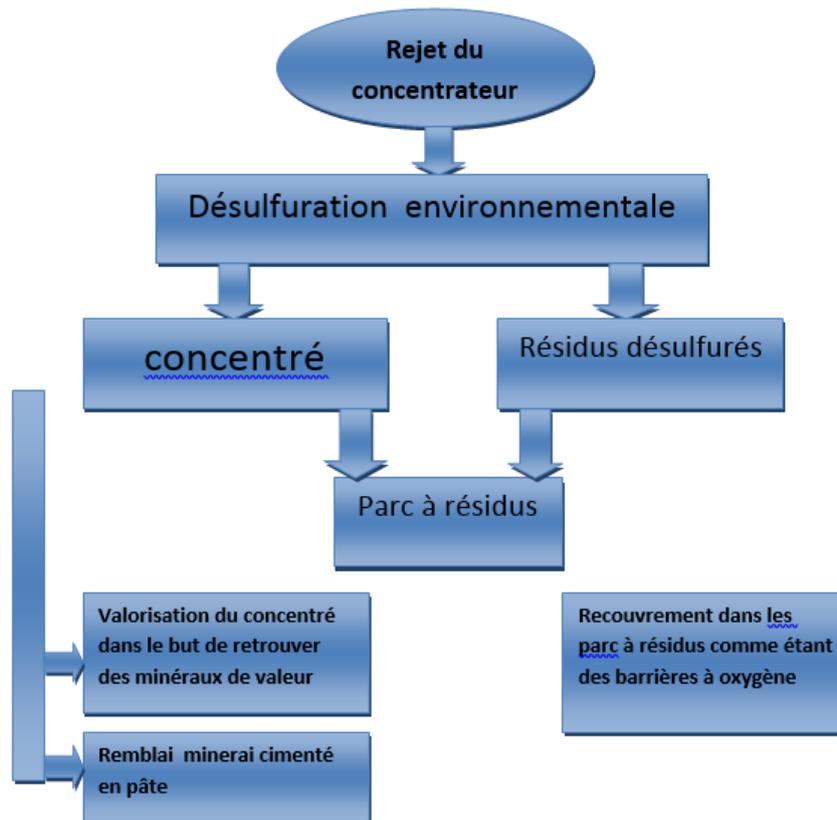


FIGURE 3.5 – Schéma de la gestion des résidus issus de la désulfuration

**Barrières à oxygène** Comme démontré dans les équations du DMA précédemment, l'oxygène est un élément dont l'influence est très importante dans la production que ce soit du DMA ou bien du DNC. Par conséquent, limiter son contact avec les différents types de résidus miniers, conduit implicitement à la réduction de la génération du drainage minier acide dans les aires où ceux-ci sont stockés.

Afin de réaliser ceci, des barrières à oxygènes sont aménagées, surtout dans les régions caractérisées par un climat humide. Ces barrières sont des couvertures à effet de barrières capillaires comme illustré dans la figure 3.7 dont chacune a un rôle spécifique à jouer pour participer à la réduction, voir même l'élimination, du DMA ou bien du DNC dans cette zone.

[?]

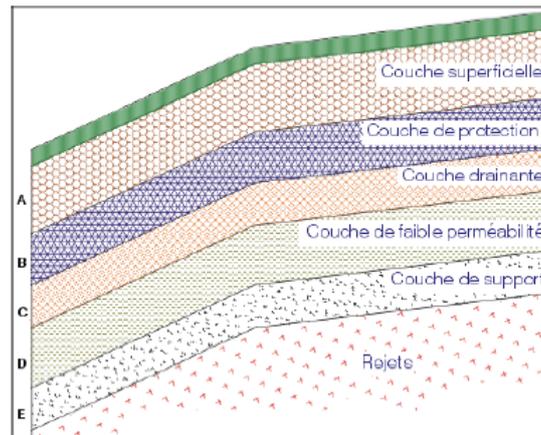


FIGURE 3.6 – Structure d'une couverture à barrière capillaire

**Les recouvrements et contrôle des infiltrations en eau** L'eau est l'autre élément nécessaire à la production des acides sulfurique, et par conséquent si on diminue le contact des eaux avec les rejets miniers, on diminuera ou même on éliminera la production du DMA.

Afin que ceci soit possible, il faudrait mettre en place des barrières peu perméables ou même imperméables aux eaux superficielles et souterraines. Ces barrières peuvent être faites de sols à faibles conductivités hydrauliques ou de matériaux synthétiques peu perméables (géomembrane ou géocomposite-bentonitique)(Aubertin et Chapuis, 1991).

### 3.6.4 Drainage neutre contaminé (DNC)

Le drainage neutre contaminé est un drainage caractérisé par une forte concentration en métaux lourds et en métalloïdes et dont le pH est neutre. Donc la qualité chimique de ce drainage dépend étroitement des caractéristiques chimiques et minéralogiques des rejets/résidus miniers à travers lesquels il circule.

Plusieurs processus contribuent à la formation et la production du drainage neutre contaminé, tels que :

- La dissolution des métaux inclus dans les rejets miniers engendrée par l'oxydation des minéraux sulfureux générateurs d'acides, en raison de la baisse du pH.
- La lixiviation des minerais métalliques non générateurs d'acides contenus dans les rejets tels que la sphalérite qui peut réagir avec l'oxygène en libérant du zinc sans générer d'acides.
- Les barrières à oxygène limitent l'apport en oxygène aux résidus miniers ce qui conduit à la limitation de l'oxydation des sulfures ce qui pourrait conduire à augmenter les concentrations en métaux lourds supérieures aux normes de rejets.

Les principaux effluents générés par le DNC sont : l'antimoine, l'arsenic, cadmium, chrome, cobalt, manganèse, mercure, molybdène, nickel, sélénium, sulfates et le zinc.[?]

## **Deuxième partie**

### **Présentation de la zone d'étude**

# Chapitre 4

## Gisement de Boucaïd

### 4.1 Situation géographique

La mine de Boucaïd se trouve à 250km au sud ouest de la capitale Alger sur la route reliant la wilaya de Chlef à celle de Tissemsilt, plus exactement à 58km au sud de Chlef et à 62 Km au nord de Tissemsilt. On peut y accéder à partir de la route nationale 19.

Celle-ci s'étend sur une surface d'environ 67km<sup>2</sup> selon le découpage administratif datant de l'année 1984.

Cette mine se trouve dans la commune portant le même nom- Daïra de Lazharia, sur le versant nord, aux pieds du massif de la chaîne de l'Ouarsenis à quelques 1200m d'altitude, L'unité de cette mine ainsi que ses installations se trouvent aux abords de la RN19 qui lui donne accès comme cité précédemment, celle-ci est bordée par :

- La commune de Karimia au nord, celle-ci constitue sa limite avec la wilaya de Chlef;
- Les communes de Bordj Bounaama et celle de Sidi-Slimane au sud;
- La commune de Beni-Chaïd à l'est;
- La commune de Lazharia par l'ouest.

La mine comporte deux gisements en cours d'exploitation qui se reposent sur le flanc sud de l'extrémité ouest du massif Abdelkader :

On a d'abord le gisement de Sidi-Lakhdar à 5km au sud-est du village relié à celui-ci par la route communale sur une distance de 2km, suivi d'une piste dont la longueur est de 3km.

Le second gisement est celui de Sidi-Belabess, localisé à 8km au sud est du village par lequel on peut accéder en empruntant la route communale sur une distance de 5km ensuite en prenant une piste de 2km de longueur.

## 4.2 Historique des Travaux

Les premiers gisements découverts dans la mine de Boucaïd sont des filons Plombo-Zincifères en 1856, un lieu connu sous le nom de Grand Pic, ensuite les deux gisements de Belkheiret et de Abdelkader ont été découverts en 1860 et 1863 respectivement. Ceci a conduit à émettre une demande d'obtention d'un permis d'exploration en 1872 par M. Terraillon et M. Calen. Mais les travaux ne furent jamais entamés pour certaines raisons et la région fut systématiquement abandonnée.

Vers la fin du 19<sup>e</sup> des travaux d'exploitation pour l'extraction des polymétaux cités ci-dessus, ces travaux ont connu leurs apogées en 1940 grâce aux études effectuées par le géologue Français M. Formmel.

La seconde période d'exploitations de ces gisements a débuté après l'indépendance, plus précisément après la nationalisation des mines en 1966 qui a constitué une continuité pour les travaux concernant l'exploitation des poly-métaux.

La SONAREM entama en même temps des travaux de prospection pour l'étude et la reconnaissance du gisement dans la région de Boucaïd( en 1967 ) dans le but d'exploiter le Zinc, ce qui a été fait jusqu'à l'épuisement des réserves en 1976.

En 1975, lors de l'élaboration des travaux de levés géologiques du gîte de Sidi-Belabess, une importante structure de barytine fut découverte sur une longueur de 850m, ce qui constitue une importante quantité de réserves. Des travaux d'évaluation et de prospection furent menés par la SONAREM elle-même durant la période allant de 1977 jusqu'à 1981. L'exploitation et le traitement de la baryte se faisait simultanément et parallèlement aux travaux de prospection et d'évaluation, dont le commencement a eu lieu en 1976. Ceci a permis à la mine de changer de statut en se reconvertissant en une unité de production [12].

Les travaux de recherches et de prospections ont permis de découvrir et de mettre en évidence plusieurs nouveaux sites tel que Le site de Sidi Ouadhah qui se situe sur les flancs oriental et occidental du massif de Belkheiret.

## 4.3 Aspect Climatologique

La mine de Boucaïd qui a fait l'objet de notre étude est située dans la région de l'Ouarsenis, elle est caractérisée par un climat méditerranéen typique avec un hiver pluvieux, humide et froid et un été chaud et sec.

La saison estivale (période chaude), allant de la mi-Mai jusqu'à Septembre, peut connaître

des maximum de température atteignant 42,0°C voir même 45,0°C.

La saison hivernale (période froide) est comprise entre les mois de décembre, voir mi-Novembre, et Avril. Celle-ci connaît des minimum de température pouvant atteindre 0.3°C. Lors de cette saison, des chutes de neiges peuvent avoir lieu, causant un gel allant de quelques jours jusqu'à deux semaines, et cela à partir d'une altitude de 1100m.

Concernant les vents, cette zone est soumise à des vents de direction Nord-Ouest ou Nord, avec une vitesse moyenne annuelle allant de 2.4km/s jusqu'à 2.9km/s qu'on pourrait qualifier de très légère brise [8].

## 4.4 Hydrologie et Hydrogéologie

La zone de l'Ouarsenis est constituée principalement de calcaire, qui est une formation perméable, donc elle permet l'infiltration des eaux superficielles. Ceci nous permet de dire que cette région peut être appelée un réservoir d'eau.

### 4.4.1 Eaux Superficielles

Le réseau hydrographique est constitué essentiellement d'Oueds intermittents dont l'écoulement dépend de la pluviométrie [12]. Les principaux Oueds traversant cette zone sont Oued El Atba, Oued Beni Boudjemaâ, Oued el Bhar et Oued Kherous.

### 4.4.2 Eaux souterraines

Le réseau des eaux souterraines est contrôlé par la nature des formations de l'Ouarsenis, i.e : des formations calcaires. La tectonique de ces formations facilite la circulation des eaux de pluie tout en provoquant la dissolution des minéraux [12].

Les sources exogènes ont un débit relativement faible compte tenu du réseau hydrographique (Celui-ci est enfoui sous le niveau des marnes-schisteuses). Le drainage des nappes se fait de façon naturelle grâce aux failles incluses dans la formation.

De nombreux puits et sources sont localisés dans la région, à titre d'exemple : Ain Tolba, Ain Khadra, Ain N'Soura, Ain Kahla, Ain Fouara, Ain Meliana...etc, qui sont exploités pour les besoins de consommation locale.

## 4.5 Géologie

Pour un ingénieur en génie minier, il est impératif que celui-ci connaisse la géologie de la région étudiée et principalement la lithologie, la tectonique, la stratigraphie ... car celle-ci constitue une base de données importante qui lui permet de connaître la composition minéralogique de la zone étudiée ainsi que de déterminer les différentes caractéristiques (géophysiques, géomécaniques, géochimiques, géologiques, géotechniques...) constituant cette zone afin de pouvoir procéder aux différentes étapes de ces travaux, que ce soit l'exploitation, le traitement, la réhabilitation des lieux en toute sécurité dans le cadre de son environnement minier.

### 4.5.1 Géologie Régionale

Les gisements étudiés s'inscrivent dans la géologie du massif de l'Ouarsenis s'étendant sur une distance de 200km, celui-ci est composé de roches sédimentaires affleurant sous forme de massifs isolés du jurassique parmi les terrains du crétacé.

Les massifs constituant cette région sont :

- Massif du Grand Pic : Compris entre Chéelif au nord et la wilaya de Tiaret au sud [4]
- Massif d'Abdelkader : C'est le massif sur lequel se reposent les gisements qui sont l'objet de notre étude.
- Massif Belkheiret, Massifs Batha, et certains autres blocs de glissements par gravité



FIGURE 4.1 – Situation géographique du Massif de l'Ouarsenis dans l'Atlas Tellien

### Stratigraphie de la région

La série stratigraphique de la région de l'Ouarsenis comprend une stratigraphie assez diversifiée, les terrains sont d'âges Paléozoïque, Mésozoïque et Cénozoïque. Les deux premiers sont assez rares à observer par rapport au dernier [4].

- Le Paléozoïque : la stratigraphie du paléozoïque reste peu connue aussi bien dans l'Ouarsenis que dans tout l'Atlas Tellien. Les terrains primaires sont donc assez rares.
- Le Mésozoïque qui regroupe le Trias, Jurassique et Crétacé :  
On peut observer le Trias dans l'Ouarsenis jalonnant les contacts matérialisés par des complexes gypso-salins, des dolomies massives et des cargneules. Les affleurements jurassiques sont moyennement fréquentes et timides, qui comportent en majorité une sédimentation carbonatée [10]. Par ailleurs, la série des affleurements des terrains du Crétacé sont largement vus dans ce massif, caractérisée par des dépôts carbonatés peu profonds à profonds interrompus par des puissantes séries grésopélitiques pendant l'aptien inférieur-Albien. Une dominance marneuse caractérise le crétacé supérieur
- Le Cénozoïque regroupant le Paléocène, l'Eocène, l'Oligocène, Le miocène et le Pliocène :
  - Le Paléocène : On peut dire qu'il est caractérisé par les mêmes dépôts que ceux du Crétacé supérieur.

- l’Eocène : Il englobe des formations marneuses en général.
  - l’Oligocène : Il caractérise le faciès de Boghari (l’oranais)
  - Le Miocène : Caractérisé par des dépôts de marnes similaires à ceux de l’Eocène.
  - Le Pliocène : constitué de placages cailloutis et des replats de tuf.
- Le Quaternaire : Ces dépôts forment des terrasses caillouteuses, et des alluvions de limons dans des vallées dont la profondeur est en dessous de 50m

### 4.5.2 Tectonique

La tectonique des gisements constituant la mine de Boucaïd est celle qui affecte le massif de l’Ouarsenis, ce dernier est constitué de roches jurassiques étant amenées vers la surface à partir d’une faille profonde. Celle-ci est à l’origine du déplacement des nappes.

L’ossature du massif montagneux fut ainsi constituée par un anticlinorium à ennoyage, causé par le déplacement des nappes, vers le Nord-Est, et aussi par un anticlinal couché au sud remplissant l’aire synclinale.

Ceci fut l’origine de nombreux accidents tectoniques qui ont affecté les masses calcaires favorables à la cassure que ceux des pays environnants, et par conséquent un aspect plus complexe et écaillé.

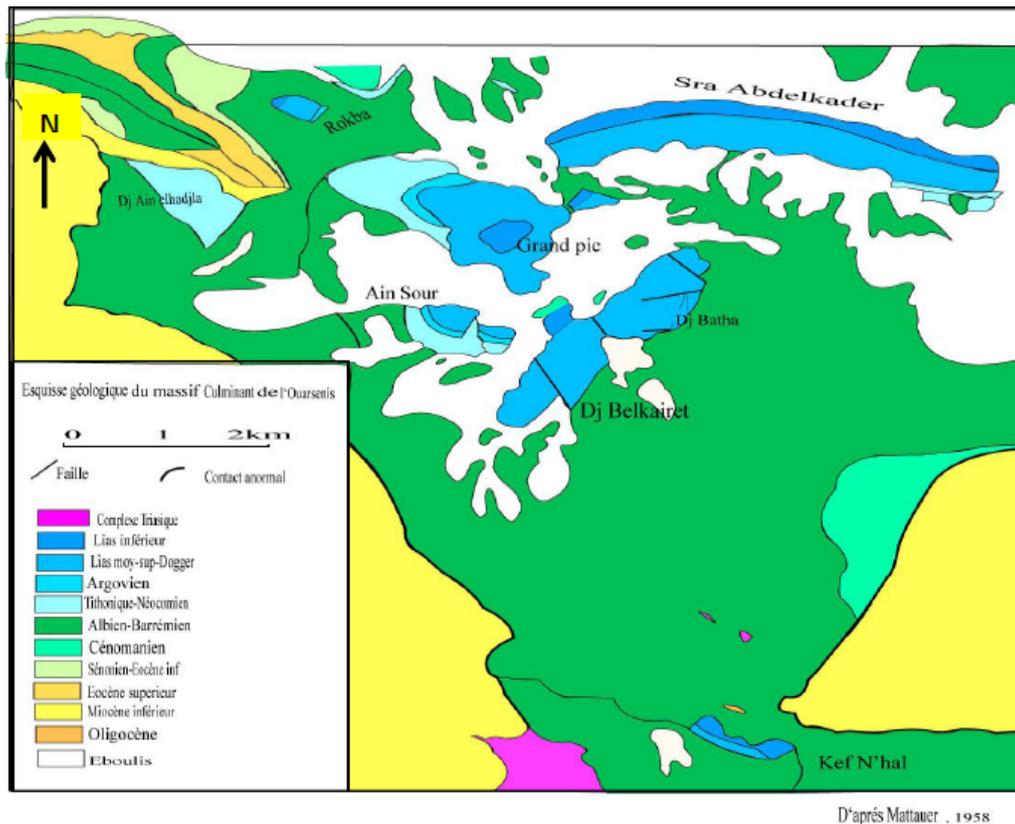


FIGURE 4.2 – Une esquisse géologique du Massif de l’Ouarsenis, D’après Mattaur

### 4.5.3 Géologie Locale ( Des Gisements)

#### Géologie du gisement de Sidi Belabbes

En 1975 commença l’étude géologique du gisement de Sidi-Belabbes qui se trouve dans la partie sud-est du massif Abdelkader associé à l’accident tectonique orienté Est-Ouest. Une puissante structure de Barytine de 850m de longueur fut découverte, ce qui a conduit à l’entame des travaux de prospection et d’évaluation dès 1977 dont l’achèvement a eu lieu en 1981.

Cette structure est de type filonien affleurant entre les côtes 1210m et 1350m.

Ce filon s’étend sur une longueur de 400m suivant une direction sub-latitudinale ( $275^\circ$ ) et de 230m selon un pendage allant de  $76^\circ$  à  $85^\circ$  vers le sud, avec une épaisseur de 1.6m et une teneur moyenne de 80,00% en  $BaSO_4$  [18]

#### Géologie du gisement de Lakhdar

Le gisement de Lakhdar est subdivisé selon les trois niveaux d’exploitation suivants :

**Lakhdar niveau 1452m :** Il fut mis à découvert par la galerie 1452m, dont le grand axe du corps est allongé dans une direction latitudinale, tandis que dans les galeries longitudinales et les recoupes, les contacts avec le gisement se font sous un angle allant de 50° à 70° selon une direction sud-est.

Le gisement est constitué d'une minéralisation de baryte poly-métallique grise à moucheture de galène, développé dans les dépôts du lias moyen et supérieur et du jurassique inférieur, représenté sous forme d'amas ayant une structure irrégulière.

Ce corps barytique est exploité entre les niveaux 1426 et 1485m, qui se présentaient sous une allure conique avec un axe décentré avant l'exploitation de la partie supérieure du niveau 1485m. Le minerai est renfermé dans une gangue argileuse plus ou moins importante ayant une densité de 4,20 et une teneur moyenne de 76,00% [17].

**Lakhdar niveau 1497m :** Ce corps est sous une forme filonienne qui affleure entre les côtes 1500 et 1520m, il s'étend sur une longueur de 261m selon une direction Nord 7°, suivant un pendage allant de 25° à 35° vers le sud, encaissé dans des roches calcaires du Lias moyen et supérieur. Ce corps a une puissance de 1,30m avec une teneur moyenne d'environ 85,9%. [17]

**Lakhdar niveau 1550m :** Ce corps est sous forme d'amas d'une structure irrégulière affleurant entre les côtes 1530 et 1580m. Ce minerai est renfermé dans une gangue argileuse d'une grande densité d'environ 4,30. Il est encaissé dans des roches calcaires du Lias moyen et supérieur.

La teneur en  $BaSO_4$  de cette minéralisation est estimé à 60,00%. [17]

### Géologie du gisement du Nord

Il s'agit d'une structure filonienne mise en place dans un accident cassant de direction sub-latitudinale (112-192°) et à pendage de 70-75° vers le nord-nord est. La minéralisation affleure en surface sur une longueur de 300m encaissée dans des dolomies du Lias inférieur.

La puissance moyenne de cette minéralisation est de 1.6m tandis que sa teneur moyenne est estimé à 70%.

Le filon Nord est ouvert sur trois niveaux, niveaux 1200 m, niveau 1150 m et le niveau 1115 m, les niveaux 1200 m et 1150 m ont fait l'objet de l'exploitation durant les années précédentes. Ces deux niveaux ont subi au début de l'année 2009 des affaissements et des fissurations naturelles aux alentours des entrées de galeries et aux niveaux des pistes accès. Cette Calamité naturelle a influé négativement sur le déroulement de l'exploitation durant toute l'année 2009 et au début de l'année 2010. [28]

#### 4.5.4 Travaux Géologiques

#### 4.5.5 Gisement De Sidi-Belabbes

À ce jour, cinq galeries de différents niveaux ont contribué à la reconnaissance de ce gisement :

- Les niveaux 1200m et 1290m sont en exploitation jusqu'à aujourd'hui.
- Le niveau 1225m est actuellement en exploitation jusqu'à son affleurement en surface.
- Durant les années 2002 et 2003, Un filon a été reconnu au niveau 1175m s'étendant sur une longueur de 102m ce qui a conduit à la réalisation de deux cheminées selon le pendage du gisement ayant chacune une hauteur de 50m. La prospection a continué lors des années 2004 et 2005 sur une longueur de 470m en mettant toujours en place des cheminées selon le pendage ce qui a abouti au commencement des travaux d'exploitation à partir de 2006 et cela jusqu'en 2008.
- Au niveau 1125m, une galerie fut creusée afin d'étudier l'extension du filon vers le bas, en 2004, avec un total d'avancement estimé à 111m. En 2004 et 2005, 350 m de galerie et cheminées ont été réalisées dans ce corps afin de poursuivre la prospection au niveau 1125 m et selon son pendage jusqu'au niveau 1175 m.

Jusqu'à aujourd'hui, les travaux de recherche et de prospection sont toujours en cours de réalisation afin de faire avancer la galerie qui se prolonge en direction jusqu'à l'extrémité ouest du filon barytique et la partie supérieure aura pour objet la réalisation de cheminées jusqu'au niveau 1175m pour continuer la prospection.[18]

#### 4.5.6 Gisement de Lakhdar [17]

**Lakhdar niveau 1452m :** Ce corps fut découvert et prospecté par la division de recherche ( ex SONAREM ) entre 1969 et 1973. Des galeries ainsi que des sondages furent réalisés. Grâce à ces travaux, il fut possible d'estimer les réserves à 300 milles tonnes d'une teneur de 80,00% mais les contours supérieurs et inférieurs n'ont pu être délimités lors de ces travaux ce qui nécessita des prospections supplémentaires qui furent entrepris par le service géologique de l'unité suivant ce programme en effectuant des sondages profonds traversant la zone barytique.

Afin de délimiter le contour de la partie supérieure du gisement, des cheminées et des recoups sont en cours de réalisation.

**Lakhdar niveau 1497m :** Les travaux suivant furent réalisés :

- 24 tranchées ont été creusées au jour

- Une galerie d'une longueur de 261m fut creusée à partir du niveau 1518m ainsi que 5 cheminées selon le pendage du corps.

**Lakhdar niveau 1550m :** Après l'aboutissement des travaux de recherches du corps barytique qui fut recoupé, et cela grâce à une galerie au niveau 1550m, des travaux de recherches furent engagés par des ouvrages miniers ainsi que des sondages à partir de la galerie 1550m, afin d'étudier l'extension du corps vers le bas ainsi que vers le haut, de façon simultanée.

## 4.6 Minéralisation

La morphologie des gisements de l'Ouarsensis, Boucaïd inclu, est caractérisée par des filons, lentilles et amas résultant des accidents tectoniques ayant eu lieu dans cette zone. On distingue deux types de gisement selon leur formation : les amas et les filons

### Les amas :

Les amas sont des gisements ayant une forme quelconque, généralement sous forme de lentilles dont les dimensions sont d'une même grandeur.

Dans le gisement de Sidi-Lakhdar la baryte se présente sous forme d'amas aux niveaux 1330m, 1452m, 1550m.[19]

### Les filons :

Les filons sont des gisements constitués par un remplissage des fractures pré-existantes de l'écorce terrestre, qu'il soit en continu ou discontinu, par divers minéraux.

La baryte se trouve aussi sous forme filonienne dans le gisement Sidi-Lakhdar aux niveaux 1497m, 1620m et aussi au gisement Nord aux niveaux 1200m, 1150m et 1050m

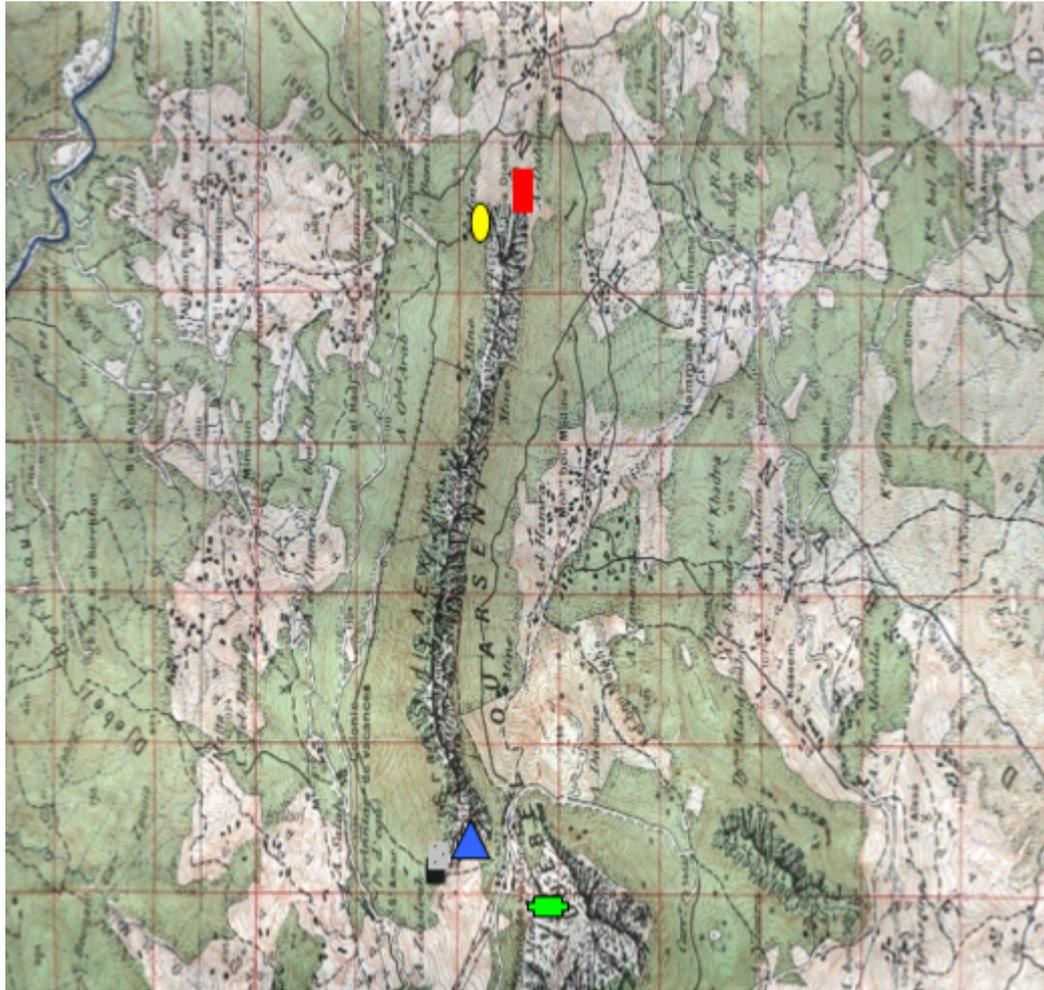


FIGURE 4.3 – LOCALISATION DES GISEMENTS DE BARYTE

- Gisement de sidi Belabbes (Sidi Djbar)
- Gisement Nord
- ▲ Gisement Lakhdar
- ➔ Gisement Grand Pic

## 4.7 Réserves Géologiques

La méthode utilisée dans le but de déterminer les réserves de ce gisement est celle des sections parallèles vu la structure compliquée du gisement, en se basant sur la disposition des recoupes de recherches afin de réaliser ces sections verticales pour que les distances maintenues soient à peu près égales entre elles.

D'après les mises à jour continues réalisées par l'équipe travaillant à la mine de Boucaïd, les réserves géologiques du gisement Lakhdar sont de l'ordre de 214 239 tonnes dont 193 787 tonnes sont exploitables et 142 759 tonnes sont récupérables. Tandis que celles du gisement Nord sont de 186 066 tonnes dont 161 484 tonnes exploitables et 118 460 tonnes sont récupérables.

Catégorie des réserves	Réserves Géologiques	Réserves Exploitables	Réserves Récupérables
Gisement de Lakhdar			
B	21 191	17 957	16 161
C1	193 048	175 830	126 598
C2	0	0	0
Total	214 239	193 787	142 759
Gisement du Nord			
B	14 074	12 175	10 958
C1	171 992	149 903	107 502
C2	0	0	0
Total	186 066	161 484	118 460

TABLE 4.1 – Tableau recensant les réserves des deux principaux gisements plombo-barytiques de Boucaïd au 31/12/2017

## 4.8 Traitement du Minerai au Niveau de l'Usine [21]

L'usine de Boucaïd réalise les opérations de traitement, enrichissement et de transformation du tout-venant du minerai de Baryte en un produit fini marchand conforme aux normes API.

Le tout-venant d'une grosseur de 500mm au maximum ainsi que d'une teneur minimale de 60,00% en  $BaSO_4$  se fait traiter dans 3 stations :

### 4.8.1 Station de Concassage :

Le tout-venant alimentera des concasseurs afin de subir trois opérations de réduction de sa taille de façon mécanique :

- Réduction du tout-venant à une taille de 70mm à l'aide d'un concasseur à machoire à simple volet de type VB67 BERGEAUD
- Criblage et réduction de la grosseur des particules à 14mm dans un groupe de broyeurs-cribles mobiles SYMENS, à l'aide d'un crible à 3 étages
- Réduction à 6mm dans un concasseur à cylindre lisse type BCR 60\*80.

Ensuite le tout-venant réduit ( 0 à 10mm) est stocké dans trois trémis tampons de 120 tonnes de capacité chacune.

### 4.8.2 Enrichissement

Après avoir concassé le tout-venant, ce dernier subit une séparation gravimétrique par accélération différentielle en utilisant un appareil appelé Remer-Jig de marque WEMCO.

Le concentré de baryte sera récupéré du bas de l'appareil dans un classificateur spiral puis évacué vers des chambres pour égouttage puis le stocker sur une surface pouvant supporter jusqu'à 9000 tonnes de capacité. Tandis que les rejets sont acheminés en surface avec l'eau vers une digue pour décantation, stockage et recyclage de l'eau clarifiée. Le rendement de cette installation est de 12 tonnes par heure en concentré.

### 4.8.3 Station de Pulvérisation et de conditionnement

Cette opération a pour objectif la transformation du concentré à un produit fini marchand conforme aux normes API.

Le concentré avec une humidité maximale de 12% à l'entrée du sécheur rotatif de 14m de longueur et 2m de diamètre, où il est ramené à un taux inférieur à 1% à la sortie du séchage. .

Le produit séché subit des opérations de broyage fin dans un broyeur pendulaire BP16 ainsi qu'une séparation granulométrique dans un séparateur statique où les particules de dimensions inférieures à 75 $\mu$ m sont stockés dans des trémies de stockage de produit finis.

Le produit de dimensions inférieures à 75 $\mu$ m est mis en big-bac de 1.5 tonnes chacun et qui représente le produit fini de l'usine destiné pour l'utilisation en boue de forage pétrolier.

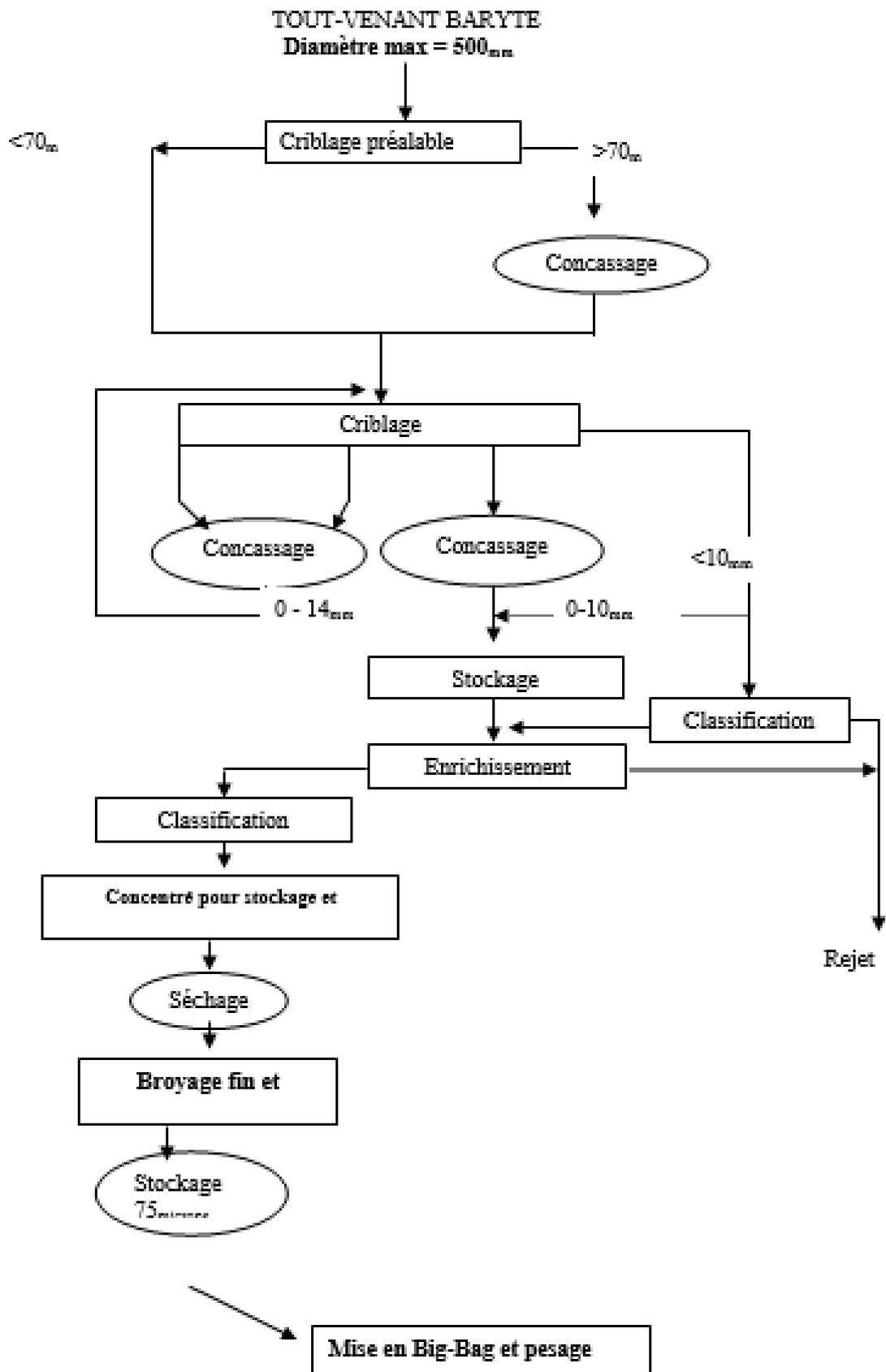


FIGURE 4.4 – Schéma Technologique de traitement du minerai de baryte de Boucaïd

# Chapitre 5

## Gisement de Kherzet Youcef

### 5.1 Situation Géographique

Le site minier de Kherzet Youcef appartient au domaine Hodénéen, il se situe au nord ouest du chef lieu de la commune de Ain-Azal dans la wilaya de sétif à 4.5km de la mine de Chaâbt El Hamra, limité par le nord par Djebel Sekrine et à l'Est par la commune de Salah Bey et celle de Aïn Oulmane au Nord-Ouest. Il comporte une digue où sont stockés les rejets miniers plombo-zincifères qui ont fait l'objet de notre projet de fin d'étude. cette digue s'étend sur une surface de 7Ha [20] et qui contient aussi les rejets de la mine de Chaabet el Hamra.

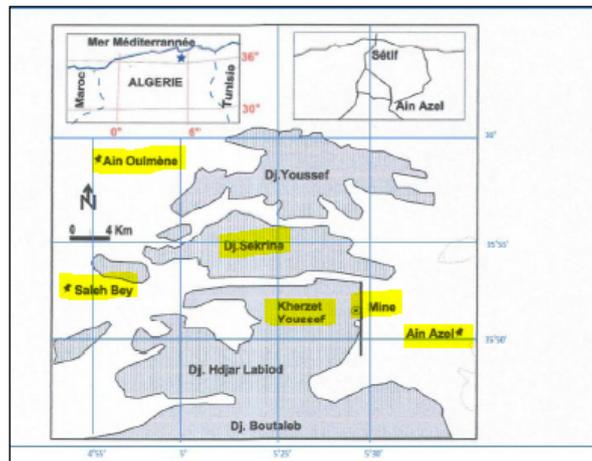


FIGURE 5.1 – Situation Géographique de la mine de Kherzet Youcef

Les coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) du complexe minier de Kherzet Youcef ( comportant les deux mines : Chaâbet El Hamra et Kherzet Youcef) sont mentionnées ci après [6] :

Site	Cordonnées X	Coordonnées Y	Coordonnées Z(m)
Kherzet Youcef	718 000	3 968 900	950 à 1250
Chaâbet-El Hamra	726 902 à 728 505	3 962 567 à 3 963 212	950 à 1200

## 5.2 Historique des Travaux

Ce sont les français qui ont commencé les premiers travaux d'exploration et de prospection géologique et ceci depuis le 19<sup>e</sup>siècle. La première publication de Brossard en 1866, met en place une description géologique des différents monts du domaine Hodénéen, suivi par la réalisation d'une carte géologique d'une échelle de 1/800 000 par Fisheur en 1881 mettant en évidence des formations de type jurassique.

Au début du 20<sup>e</sup>siècle, Savornin réalisa des études sur le domaine hodénéen et des plateaux Sétifien et les publia ( entre 1904 et 1920).

En 1956, les français ont entamé les travaux d'exploitation de Soubelle, Djebel Ichemoul, Bou Iche, Djbel Gustar et Kherzet Youcef.[6]

Après l'indépendance, la société Yougoslave RUDIS effectua des travaux d'exploration et de prospection géologique entre 1963 et 1965, qui ont permis de donner une estimation des réserves exploitables d'environ 1.6 millions de tonnes, ensuite ce fut le tour à une société russe de le faire et après qu'elle eut été noyée à cause des remontées d'eau en 1971, une société Bulgare (BGM) effectua le dénoyage ainsi que l'approfondissement des puits et la construction du complexe minier (laverie, travaux souterrains préparatoires). La production démarra en 1979 avec une cadence de 400T\jour.[15]

Plusieurs modifications ont eu lieu lors de l'exécution des travaux de fonçage des puits à cause de la nature sableuse de certaines intercalations dans les terrains de cette zone ce qui a favorisé les remontées d'eaux d'un débit de  $740m^3/h$ . Cela a conduit à l'ouverture d'un seul niveau ainsi que la modification du réseau d'exhaure.

Actuellement la mine de Kherzet Youcef est fermée, et ceci depuis 1990 à cause des inondations qui ont eu lieu, avec un débit atteignant  $36000m^3/h^{-1}$ . [15]

## 5.3 Topographie

Notre zone d'étude s'insère dans le domaine Hodénéen, plus précisément dans la plaine Sétifienne, piégée entre les deux massifs de l'Atlas tellien ( Telle et Pré-Saharien). Cette zone

constitue la limite entre les hautes plaines et les monts du Hodna du sud, dont le relief est composé de trois zones homogènes :

- Des zones montagneuses au sud et à l'ouest, dont l'altitude varie entre 1150m et 1250m.
- Des zones de hautes plaines au nord et au centre, dont les altitudes varient entre 950 et 1050m
- Une zone de piémont sous forme de bande Nord-Sud qui constitue un passe entre les plaines et les montagnes, dont l'altitude est comprise entre 1050 et 1150m

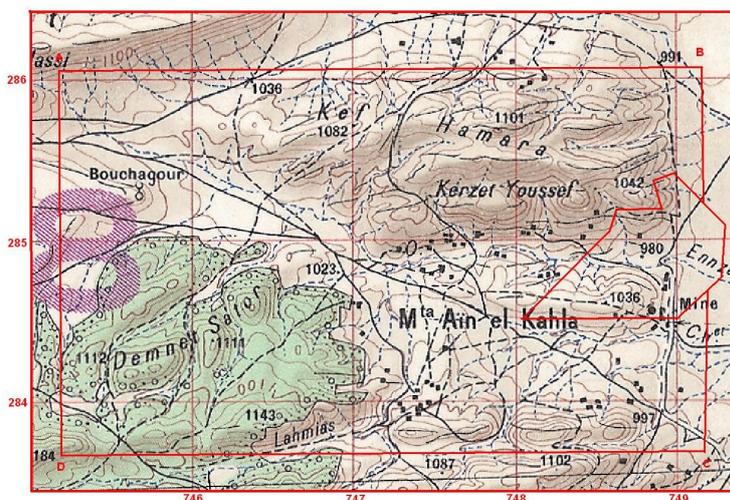


FIGURE 5.2 – Carte topographique N°143 de Ain-Azel au 1/50 000.

## 5.4 Aspect Climatologique

On s'intéresse au cadre climatique de la région de Aïn Azal vu son importance pour l'identification des facteurs influant sur la dispersion des éléments à trace métallique. Vu que celle-ci se situe dans la wilaya de Sétif, ie : elle appartient au domaine Hodénéen, celle-ci est sujette à un climat méditerranéen semi-aride à aride, avec un hiver froid, pluvieux et même entrecoupé par des périodes neigeuses et un été chaud et sec sujet à des vents chauds (sirocco) et d'après les données recueillies et traitées provenant de l'ONM et de l'ANRH d'Alger, les caractéristiques climatique de la région sont les suivantes :

### 5.4.1 Précipitations :

le total des précipitations enregistré dans la région de Aïn-Azal à partir de la station pluviométrique donne une moyenne annuelle d'environ 300mm/an , ce qui montre que la pluvio-

métrie est assez faible par rapport à celle des régions du Nord du pays.

La période pluviale s'étend du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai, (plus de 25mm/an) avec une baisse considérable durant le mois de Février, ceci constitue la période la plus humide. Tandis que durant la période de Juin jusqu'à Aout on remarque de faibles précipitations qui peuvent atteindre un minima de 3mm durant le mois de Juillet.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jun	Jlt	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
$P_{moy}$	36	18	28	30	43	19	3	13	33	29	26	26

TABLE 5.1 – Précipitation de la région de Ain-Azal 1990-2010

Les précipitations nous permettent de déduire que grâce aux ruissellement dûs aux pluies cette région est sujette à une érosion qui déclenche le déplacement des ETM, particulièrement sur les terrains nus dominant la région

#### 5.4.2 Température :

La Température de la région connaît deux extrémums qui sont 3°C et 26°C, enregistrées durant les mois de Décembre et Janvier ainsi qu'en Juillet et Aout, nous indiquent l'existence de deux périodes climatiques distinctes, une période humide et froide ainsi qu'une période sèche et chaude.

#### 5.4.3 Vents et Evapotranspiration :

Les vents soufflants dans la région de Aïn-Azal soufflent généralement d'une direction Nord Nord-Ouest et Nord-Est. En période sèche, le Sirocco est le vent le plus dominant, il est de direction Nord-Est.

Le phénomène de l'Evapotranspiration consiste à l'évaporation des eaux de la surface de la terre, qu'elles soient superficielles de ruissellement ou bien celle due à la transpiration de la végétation, celle-ci croit avec l'augmentation de la température.

### 5.5 Hydrologie et Hydrogéologie

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'ORGM, 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 coté 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 continentale hétérogène représentée par l'existence d'intercalations entre des conglomérats et des grés, 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 intramontagneux 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.

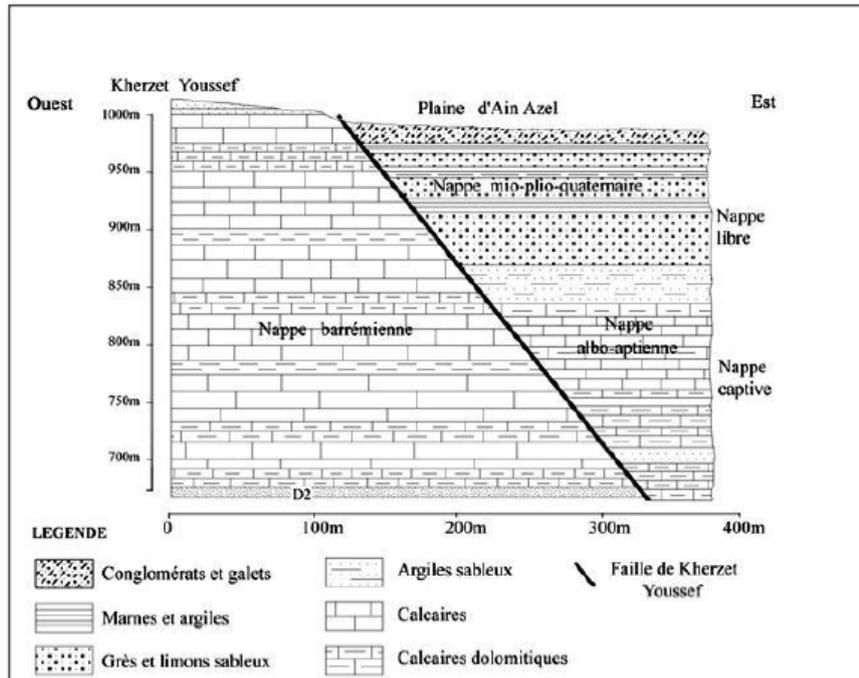


FIGURE 5.3 – coupe hydrogéologique de la région de Kherzet-Youcef[5]

## 5.6 Géologie

Dans le cadre de notre spécialité, la géologie est d'une importance primordiale afin de pouvoir maîtriser l'exploitation et le traitement et de préserver même l'environnement minier.

Dans notre cas, la géologie régionale nous permet de cerner notre zone d'étude qui fait partie intégrante d'un vaste domaine qui est celui des monts du Hodna. Celui-ci constitue un ensemble montagneux se trouvant entre deux chaînes montagneuses, i.e : l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au sud.

Tandis que la géologie locale nous permettra de connaître la composition minéralogique et les phénomènes géochimiques affectant les rejets miniers se trouvant dans notre zone d'étude.

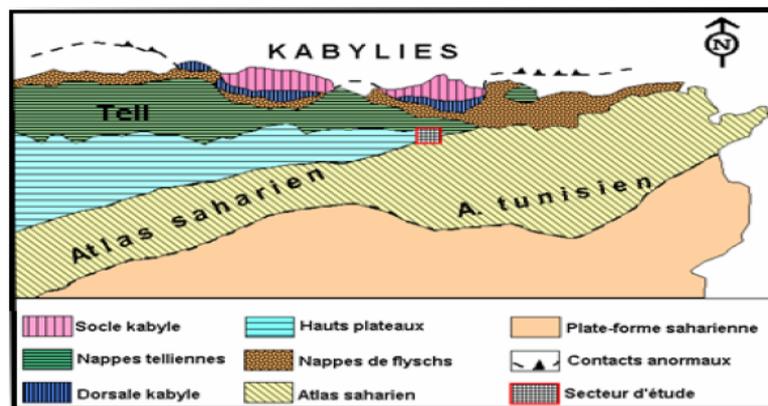


FIGURE 5.4 – Situation de la zone d'étude dans le dispositif structural de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale.[6]

### 5.6.1 Géologie Régionale

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 épihercynienne.[15] 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.

#### Tectonique

Dans le domaine des monts du Hodna, il existe deux unités tectoniques distinctes séparées par le front sud sétifien et qui sont [5]

- L'allochtone sud sétifien au Nord, constitué d'un vaste empilement d'écailles limitées par des cisaillements.
- L'autochtone hodnéen au Sud, dont fait partie le Djebel Hadjar Labiod qui est affecté essentiellement par une tectonique assez complexe liée à l'orogénèse alpine.

La tectonique récente est importante surtout dans le côté sud-est de la région, due à l'existence d'accidents cassants la traversant de l'est vers l'ouest. Elle illustre un bon exemple du régime tectonique superposé régnant aux limites autochtones et allochtones des monts hodnéen.[20]

### 5.6.2 Géologie Locale

Dans cette partie, on parlera de l'allure générale du gisement, de sa genèse, de la morphologie, de la minéralisation et des caractéristiques de la lithologie du Barrémien.

Le gisement de Kherzet-Youcef est sous forme de multi-couches, associé à une série dolomitique de plate-formes instables et subsidentes. Cette série est organisée en séquences régressives comprenant des dolomies sous forme de bancs coupés par des formations marneuses, de dolomies marneuses et de laminites.

Le gisement minéral de Kherzet-Youcef comprend une vingtaine de couches minéralisées, dont 7 seulement sont exploitables. L'épaisseur totale de la série dolomitique métallifère varie de 170 à 190m. Les minéralisations commencent à une distance de 10 à 30m de la faille de Kherzet-Youcef qui constitue la limite de ce gisement à l'Est. Le nombre de couches minéralisées est maximal à son voisinage, tandis que la morphologie dominante dans ce gîte est celle d'amas stratiformes plus ou moins allongés en direction Nord-Nord-Est d'une largeur allant de 60 à 150m. Aucune tectonique n'affecte l'intérieur du gisement mis à part quelques déformations souples observées au mur de la faille.

L'ensemble du médian Barrémien comporte les couches minéralisées qui sont séparées, celui-ci a amené des dépôts tidaux de plate-forme ouverte ( argiles, marno-calcaires noduleux et marnes )(Touahri 1991).[9].

Comme cité précédemment le gisement est limité par la faille de Kherzet-Youcef à l'Est, par des faciès dolomitiques et des calcaires à l'Ouest et ceci après disparition de la minéralisation. Au Sud (et en profondeur) la série de Kherzet Youcef est transgressive sur l'ensemble inférieur carbonaté et gréseux du Barrémien ( Bousdira 2008).

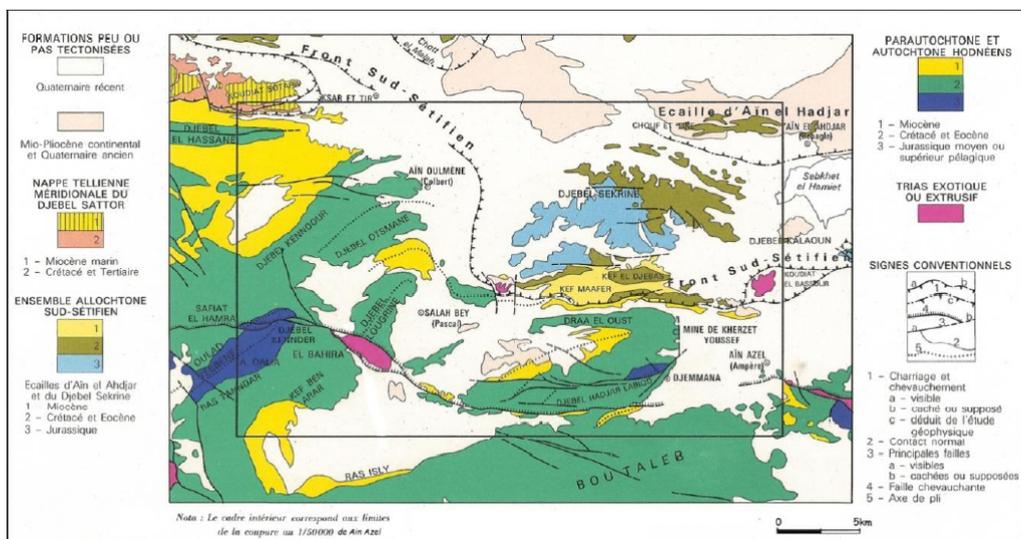


FIGURE 5.5 – Schéma structural simplifié de la région d'Ain Azel (extrait de la carte géologique N°143 au 1/50 000 d'Ain Azel) (Villa, 1977) 43

## 5.7 Minéralisation

En se basant sur les études géologiques établies par les différents organismes ayant explorés et prospectés la région, la minéralisation s'étend sur une longueur de 1300m suivant l'inclinaison de la faille .

La minéralisation de la région de Kherzet Youcef se présente globalement sous la forme de minerais sulfurés dont les minerais métallifères principaux sont la macasite ( $FeS_2$ ), la sphalérite ( $ZnS$ ), la galène ( $PbS$ ) ainsi que la pyrite, l'anhydrite et le cuivre gris avec de faible proportion. Cette minéralisation est de forme stratiforme se trouvant dans les sédiments du Barrémien. La sphalérite (blende) est le minerai métallifère le plus répandu. La roche encaissante est la dolomie grise, à grains fins, poreuse, renfermant des grains de quartz, pyrite et macasite.

Les couches minéralisées sont de texture bréchique, cataclastique ou veineuse, surtout celle du zinc, tandis que le minerai caractérisant le plomb est à texture massive ou veineuse.

La connexion spatiale de la minéralisation avec la faille nous permet de conclure à une connexion génétique. Il est supposé que cette faille aurait eu un rôle de canal pour la venue de la minéralisation. Cela implique que la faille a eu un rôle important pour la genèse de ce gisement.

**La sphalérite ZnS** C'est la minéralisation la plus dominante dans le gisement métallifère de Kherzet-Youcef, d'une teneur pouvant atteindre des pourcentages allant de 40 jusqu'à 60%.[3]

Grâce à l'étude microscopique, on a pu démontrer qu'il existe deux générations distinctes de Sphalérite, et ceci en se basant sur la couleur des réflexions internes[25]. Elle varie du brun foncé au brun clair à jaune foncé. Elle montre aussi que celle-ci se présente sous forme de cristaux craquelés, hétérogranulaire parfois en plages subautomorphes à automorphe dans la dolomite. On distingue :

**Sphalérite I :** en grandes plages bien cristallisées souvent cataclasées. Elle peut remplir les interstices de la dolomite. [6]

**Sphalérite II :** de couleur jaune miel, qui se présente en gros cristaux subautomorphes dans les espaces laissés par la dolomite. [6]

**La galène :** la galène est rarement observée. Elle se présente sous forme de plages cristallisées extrêmement riche en arrachements triangulaires [25]. Son analyse spectrale montre l'existence de l'argent, du cadmium, cuivre ainsi que le bismuth tandis que l'analyse à la microsonde électronique a révélé la présence du plomb, du zinc et du fer avec des teneurs respectives de 86,1-86,9%, 0,02% et 0,02-0,006%.[3]

. La teneur de la galène dans le gisement de Kherzet Youcef peut atteindre des pourcentages allant de 10 à 15% et parfois 25 à 30%.

**La pyrite :** Celle-ci est rare et observée dans les roches argilo-carbonatées sous forme d'éléments microscopiques..

**La marcasite :** La marcasite constitue le sulfure le plus précoce, elle est irrégulièrement distribuée dans les couches minéralisées dans notre zone d'étude malgré sa bonne répartition au voisinage de la faille. L'analyse spectrale quantitative et à la microsonde, montrent des traces de nombreux minéraux tels que ; l'Arsenic, le Cobalt, l'Argent, le Bismuth, le Niobium...etc avec des teneurs de l'ordre de quelques ppm, tandis que le zinc est présent avec des teneurs moyennes de 25%.

## 5.8 Réserves Géologiques

### 5.8.1 Réserves du gisement

En 1964, M.Dolenc, en se basant sur les données de sondages réalisés par REMINA, BRGM et RUDIS, a entamé des calculs de réserves du minerai sur une longueur de 500m dans la direction Nord Nord-Est en utilisant la méthode des profils parallèles. Ces réserves furent estimées à 750000 tonnes de minerai avec 2.6% en plomb et de 17% en Zinc, elles sont explicitées dans le tableau suivant :

Réserves	Minerai (tonne)	Teneur Pb (%)	Teneur Zn (%)	Pb (tonne)	Zn (tonne)
Réserves certaines	499 500	2.5	17.1	12 500	85 400
Réserves probables	153 000	2.8	16.4	4300	25 200
Réserves possibles	97 000	3.0	17.0	2900	16 500
Total	750 000	2.6	17.0	19 700	127 100

TABLE 5.2 – Tableau montrant les réserves estimées par M.Dolenc selon la méthode des profils parallèles [20]

M. Strucl a adopté la méthode des projections horizontales des surfaces minéralisées de diverses couches continues suivant le pendage, qu'il a surnommées de A à M. La quantité des réserves de minerai géologique établies se montait à 1 025 500 tonnes d'une teneur de 3,2% en plomb et de 17,7 % en zinc.[20]

Réserves	Minerai (tonne)	Teneur Pb (%)	Teneur Zn (%)	Pb(tonne)	Zn(tonne)
Réserves certaines	626 000	3.2	18.1	20 300	113 100
Réserves probables	219 000	3.3	16.7	7150	36 600
Réserves possibles	180 500	3.1	17.0	2900	16 500
Total	1 025 000	3.2	17.7	33 100	181 500

TABLE 5.3 – Tableau montrant les réserves estimées par M.Strucl selon la méthode des projections horizontales [20]

### Réserves Industrielles :[20]

Les réserves exploitables s'élèvent à 2 700 000 tonnes de minerai d'une teneur de 1.8% en plomb et de 9.3% en Zinc, tel que :

- les réserves certaines s'élèvent à 60.7%
- les réserves probables à 23.2% ;
- et les réserves possibles à 16.1%

Toutefois des difficultés d'exploitation sont apparues en 1990, suite aux inondations souterraines, ayant causées plusieurs victimes (exhaure).

## 5.9 Traitement du Minerai au Niveau de l'Usine

Le complexe minier de Kherzet-Youcef comprend une laverie dans laquelle les minerais provenant des deux mines, celle de Chaabet El Hamra et de Kherzet Youcef, sont traités ; cette laverie fut construite dans le but de valoriser les minerais plombo-zincifère par flottation.



FIGURE 5.6 – Image satellitaire montrant les installations du complexe minier de Kherzet-Youcef

Depuis son démarrage, la laverie de Kherzet-Youcef a été sujette à plusieurs modifications, car son fonctionnement dépend des conditions technico-économiques, du type du concentré ainsi que différentes propriétés du minerai. Suite aux inondations ayant survenues en 1990, la laverie s'est orientée vers le traitement du minerai plombo-zincifère de la mine de Chaabet El Hamra.

### 5.9.1 Les différentes installations de la laverie [6]

La laverie du complexe minier de Kherzet-Youcef comprend plusieurs installations que nous énumérerons ci-dessous :

- Matériels utilisés pour la préparation mécanique comprenant des concasseurs et des broyeurs utilisés pour la réduction de la dimension du tout venant.
- Matériels utilisés pour la flottation du minerai plombo-zincifère.
- Des zones de stockage des minerais abattus ( Tout-Venant) ainsi que des concentrés.
- Des silos pour stocker les minerais ayant subis une préparation mécanique ( concassage et broyage).
- Des épaisseurs et des installations de séchage du concentré.
- Laboratoire d'analyses chimiques ainsi que des ateliers pour préparer les réactifs de flottation.
- Ateliers de réparations et de maintenance des équipements utilisés dans le complexe minier

- Magasins
- Un parc de stockage des résidus de traitement.

### 5.9.2 Traitement :

La laverie du complexe de Kherzet-Youcef a pour objectif le traitement du minerai zincifère pour obtenir un concentré contenant du zinc.

Plusieurs méthodes de traitement doivent avoir lieu afin de valoriser ce minerai, et qui sont :

#### Préparation mécanique du minerai

La préparation mécanique du minerai est une étape très importante afin de le valoriser. Pour ce faire, on procède au concassage et au broyage du minerai afin de le ramener à des dimensions permettant de séparer les particules renfermant le minerai utile de la gangue. Dans le complexe minier de Kherzet-Youcef, on alimente un concasseur à mâchoire, dont la capacité de production est de 400 tonnes par le minerai tout-venant ayant des dimensions entre 80 et 350mm pour obtenir des particules ayant des dimensions inférieures à 80mm, et ceci après avoir effectué un pré-criblage en laissant passer les particules ayant des dimensions inférieures à 80mm, dans le but d'avoir un rendement optimal du concassage.

En ayant finalisé le concassage primaire, on effectue ensuite un criblage à 15mm, et la fraction ayant une dimension entre 15 et 80mm sera sujette à un concassage secondaire en utilisant un concasseur giratoire.

À la fin de cette étape, on aura des particules concassées ayant des dimensions inférieures à 15mm. Celles-ci subiront une préparation mécanique par voie humide, i.e : broyage et classification.[6]

#### Broyage et classification :

La classe granulométrique obtenue à la fin de la préparation mécanique à sec sera lavée ensuite criblée et à la fin subira des opérations de broyage et de classifications. Le broyage de la fraction 0 -15 mm se fait dans un broyeur à boulets qui fonctionne en circuit fermé avec un classificateur à spirale.

Un second broyeur à boulets est placé en série avec le premier afin de diminuer la dimension des sables du classificateurs.(Merchichi 2014)

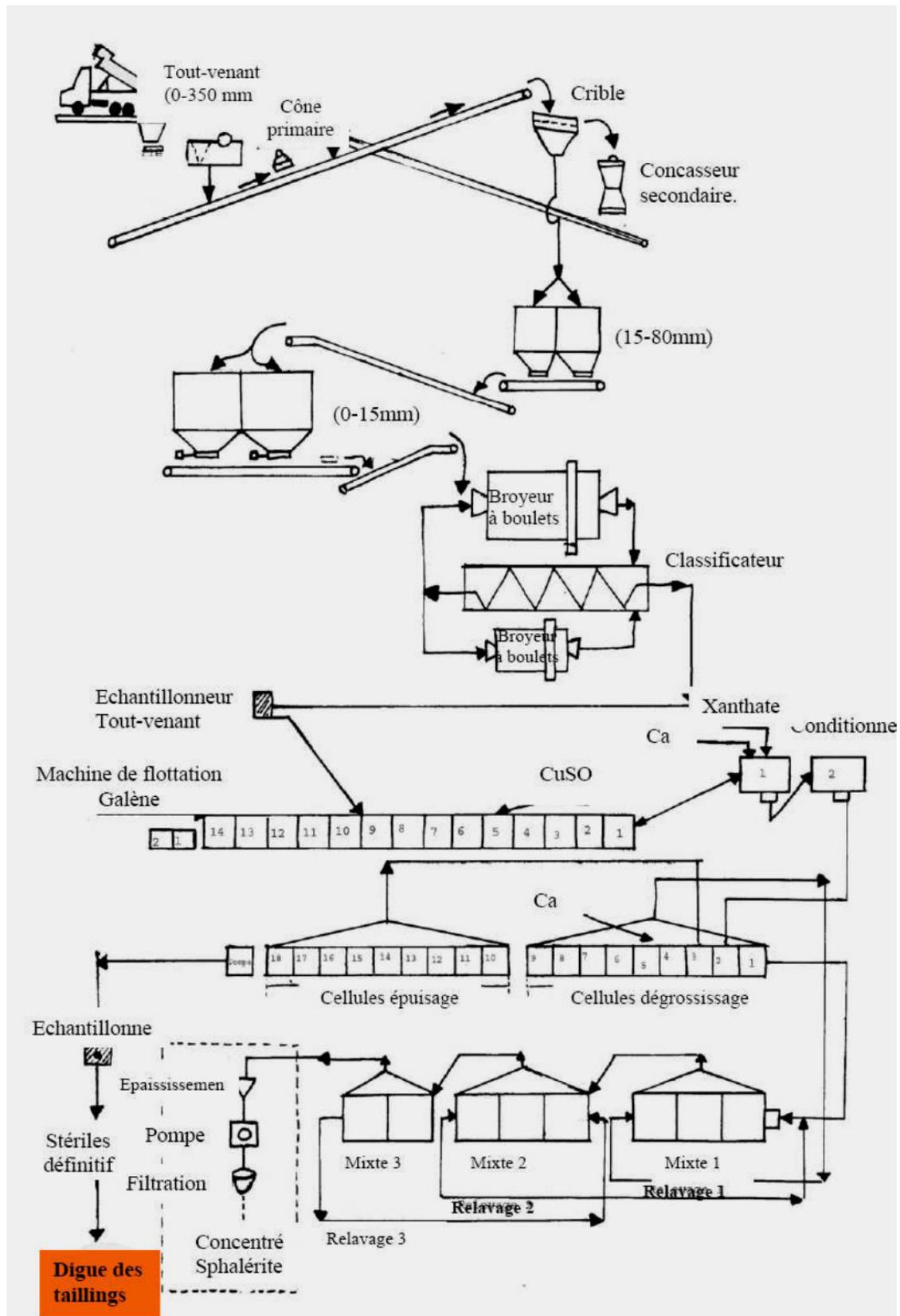


FIGURE 5.7 – Schéma technologique de traitement du minerai zincifère du complexe de Kherzet Youcef [6]

Les particules obtenues à la fin du broyage et de la classification seront dirigées vers les cellules de flottations afin d'extraire le minerai utile.

### **Flottation :**

Après la préparation mécanique, le minerai est traité par flottation au terme de laquelle des concentrés sont obtenus et à partir desquels on procède à l'extraction des minéraux économiques. Il s'agit d'un circuit de flottation simple, à un seul produit (Zinc), qui est constitué des étapes suivantes :

- Flottation principale ou dégrossissage de Zinc ;
- Flottation de contrôle ou épuisement du Zinc ;
- Trois stades de flottation de relavage du concentré de Zinc.

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

Les mousses du 3ème relavage, qui constituent le concentré de Zinc, sont décantées dans un épaisseur avant de passer à travers des filtres rotatifs à vide pour être stockées sous forme de produit marchand à l'air libre.

Le concentré obtenu a une teneur de 53% en Zn avec un taux de récupération du métal [6].

**Troisième partie**  
**Essais de Laboratoire**

# Chapitre 6

## Méthodologie et Protocole Analytique

### 6.1 Description des échantillons à analyser

### 6.2 Echantillons de Boucaïd

Au laboratoire, nous avons constaté qu'il existe deux différents type de rejet à l'œil nu, qu'on a supposé que ce sont :

- Le 1<sup>er</sup> est de type Plomb-Zinc
- Le 2<sup>e</sup> est de type Plomb-Barytine

Le 1<sup>er</sup> type d'échantillon est de couleur orange, non friable. Donc, on l'a fait passé dans un concasseur à mâchoires afin de réduire la taille des blocs du minerai et de le préparer à l'échantillonnage, tandis que le deuxième qui est de couleur noirâtre allant beaucoup plus vers le gris est d'une dureté faible, i.e friable. Pour ce dernier type, nous avons procédé à la réduction de la taille des blocs manuellement.



FIGURE 6.1 – Echantillon n° 1 de Boucaïd

### 6.3 Echantillons de Kherzet Youcef

L'échantillon contenant les rejets de la digue de Kherzet-Youcef (cette digue contient les résidus plombo-zincifères des deux mines qui sont proches l'une de l'autre, à savoir : Chaâbet El Hamra et Kherzet-Youcef). Les échantillons sur lesquels nous avons travaillé ont été ramené au laboratoire par un de nos enseignants.

### 6.4 Échantillonnage

L'échantillonnage est une étape très importante dans toute étude géologique et minière. Celui-ci permet de réduire la fraction à étudier à partir d'un lot primaire en le divisant en plusieurs sous-échantillons selon divers processus, que ce soit manuellement ou bien mécaniquement.

l'échantillonnage donc assure la représentativité de notre minerai prélevé.

Concernant le plan d'échantillonnage des rejets prélevés à partir de la mine de Boucaïd, nous avons divisé la zone d'étude en 4 secteurs dont les coordonnées géographiques sont citées ci-après :

Point	Latitude	Longitude
1 <sup>er</sup> Point	35°53' 88.6" N	1°36' 53.2" E
2 <sup>e</sup> Point	35°53' 37.4" N	1°36' 53.4" E
3 <sup>e</sup> Point	35°53' 28.6" N	1°36' 53.4" E
4 <sup>e</sup> Point	35°53' 28.5" N	1°36' 53.4" E

TABLE 6.1 – Coordonnées géographiques des points de prélèvements

Dans chacune des zones nous avons prélevé des échantillons dont la profondeur peut aller jusqu'à 70 cm.

### 6.5 Préparation de l'échantillon

Après avoir ramené nos échantillons au laboratoire, nous les avons laissé sécher à l'air libre pendant 3 jours. En sachant que les échantillons prélevés sont de deux différents types comme cité ci-dessus nous les avons subdivisé en deux types d'échantillons, dans le but de leurs faire subir une préparation mécanique, i.e concassage.

### 6.5.1 Concassage et broyage

Le procédé de concassage et de broyage consiste à la fragmentation des roches à l'aide de forces mécaniques extérieures dans le but d'obtenir une composition granulométrique voulue et aussi afin de libérer les particules fines composant le minerai [2].

Dans notre cas, on passe le premier échantillon au concasseur n° 1 seulement, tandis que le deuxième sera broyé manuellement.

**Remarque :** Le minerai de Kherzet-Youcef se trouvait déjà au niveau du laboratoire tout en ayant été séché préalablement

### 6.5.2 Homogénéisation

Après avoir réduit la taille des blocs du minerai, on a procédé à l'homogénéisation du minerai, et cela en le mettant sur des grands sacs ayant une forme parallélépipédique très mince tout en la brassant pendant une durée déterminée (20 minutes environ).

### 6.5.3 Quartage Manuel

Après avoir homogénéisé notre minerai, on passe au quartage manuel. Ce procédé consiste à partager le minerai homogénéisé en quatre quarts ayant la même proportion, dont les deux quarts opposés seront ceux qui formeront notre échantillon. Dans notre cas nous avons effectué le quartage quatre fois, pour le 1<sup>er</sup> échantillon afin d'obtenir un échantillon ayant une masse avoisinant 2.5 kg et trois fois pour le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> échantillon pour avoir aussi une masse proche de la précédente.



FIGURE 6.2 – Homogénéisation de l'échantillon de Boucaïd et sa préparation au quartage



FIGURE 6.3 – Quartage de l'échantillon de Boucaïd

#### 6.5.4 Diviseur rotatif

Le diviseur rotatif est un appareil qui permet de diviser une certaine quantité d'un minéral\échantillon en plusieurs parties représentatives (8 échantillons).

D'abord, on dépose le minerai sur une goulotte d'alimentation, en la réglant sur une vitesse voulue permettant le transport du minerai vers la couronne dont la vitesse de rotation est aussi réglable, l'appareil permet de répartir l'échantillon en huit récipients.

Ceci nous permettra d'obtenir, à la fin de l'opération, des échantillons homogènes et représentatifs utilisés pour les différentes étapes de caractérisation, d'analyse et de valorisation que nous décrirons par la suite.



FIGURE 6.4 – Diviseur rotatif

## 6.6 Caractérisation Physique

Cette étape a pour objet la détermination des différents paramètres physiques, entre autres : le pourcentage en matière organique, le taux d'humidité, le poids volumique apparent et le poids volumique des particules solides caractérisant notre minerai, et cela en effectuant différents essais qui sont :

### 6.6.1 Méthode de Perte au Feu (PAF)

La méthode de la perte au feu a pour objectif la détermination de la quantité de la matière organique se trouvant dans notre échantillon, dont on va décrire le processus.

#### Processus de la PAF :[1]

- On prélève une petite quantité de notre échantillon concassé ( 20g pour notre essai) et on le fait sécher dans un four pour une durée de 16 heures minimum ( 20h dans notre cas) à 105°C
- après le séchage, on nettoie les creusets en les chauffant au rouge, puis on les pose dans un dessiccateur pendant 10 minutes pour qu'ils refroidissent.
- On pèse le creuset vide en notant son poids. Ensuite on y ajoute 10g de notre échantillon séché et on note le poids final.
- Mettre encore notre creuset dans un four à moufle afin de le calciner totalement à 375°C pour une durée de 16 heures.
- Retirer notre creuset et le mettre dans un dessiccateur afin qu'il refroidisse et peser le creuset contenant les cendres.

On calcule le taux de la matière organique à partir d'une de ces deux équation :

$$\%MO = \frac{\text{poids du sol sec}(g) - \text{poids du sol incinéré}(g)}{\text{poids du sol sec}(g)} * 100$$

$$\%MO = \frac{((P_1 - P_0) - (P_2 - P_0))}{(P_1 - P_0)} * 100$$

tel que :

- MO : matière organique
- $P_0$  : poids du creuset vide
- $P_1$  : poids final
- $P_2$  : poids du creuset contenant les cendres

Echantillon	$P_0$	$P_1$	$P_2$	%MO
Ech 1	39.04	49.04	48.81	2.3
Ech 2	39.37	49.38	48.77	6.1
Kherzet-Youcef	36.83	46.84	46.75	0.19

TABLE 6.2 – Tableau regroupant les résultats des essais de la perte au feu



FIGURE 6.5 – creuset contenant le minerai avant (à gauche)\après (à droite) calcination à 375°C

### 6.6.2 Détermination de la teneur en eau pondérale $w$ (norme NF P 94-050)

On détermine la teneur en eau pondérale par l'intermédiaire de deux pesées selon la norme NF P 94-050. On effectue une première pesée de notre échantillon, à l'état initial, dans le but de déterminer la masse " $m$ " de notre échantillon dans un état humide. Ensuite on l'insère dans un bécher et on le passe à l'étuve à une température de 105°C pour une durée de 24 heures, ceci a pour objectif d'éliminer l'eau qui s'y trouve qu'elle soit libre ou bien capillaire. Après le passage à l'étuve, on effectue une deuxième pesée qui constitue la masse sèche de notre échantillon  $m_s$ .

$$w = \frac{m_s}{m_w} * 100 = \frac{W_w}{W_s} * 100 \text{ avec } m_w = m - m_s = m_E - m_{Ecalciné}$$

Echantillon	$m_E(g)$	$m_B(g)$	$m_{Ecal}(g)$	$m_s(g)$	$m_w(g)$	$w(\%)$
<i>Ech1<sub>1</sub></i>	75	49	72	23	2.0	8.7
<i>Ech1<sub>2</sub></i>	69	49	68	19	1.0	5.2
<i>Ech1<sub>3</sub></i>	68	48	67	19	1.0	5.2

TABLE 6.3 – Tableau regroupant les résultats des essais de détermination de la teneur en eau dans l'échantillon 1 de Boucaïd

Echantillon	$m_E(g)$	$m_B(g)$	$m_{Ecal}(g)$	$m_s(g)$	$m_w(g)$	$w(\%)$
<i>Ech2<sub>1</sub></i>	70	49	69.3	20.3	0.7	3.45
<i>Ech2<sub>2</sub></i>	69	49	68.7	19.7	0.3	1.52
<i>Ech2<sub>3</sub></i>	68	48	67.9	19.9	0.1	0.5

TABLE 6.4 – Tableau regroupant les résultats des essais de détermination de la teneur en eau dans l'échantillon 2 de Boucaïd

Concernant les résultats obtenus pour l'échantillon de Kherzet-Youcef, nous avons pris ceux de l'autre binôme ayant utilisé le même minerai pour leurs essais, à savoir M. Bourara Anes et Mlle. Horri Hadjer, qui ont trouvé une teneur en eau de 0.94%. En sachant que :

- $m_E$  : masse de l'échantillon+ bécher
- $m_B$  : masse du bécher
- $m_{Ecal}$  : masse de l'échantillon calciné + bécher
- $m_s$  : masse du solide calciné
- $m_w$  : masse de l'eau évaporée
- $w$  : la teneur en eau dans l'échantillon



FIGURE 6.6 – Images illustrant les résultats des essais de détermination de la teneur en eau de l'échantillon n° 2 de Boucaïd

### 6.6.3 Détermination du poids volumique apparent

Pour déterminer le poids volumique apparent, on utilise la méthode du moule qui consiste à prendre un échantillon préparé selon un processus bien défini, on remplit le moule, un bécher, jusqu'à son débordement ensuite on l'arase à l'aide d'une règle.

Echantillon	$m_B$	$m_{E+B}$	$m_E$	Volume	$\rho$
Ech 1	279	2174	1895	1200	1.58
Ech 2	279	2167	1888	1200	1.57
Ech Kherzet-Youcef	279	1985	1706	1200	1.42

TABLE 6.5 – Tableau rassemblant les résultats obtenus pour la masse volumique apparente des échantillons de Boucaïd

### 6.6.4 Détermination du poids volumique des particules solides

Le problème posé dans cette partie, c'est la mesure du volume des grains solides, constituant l'échantillon de sol. Afin de régler ce problème, on effectue cette mesure à l'aide du pycnomètre.

Le pycnomètre est un instrument utilisé dans le laboratoire dans le but de déterminer, à une température donnée d'un produit liquide, pâteux, ou bien solide le poids volumique des grains solides. Le pycnomètre qu'on utilise dans notre manipulation est un pycnomètre à verre s'assemblant précisément par un joint en verre rodé, celui-ci est constitué de deux parties :

- Une fiole
- un bouchon percé par un tube capillaire contenant un petit entonnoir

Lorsque l'on ajuste le bouchon sur la fiole, le trop-plein de liquide s'échappe par l'extrémité supérieure du tube et, dans la mesure où ce tube est très fin, le volume de liquide est déterminé avec une grande précision.

Pour procéder à la manipulation, on pèse d'abord notre sol séché ( $W_s$ ) ensuite on le met dans le récipient ( la fiole ) contenant de l'eau distillée, après avoir éliminé les bulles d'air, on calcule le volume d'eau déplacé par le sol selon la loi suivante :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{W_1 + W_s - W_2} * \gamma_w$$

Echantillon	$W_1(g)$	$W_2(g)$	$W_s(g)$	$\gamma_s(g/ml)$
Ech 1	82.25	87.33	6.61	4.32
Ech 2	51.5	55	5.04	3.3
Ech Kherzet-Youcef	50.93	54.29	50.2	3.027

TABLE 6.6 – Tableau montrant les résultats obtenus pour le poids volumiques des particules solides

## 6.7 Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique est une méthode dont le principe est la détermination de la distribution quantitative des particules du sol en les répartissant sur des classes granulométriques afin de connaître le comportement de la roche lors du concassage qui dépend principalement de la constitution des grains et de leur dureté, ainsi que de fournir des fractions granulométriques qui serviront aux prochaines étapes de caractérisation et de valorisation [6].

La taille des particule influe sur de nombreux paramètres du sol, le nombre et la grandeur des diamètres seront pris selon l'objectif qu'on veut poursuivre lors de notre travail ainsi que de l'importance de l'échantillon se trouvant à notre disposition [6].

### 6.7.1 Principe de l'essai

On effectue une analyse granulométrique selon la norme européenne EN 933-1. Cette analyse consiste à établir un classement des différents grains de l'échantillon à l'aide de plusieurs tamis selon leurs dimensions dont les mailles sont décroissantes du haut vers le bas. On place notre échantillon dans la partie supérieure des tamis ( le tamis ayant la plus grande dimension ) et on lance le processus de l'analyse granulométrique qui nous permettra d'obtenir un classement des grains par vibration de la colonne des tamis.

De plus, l'analyse granulométrique permet de déterminer précisément la composition d'un matériau afin d'en déduire ses caractéristiques mécaniques, et ainsi nous permet de définir le domaine d'utilisation de ce type de matériau.

Cette analyse se fait en laboratoire.

### 6.7.2 Mode Opérateur

Afin de procéder à l'analyse granulométrique de chacun de nos échantillons, il faudrait d'abord déterminer toutes les caractéristiques physiques de chaque échantillon ( déterminées précédemment ). Pour procéder au tamisage vibratoire dans notre laboratoire, il faudrait bien s'assurer que notre échantillon est sec.

Les appareils à utiliser dans le but d'effectuer cette analyse sont :

- Un plateau ;
- Une balance électronique ;
- Une série de tamis de la norme AFNOR en inox ayant les diamètres qui seront cités dans les tableaux suivants ( 6.6 , 6.7 , 6.8 ) ainsi que d'un système de fixation ;
- Une tamiseuse ;
- Des bacs, des brosses et des sacs



FIGURE 6.7 – Tamiseuse Retch du laboratoire du génie minier

L'échantillon, qui doit impérativement être sec, sera versé dans le tamis se trouvant en haut de la colonne, il correspond au tamis dont la maille a la plus grande ouverture. Dans la série utilisée, les ouvertures ont une relation constante l'une avec l'autre, il s'agit d'une échelle métrique, une racine dixième de 10 ( $\frac{10}{\sqrt{10}} = 1,259$ ), chaque dimension de maille d'un tamis correspond donc à la dimension du précédent multipliée par 1.259, ce qui permet un dimensionnement étroit des particules. (source. Mineral processing)

Le nombre maximal de tamis pouvant être utilisé dans une analyse granulométrique est de 6, afin que l'analyse ait un rendement optimal. La durée d'un essai de l'analyse granulométrique est en fonction du nombre de tamis utilisé, à raison de 3 minutes par tamis. D'après les tableaux 6.6 , 6.7 , 6.8 , le nombre de tamis utilisé est de 12. donc pour chaque échantillon on subdivise l'analyse en deux essais ( nombre maximal de tamis inclus dans la tamiseuse est de 6 ) d'une durée de 18 minutes chacun. La vitesse de rotation est de 2.9 m/s.

Après avoir effectué l'analyse granulométrique, on met le produit de chaque tamis dans un sac et on les pèse afin de réaliser une courbe granulométrique et déterminer les classes à utiliser lors de la flottation.

# Chapitre 7

## Analyses de Flottation

Après avoir procédé à la préparation mécanique dans le but de libérer les particules minérales, et avoir établi les caractéristiques physiques de nos échantillons. On a procédé à l'analyse granulométrique dans le but de déterminer les différentes classes à faire flotter pour chaque échantillon.

Au début, nous avons effectué la flottation de chaque minéral sans prendre en considération les classes granulométriques. Ceci fut réalisé dans le but de déterminer la concentration optimale à utiliser pour le collecteur qui est l'un des deux paramètres qu'on a fait varier dans le but d'optimiser nos analyses.

Les essais de flottation sont réalisés dans le laboratoire du génie minier à l'aide d'une cellule de flottation de modèle Denver ayant une capacité de 1500g.



FIGURE 7.1 – Cellule de flottation DENVER utilisée lors de nos essais

## 7.1 Paramètre n° 1 : Le collecteur

Les paramètres de flottation utilisés sont ceux cités dans notre partie bibliographique ( chapitre 1 ) qu'on dénommera pour chacun de nos essais.

### 7.1.1 Echantillon N° 1 de Boucaïd

Dans le but de faire flotter les rejets de l'échantillon n° 1 de Boucaïd, on a encore refait un échantillonnage, d'autres témoins ayant été stockés préalablement dans ce but précis. Concernant cet échantillon, les essais de flottation seront ceux de la flottation sélective du plomb ainsi que ceux du zinc, dans le but d'obtenir des concentrés de chacun de ces deux types de minéraux cités précédemment selon le schéma suivant :

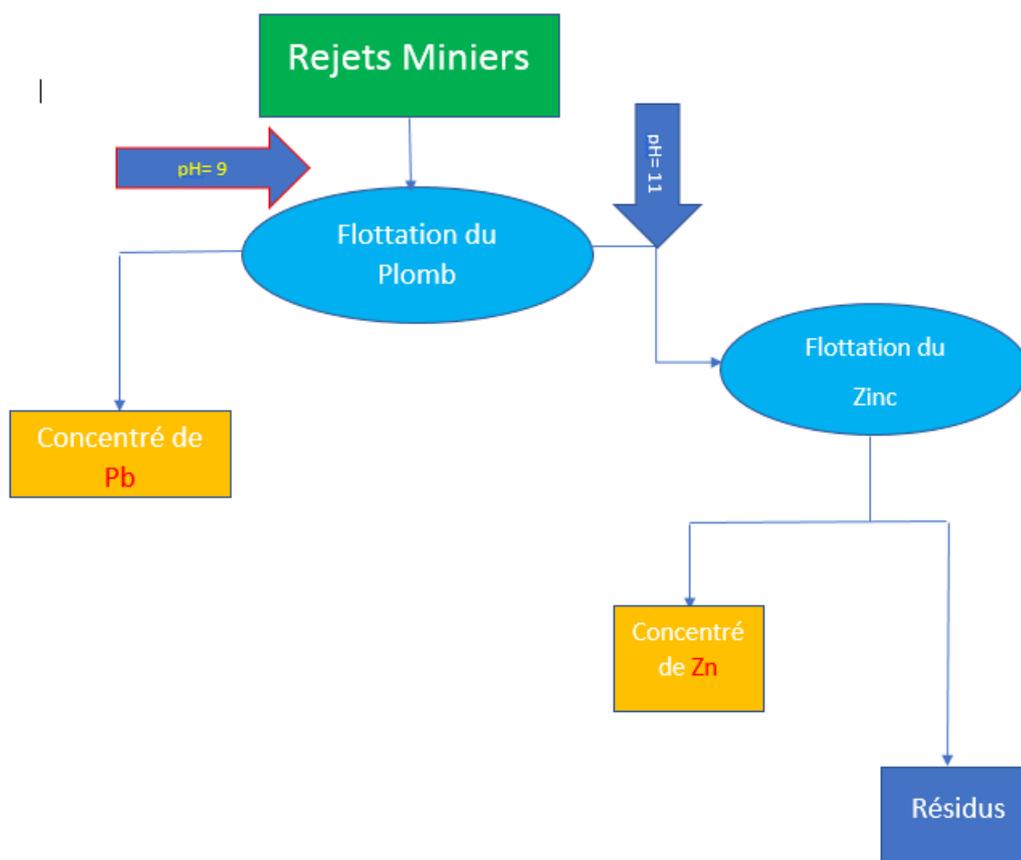


FIGURE 7.2 – Schéma de Flottation de l'échantillon n° 1 de Boucaïd et Kherzet-Youcef

Afin de réaliser ce processus, et comme il est cité dans la partie bibliographique ; des réactifs chimiques spécifiques seront utilisés dans ce but afin d'obtenir ces concentrés.

### Réactifs de Flottation du Plomb

Afin de faire flotter le plomb dans cet échantillon, on suppose que ce minerai (en se basant sur la couleur du minerai et aussi des points d'où il fut retiré dans la digue de traitement) est pauvre en baryte. On utilise le protocole analytique permettant de flotter le plomb en surface et de laisser les autres types de minéraux à la base de la cellule de flottation, dont le zinc est majoritaire. Les réactifs de flottation utilisés pour les essais de flottation du plomb seront décrits dans le Tableau 7.1. Dans cet essai on fixe tous les paramètres de flottation utilisés tels que la concentration de l'activant et du déprimant et on ne fait varier que la concentration du collecteur, dans un milieu ayant un pH=9 en respectant un rapport solide-liquide de 30%

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{eq}$ (ml)	T.A (min)
Carbonate de Sodium	Régulateur de pH	/	/	5
Cyanure de Potassium ( <i>KCN</i> )	Déprimant	40	0.9	3
Sulfate De Zinc ( <i>ZnSO<sub>4</sub></i> )	Activant	60	1.35	3
Xanthate essai n° 1	Collecteur	100	2.25	3
essai n° 2		200	4.5	3
essai n° 3		300	6.75	3
essai n° 4		400	9	3
Huile de Pin	moussant	/	Une goutte	1
pH=9				
rapport solide-liquide = 30%				

TABLE 7.1 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 1

- T.A : le temps d'agitation

Après avoir rajouté ces réactifs dans l'ordre établi dans le tableau, tout en respectant les concentrations calculées, et les temps d'agitation minimum pour chacune d'elle. On ouvre la vanne pour injecter de l'air dans la cellule, et on commence à racler le produit de mousse pendant une période de 5 minutes. Enfin, on laisse décanter le produit obtenu qui constitue notre concentré afin de le filtrer ( enlever l'eau ).

On répète quatre fois ces essais en faisant varier la valeur du collecteur de 100 à 400 g/tonne avec un pas de 100 g/tonne.

### Réactifs de Flottation du Zinc

On utilise un protocole similaire au précédent afin de faire flotter le zinc dans cet échantillon, et ceci après avoir retiré déjà un concentré de plomb en changeant juste les réactifs de flottation (Tableau 7.2) et en augmentant la valeur du pH à 11

Réactif	Type	Concentration (g\t)	$V_{\text{éq}}$	T.A (min)
La Chaux	Régulateur de pH	/	/	5
Silicates de Sodium ( $Na_2SiO_3$ )	Déprimant	50	1.125	3
Sulfates de Cuivre ( $CuSO_4$ )	Activant	300	6.75	3
Xanthate essai n° 1	Collecteur	100	2.25	3
essai n° 2		200	4.5	3
essai n° 3		300	6.75	3
essai n° 4		400	9	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=11				
rapport solide-liquide = 30%				

TABLE 7.2 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du zinc pour l'échantillon n° 1

Après avoir réalisé les conditions citées dans le tableau 7.2, on insuffle de l'air dans la cellule et on commence à racler le produit moussant riche en concentré de zinc pendant 5 minutes.

### 7.1.2 Echantillon n° 2 de Boucaïd

Comme ce fut le cas avec l'échantillon précédent, on refait un autre échantillonnage du minerai stocké comme témoin afin de le faire flotter. Concernant celui-ci, il sera sujet à des essais de flottation sélective dans le but de retirer des concentrés de plomb et de baryte.

Afin d'obtenir ces deux concentrés, des réactifs seront ajoutés à la pulpe en respectant certaines conditions pour effectuer ce processus.

**Réactifs relatifs au Plomb**

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{ég}$	T.A (min)
Carbonate de Sodium ( $NaCO_3$ )	Régulateur de pH	/	/	5
Amidon	Déprimant	100		3
Silicates de Sodium ( $Na_2SiO_3$ )	Déprimant	100		3
Xanthate	Collecteur			
Essai n° 1		100	2.25	3
Essai n° 2		200	4.5	3
Essai n° 3		300	6.75	3
Essai n° 4		400	9	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=9				
rapport solide-liquide = 30%				

TABLE 7.3 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 2

**Réactifs relatifs à la Baryte**

Après avoir fait flotter le Plomb, on réalise la flottation sélective de la Baryte à l'aide des agents chimiques suivants :

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{ég}$	T.A (min)
Carbonate de Sodium	Régulateur de pH	/	/	5
Sulfates de Sodium	Déprimant	200		3
Silicates de Sodium ( $Na_2SiO_3$ )	Déprimant	50		3
Acide Oléique	Collecteur			
Essai n° 1		100	0.9	3
Essai n° 2		200	1.8	3
Essai n° 3		300	2.7	3
Essai n° 4		400	3.6	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=10				
rapport solide-liquide = 30%				

TABLE 7.4 – Tableau regroupant les réactifs de flottation de la baryte pour l'échantillon n° 2

En suivant les étapes décrites dans le tableau 7.4, on commence à racler après en même temps qu'on y ajoute de l'air à la pulpe pendant 5 minutes pour chaque essai.

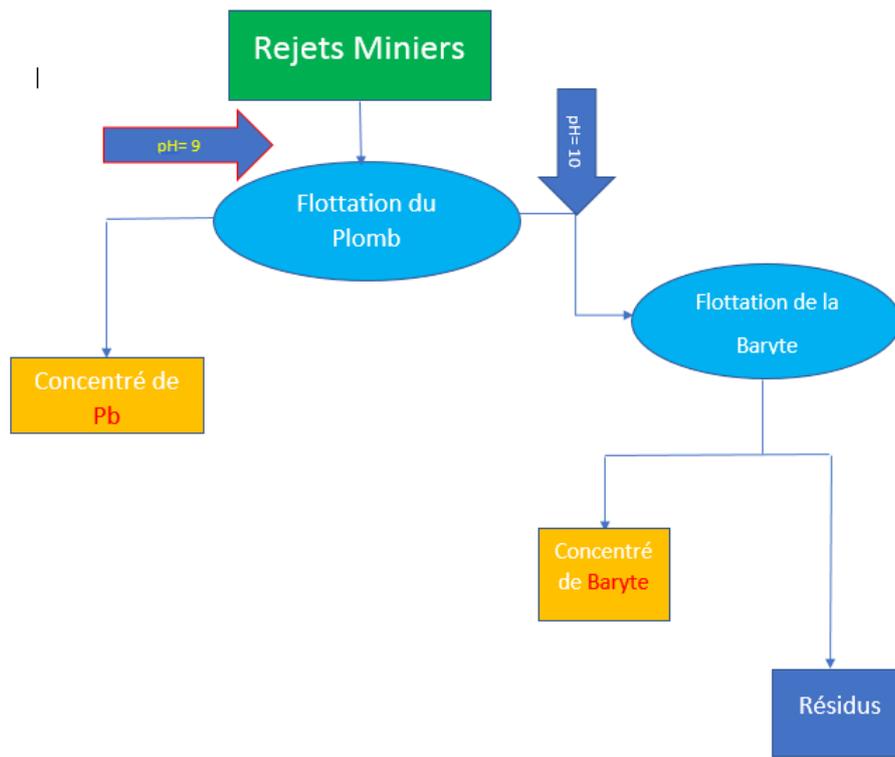


FIGURE 7.3 – Schéma relatif à la flottation de l'échantillon n° 2 de Boucaïd

### 7.1.3 Echantillon de Kherzet Youcef

Cet échantillon est aussi un rejet minier de nature plombo-zincifère ; afin de le valoriser par flottation, les réactifs à utiliser ainsi que les conditions auxquelles il devrait être soumis sont les mêmes que ceux de l'échantillon n° 1 de Boucaïd qui sont cités ci-dessus.

## 7.2 Décantation et Filtration

Pour chaque échantillon, 4 essais de flottation furent réalisés dans le but d'extraire deux concentrés de chacun d'entre eux, qu'on les cite :

- Un concentré de Plomb et un autre de Zinc pour l'échantillon n° 1 de Boucaïd et celui de Kherzet-Youcef
- Un concentré de Plomb et de Baryte pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd

Après avoir retiré les concentrés et les avoir stockés dans des bacs. On met ces derniers dans des béchers dans le but de les laisser décanter ( 30 à 45 minutes environ ) afin qu'ils soient prêts à la filtration.

La filtration est un procédé permettant de séparer les constituants d'un mélange, à l'aide d'un filtre, possédant une phase continue (liquide ou gazeuse) et une phase solide. Le filtre retient les particules solides dont les dimensions sont supérieures à celles des pores du filtre.



FIGURE 7.4 – Décantation et machine de filtration

Après filtration du concentré, on place les béchers contenant la solution remplie de particules solides dans l'étuve ainsi que le filtre qui lui correspond dans le but de les sécher et les peser afin de déterminer la concentration optimale du collecteur à utiliser lors de nos essais de flottation.

### 7.3 Flottation en fonction des classes granulométriques

On sait que la préparation mécanique d'un minerai est importante car elle facilite la libération des particules minérales et augmente les surfaces spécifiques de contact du tout-venant.

Le choix des classes granulométriques doit se faire en se basant sur les résultats des essais granulo-chimiques afin de déterminer les classes contenant le plus grand pourcentage de minerai libéré. Pour faute de moyens, ces essais n'ont pas eu lieu, et donc afin de déterminer ces classes granulométriques, on s'est basé sur :

- D'abord, les résultats de l'analyse granulométrique, on tend à choisir les classes contenant le plus grand pourcentage de refus ;
- Ensuite, après avoir déterminé ces classes, il est impératif de ne pas oublier que la flottation nécessite des particules minérales dont les dimensions devraient être réduites afin qu'elles puissent être adsorbées sur la surface du collecteur ;
- Enfin, il ne faut surtout pas que les classes granulométriques soient très réduites, afin de ne pas avoir des particules sur-broyées conduisant au recouvrement des particules

minérales par des ultra-fines et par conséquent diminution du rendement des essais de flottation.

Ainsi, on a réussi à déterminer les classes granulométriques approximativement afin qu'elles soient sujettes à des essais de flottation, et ceci dans le but de déterminer la classe granulométrique optimale ( celle qui contient le plus grand pourcentage de minerai utile ).

On utilise les mêmes paramètres précédents pour ces essais de flottation tout en fixant la teneur du collecteur à utiliser sur sa teneur optimale.

### 7.3.1 Classes granulométriques choisies

Les classes granulométriques choisies pour effectuer les essais de flottation sont les suivantes :

- Pour l'échantillon n° 1 de Boucaïd les classes granulométriques choisies sont : 100 $\mu$ m, 125 $\mu$ m et 160 $\mu$ m ;
- Concernant l'échantillon n° 2 de Boucaïd, on a pris les fractions : 100 $\mu$ m, 160 $\mu$ m, et 250 $\mu$ m ;
- Tandis que les classes granulométriques choisies pour l'échantillon plombo-zincifère de Kherzet-Youcef sont : 80 $\mu$ m, 100 $\mu$ m et 125 $\mu$ m

### 7.3.2 Utilité des essais sur les classes granulométriques

Les essais de flottation spécifiques aux classes granulométriques ont comme objectif la détermination de\des classe(s) granulométrique(s) contenant la plus grande teneur en particules minérales utiles. La distribution de ces particules sera observée à l'aide d'un microscope à réflexion ou un stéréomicroscope qui nous permettra de choisir la classe optimale ; évidemment après avoir réalisé ces essais de flottation



FIGURE 7.5 – Image illustrant un stéréomicroscope

## 7.4 Paramètre n° 2 : Rapport Solide-Liquide

L'un des paramètres à prendre en considération et qu'il est impératif de respecter est celui du rapport solide-liquide ; i.e : le rapport entre notre échantillon et l'eau dans laquelle il sera mis. Dans les essais précédents, le rapport solide-liquide utilisé était de 30%, on utilisait 450g de minerai dans une cellule de flottation pouvant contenir une masse de 1.5L , i.e : 1500g d'eau. Donc pour récapituler on utilisait 450 de minerai et 1050g d'eau.

Dans les essais suivants, nous allons varier ce rapport juste une seule fois, tout en faisant les essais de flottation sur les classes granulométriques optimales ( celles qui sont déterminées dans la partie interprétation ) en l'augmentant jusqu'à 50%, et ceci par faute de temps.

En faisant varier ce paramètre, le volume des réactifs à utiliser changera à coup sur, ces derniers seront représentés dans les tableaux ci-dessous :

### 7.4.1 Echantillon n° 1 de Boucaïd

#### Réactifs de flottation relatif au plomb

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{\text{ég}}$ (ml)	T.A (min)
Carbonate de Sodium	Régulateur de pH	/	/	5
Cyanure de Potassium ( <i>KCN</i> )	Déprimant	40	1.5	3
Sulfate De Zinc ( <i>ZnSO<sub>4</sub></i> )	Activant	60	2.25	3
Xanthate	Collecteur	300	6.75	3
Huile de Pin	moussant	/	Une goutte	1
pH=9				
rapport solide-liquide = 50%				

TABLE 7.5 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 1 pour un rapport liquide-solide = 50%

#### Réactifs de flottation relatifs au zinc

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{\text{ég}}$	T.A (min)
La Chaux	Régulateur de pH	/	/	5
Silicates de Sodium ( <i>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></i> )	Déprimant	50	1.87	3
Sulfates de Cuivre ( <i>CuSO<sub>4</sub></i> )	Activant	300	11.25	3
Xanthate	Collecteur	300	6.75	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=11				
rapport solide-liquide = 50%				

TABLE 7.6 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du zinc pour l'échantillon n° 1 pour un rapport solide-liquide = 50%

### 7.4.2 Echantillon n° 2 de Boucaïd

#### Réactifs de Flottation relatifs au plomb

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{\text{éq}}$	T.A (min)
Carbonate de Sodium ( $NaCO_3$ )	Régulateur de pH	/	/	5
Amidon	Déprimant	100	3.75	3
Silicates de Sodium ( $Na_2SiO_3$ )	Déprimant	100	.375	3
Xanthate	Collecteur	100	3.75	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=9				
rapport solide-liquide = 50%				

TABLE 7.7 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd avec un rapport liquide-solide= 50%

#### Réactifs de Flottation relatifs à la baryte

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{\text{éq}}$	T.A (min)
Carbonate de Sodium	Régulateur de pH	/	/	5
Sulfates de Sodium	Déprimant	200	7.5	3
Silicates de Sodium ( $Na_2SiO_3$ )	Déprimant	50	7.5	3
Acide Oléique	Collecteur	200	7.6	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=10				
rapport solide-liquide = 50%				

TABLE 7.8 – Tableau regroupant les réactifs de flottation de la baryte pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd pour un rapport liquide-solide= 50%

### 7.4.3 Echantillon de Kherzet-Youcef

Vu que la quantité optimale du Xanthate utilisé pour faire flotter le minerai de Kherzet-Youcef n'est pas la même que celle utilisée pour le minerai de Boucaïd n° 1. On aura des changements dans la quantité du xanthate par rapport à celui de Boucaïd n° 1

**Réactifs de flottation relatif au plomb**

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{\text{éq}}$ (ml)	T.A (min)
Carbonate de Sodium	Régulateur de pH	/	/	5
Cyanure de Potassium ( $KCN$ )	Déprimant	40	1.5	3
Sulfate De Zinc ( $ZnSO_4$ )	Activant	60	2.25	3
Xanthate	Collecteur	300	3.75	3
Huile de Pin	moussant	/	Une goutte	1
pH=9				
rapport solide-liquide = 50%				

TABLE 7.9 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du plomb pour l'échantillon de Kherzet-Youcef pour un rapport liquide-solide = 50%

**Réactifs de flottation relatifs au zinc**

Réactif	Type	Concentration (g/t)	$V_{\text{éq}}$	T.A (min)
La Chaux	Régulateur de pH	/	/	5
Silicates de Sodium ( $Na_2SiO_3$ )	Déprimant	50	1.87	3
Sulfates de Cuivre ( $CuSO_4$ )	Activant	300	11.25	3
Xanthate	Collecteur	300	3.75	3
Huile de pin	Moussant	/	Une goutte	1
pH=11				
rapport solide-liquide = 50%				

TABLE 7.10 – Tableau regroupant les réactifs de flottation du zinc pour l'échantillon de Kherzet-Youcef pour un rapport solide-liquide = 50%

## **Quatrième partie**

# **Résultats et Interprétations**

## 7.5 Analyse Granulométrique

### 7.5.1 Résultats de l'Echantillon n° 1

Diamètre( $\mu\text{m}$ )	refus(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisé (%)
2mm	34	34	3.4	96.6
1mm	78	112	11.2	88.8
800 $\mu\text{m}$	30	142	14.2	85.8
630 $\mu\text{m}$	43	185	18.5	81.5
500 $\mu\text{m}$	45	230	23.0	77.0
400 $\mu\text{m}$	61	291	29.1	70.9
350 $\mu\text{m}$	60	351	35.1	64.9
250 $\mu\text{m}$	117	468	46.8	53.2
160 $\mu\text{m}$	195	663	66.3	33.7
125 $\mu\text{m}$	142	805	80.5	19.5
100 $\mu\text{m}$	112	917	91.7	8.3
80 $\mu\text{m}$	68	985	98.5	1.5
<80 $\mu\text{m}$	15	990	99.0	1

TABLE 7.11 – Tableau correspondant aux valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 1

La courbe granulométrique obtenue à partir des résultats d'essais de tamisage est la suivante :

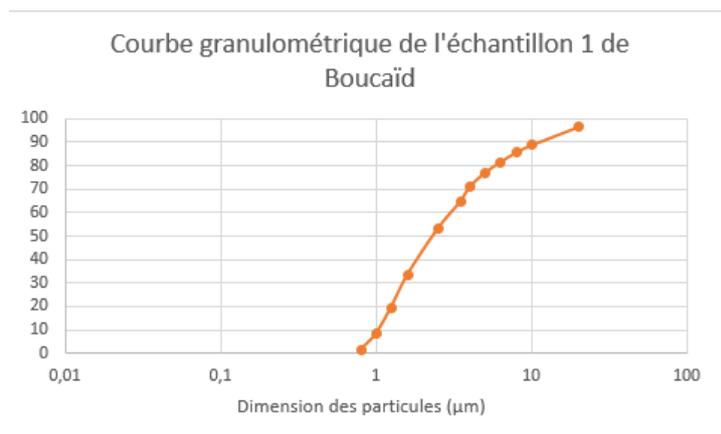


FIGURE 7.6 – Courbe de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 1

## 7.5.2 Résultats de l'Echantillon n° 2

Diamètre( $\mu\text{m}$ )	refus(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisé (%)
2mm	15	15	1.5	98.5
1mm	12	27	2.7	97.5
800 $\mu\text{m}$	6	33	3.3	96.7
630 $\mu\text{m}$	10	43	4.3	95.7
600 $\mu\text{m}$	18	61	6.1	93.9
400 $\mu\text{m}$	40	101	10.1	89.9
315 $\mu\text{m}$	157	258	25.8	74.2
250 $\mu\text{m}$	171	429	42.9	67.1
160 $\mu\text{m}$	388	817	81.7	18.3
125 $\mu\text{m}$	87	904	90.4	9.6
100 $\mu\text{m}$	51	955	95.5	4.5
80 $\mu\text{m}$	23	978	97.8	2.2
<80 $\mu\text{m}$	20	998	99.8	0.2

TABLE 7.12 – Tableau correspondant aux valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 2

À partir de ce tableau, on trace la courbe granulométrique, i.e : les valeurs de la colonne Tamisé en fonction du diamètre des tamis, on obtient cette courbe-ci :

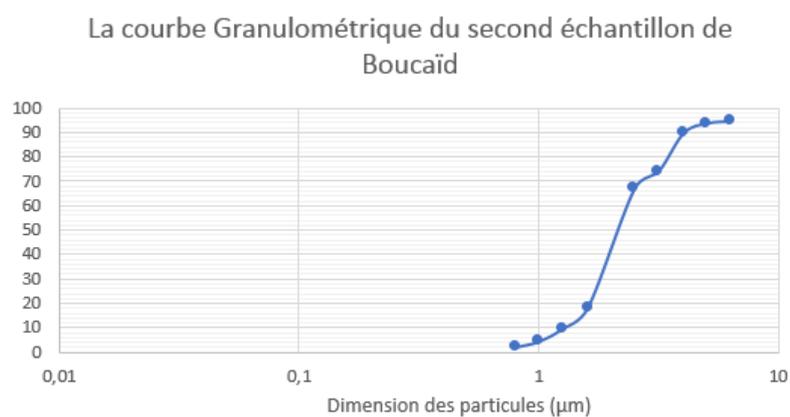


FIGURE 7.7 – Courbe de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 2

### 7.5.3 Résultats de l'Echantillon n° 3 (Kherzet-Youcef)

Diamètre( $\mu\text{m}$ )	refus(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamisat (%)
1mm	44	44	4.4	95.6
800 $\mu\text{m}$	24	68	6.8	93.2
630 $\mu\text{m}$	33	101	10.1	89.9
600 $\mu\text{m}$	36	137	13.7	86.3
400 $\mu\text{m}$	32	169	16.9	85.1
315 $\mu\text{m}$	33	202	20.2	79.8
250 $\mu\text{m}$	52	254	25.4	74.6
160 $\mu\text{m}$	107	361	36.1	63.9
125 $\mu\text{m}$	88	449	44.9	55.1
100 $\mu\text{m}$	123	572	57.2	42.8
80 $\mu\text{m}$	163	735	73.5	26.5
<80 $\mu\text{m}$	258	993	99.3	0.7

TABLE 7.13 – Tableau correspondant aux valeurs obtenues lors de l'analyse granulométrique de l'échantillon n° 2

Comme auparavant, on utilise les valeurs de ce tableau pour tracer la courbe granulométrique correspondante :

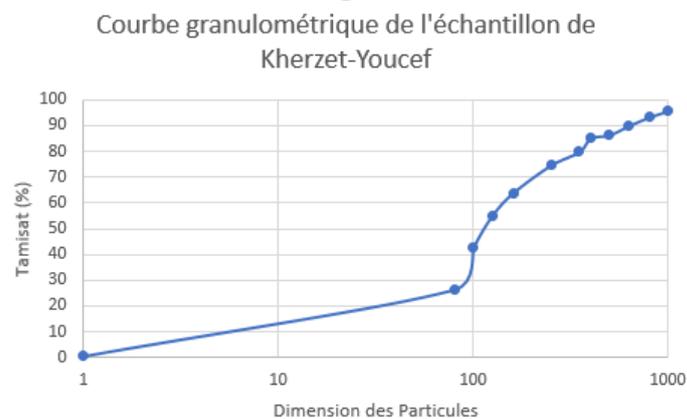


FIGURE 7.8 – Courbe granulométrique de l'échantillon n° 3

### 7.5.4 Calculs des différents coefficients

À l'aide de la courbe granulométrique, on a réussi à obtenir les valeurs correspondantes à  $d_{80}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{10}$  :

Tamiset (%)	Diamètre ech n° 1 (µm)	Diamètre ech n° 2 (µm)	Diametre de Kherzert-Youcef
80	560	344	370
60	300	232	145
30	150	179	85
10	105	125	24.3

TABLE 7.14 – Résultat de la courbe granulométrique

- $d_{80}$  : c'est le diamètre moyen correspondant à 80% des particules passantes par poids.
- $d_{60}$  : c'est le diamètre moyen correspondant à 60% des particules passantes par poids.
- $d_{30}$  : c'est le diamètre moyen correspondant à 30% des particules passantes par poids.
- $d_{10}$  : c'est le diamètre moyen correspondant à 10% des particules passantes par poids.

En utilisant les valeurs du tableau précédant, on calcule les coefficient de courbure et celui d'uniformité.

coefficient	Formule	Ech n° 1	Ech n° 2	Ech n° 3
Coefficient d'Uniformité	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	2.85	1.10	5.96
Coefficient de Courbure	$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} * d_{60}}$	0.74	1.86	2.05

TABLE 7.15 – Tableau regroupant les valeurs de  $C_c$  et  $C_u$ 

tel que :

- éch n° 1 correspond à l'échantillon n° 1 de Boucaïd
- éch n° 2 correspond à l'échantillon n° 2 de Boucaïd
- éch n° 3 correspond à l'échantillon de Kherzet-Youcef

### 7.5.5 Interprétation

La forme de la courbe granulométrique est une représentation de la distribution des dimensions des particules du minerai. Cette distribution peut être uniforme, étalée, ou bien graduée, selon la valeur du coefficient de courbure tel que :

- Si  $C_u$  est supérieur à 10 on dit que la distribution est graduée.
- Si  $C_u$  est compris entre 2 et 10 alors la distribution est étalée.
- Si  $C_u$  est inférieur à 2 on dit que la distribution est uniforme ou bien serrée.

### **Echantillon n° 1**

A partir des calculs établis précédemment et qui sont regroupés dans le tableau 6.9, on a obtenu une valeur de  $C_u$  qui est égale à 2.85 est donc la distribution des grains est étalée et à partir de l'allure de la courbe on peut dire que la distribution des grains est continue.

### **Echantillon n° 2**

Tandis qu'on a obtenu une valeur de  $C_u = 1.10$ , i.e : qu'elle est inférieure à 2, donc la distribution des particules est uniforme.

A partir du coefficient de courbure et en remarquant l'allure de la courbe, on pourrait dire que la distribution des particules est continue.

### **7.5.6 Echantillon n° 3**

On a ici un  $C_u = 5.96$  ce qui veut dire qu'on a une distribution étalée des particules solide et d'après l'allure de la courbe, on a une distribution continue pour les particules ayant des dimensions supérieure à  $80\mu\text{m}$  (celles qui nous intéressent)

### **Remarque**

Pour l'échantillon n° 1 le poids total récupéré est de 990g par rapport à 1000g utilisé lors du début du tamisage, donc on a eu une perte de 10g qui équivaut à 1%, c'est une marge d'erreur acceptable.

Concernant l'échantillon n° 2 ,on a donc pu constater que le poids total récupéré de notre minerai est de 998g par rapport à 1000g utilisé au début de l'expérience , i.e qu'on a eu une perte de 2g de notre échantillon lors de notre analyse équivalente à 0.2% qui est acceptable vu que celle-ci est inférieure à 1%

# Chapitre 8

## Flottation

### 8.1 Variation de la teneur du collecteur

En ayant séché les échantillons résultant de la flottation, on les fait passer à la balance pour déterminer leurs masses respectives afin de choisir la quantité optimale du collecteur à utiliser pour la suite du travail.

Boucaïd-Echantillon n° 1				Boucaïd-Echantillon n°			
Minerai récupéré : Plomb				Minerai récupéré : Zinc			
Essai	$V_{col}(ml)$	$m_{minerai}(g)$	R.P (%)	Essai	$V_{col}(ml)$	$m_{minerai}(g)$	R.P (%)
1	100	50	11.11	1	100	83	18.44
2	200	50	11.11	2	200	100	22.22
3	300	13	2.89	3	300	30	6.67
4	400	23	5.11	4	400	70	15.56

TABLE 8.1 – Résultats de flottation de l'échantillon n° 1 de Boucaïd

Boucaïd-Echantillon n° 2				Boucaïd-Echantillon n° 2			
Minerai récupéré : Plomb				Minerai récupéré : Baryte			
Essai	$V_{col}(ml)$	$m_{minerai}(g)$	R.P (%)	Essai	$V_{col}(ml)$	$m_{minerai}(g)$	R.P (%)
1	100	0	0	1	100	150	27
2	200	0	0	2	200	44	10
3	300	0	0	3	300	122	27.11
4	400	0	0	4	400	145	32.66

TABLE 8.2 – Résultats de Flottation de l'échantillon n° 2 de Boucaïd

Kherzet-Youcef				Kherzet-Youcef			
Minerai récupéré : Plomb				Minerai récupéré : Zinc			
Essai	$V_{col}(ml)$	$m_{minerai}(g)$	R.P (%)	Essai	$V_{col}(ml)$	$m_{minerai}(g)$	R.P (%)
1	100	55	12.22	1	100	59	13.33
2	200	75	16.67	2	200	108	22.44
3	300	85	18.89	3	300	106	22.67
4	400	36	7.78	4	400	134	8

TABLE 8.3 – Résultats de Flottation de l'échantillon de Kherzet-Youcef

À partir des résultats des essais de flottation, on établit des courbes du rendement pondéral de chacun de ces échantillons en fonction de la concentration du collecteur dans le but de déterminer la concentration\teneur optimale de ce dernier afin de continuer les autres analyses de flottation. Les courbes correspondantes sont insérées ci-dessus :

### 8.1.1 Echantillon n° 1 de Boucaïd :

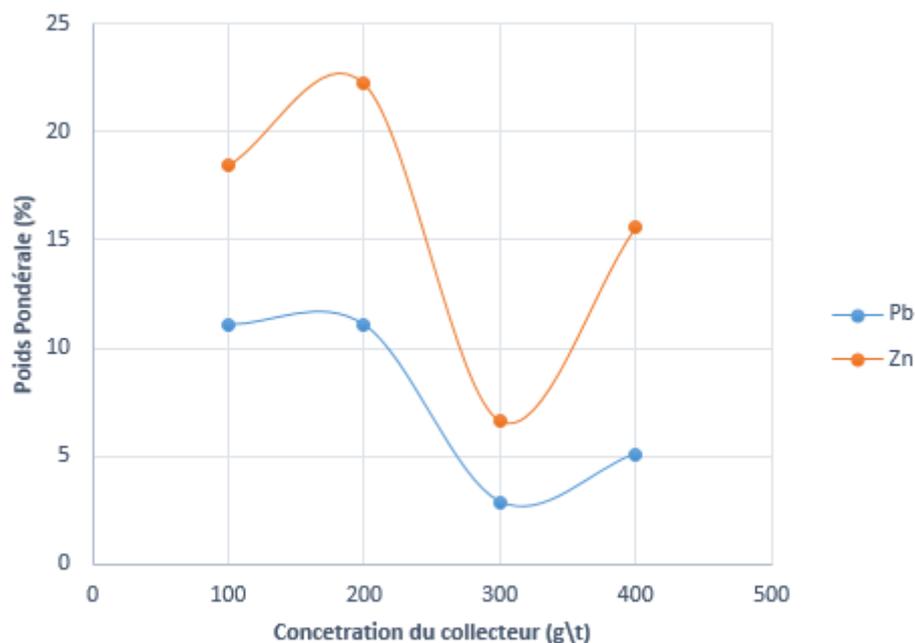


FIGURE 8.1 – Graphique décrivant la variation du rendement pondéral du Pb et du Zn de l'échantillon n° 1 de Boucaïd en fonction de la concentration de son collecteur ( le xanthate)

On remarque que :

- chacune des courbes atteignent des maxima pour une concentration du collecteur ( xanthate ) de 200g/t pour chacun des deux mineraï récupérés;

- chacune de ces courbes a un minima pour une concentration du collecteur ( xanthate ) de 300g\text.

Comme cité dans la partie bibliographique, chaque minerai a un collecteur spécifique à lui, mais le contraire n'est pas vrai. Chaque collecteur est spécifique à une certaine classe de minéraux. son activité dépend aussi de l'alcalinité du milieu. Donc afin d'assurer la récupération d'un minéral spécifique, n'étant pas mélangé avec d'autres éléments; la teneur optimale du collecteur à prendre est la plus basse se trouvant dans le graphe.

Donc la concentration optimale du xanthate à utiliser pour faire flotter que ce soit le plomb ou bien le zinc est celle correspondant aux minima de chacune des deux courbes, i.e : 300g\text

### 8.1.2 Echantillon n° 2 de Boucaïd :

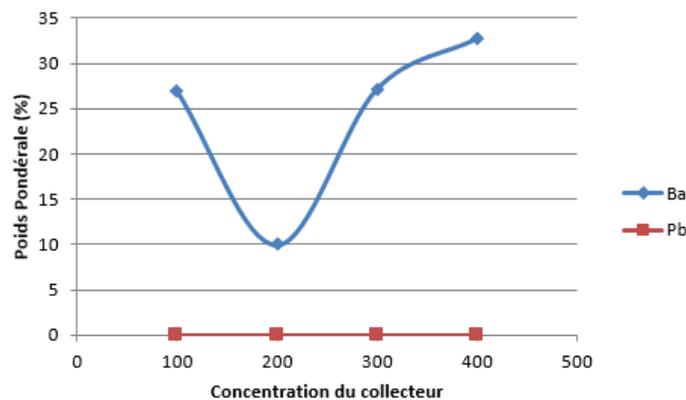


FIGURE 8.2 – Graphe représentant la variation des rendements pondéraux des minéraux extraits de l'échantillon n° 2 de Boucaïd en fonction de la concentration du collecteur

Comme pour l'échantillon précédent, on suit le même raisonnement, et ainsi on peut déterminer les concentrations optimales de chacun des collecteurs :

- Concernant le plomb, d'après les 4 essais réalisés, on a pas pu obtenir un concentré de plomb, par conséquent aucune des 4 teneurs n'est a prendre ;
- Pour ce qui est de la Baryte, la concentration optimale du collecteur, i.e : l'acide oléique, est de 200g\text



FIGURE 8.3 – Concentré de Baryte

### 8.1.3 Echantillon de Kherzet-Youcef :

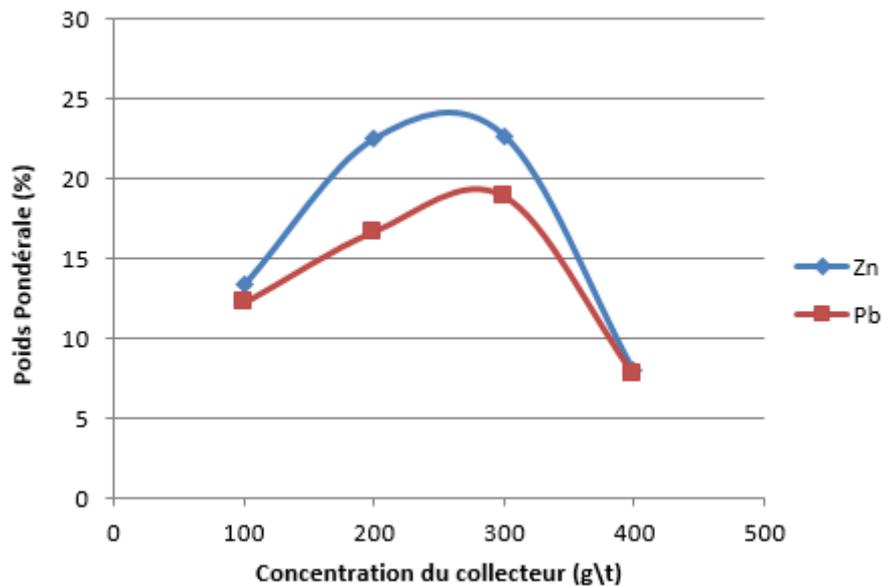


FIGURE 8.4 – Graphe représentant la variation du rendement pondéral des minéraux extraits de l'échantillon de Kherzet-Youcef en fonction de la concentration du collecteur

En suivant le même raisonnement utilisé pour les interprétations des échantillons de Boucaïd, les concentrations optimales du collecteur relatif à chaque concentré seraient de 400g/t.

Sauf que l'allure des courbes pour cet échantillon n'est pas la même que celles des précédents échantillons. On remarque le rendement pondéral tend à augmenter jusqu'à atteindre un maxima pour une valeur avoisinant les 300g/t, ensuite celui-ci tend à diminuer jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur minimale pour 400g/t.

D'après le tableau 7.7, on remarque que le rendement pondéral pour une concentration du

collecteur à 100g/t n'est pas si élevée que celle pour 400g/t que ce soit pour le zinc ou bien pour le plomb. Tandis que la quantité du collecteur consommé est 4 fois plus élevée, donc pour des raisons de rentabilité économique la concentration optimale de chaque collecteur est de 100g/t

#### **8.1.4 Conclusion**

Les premiers essais de flottation réalisés nous ont permis de déterminer la concentration optimale de chaque collecteur vu la grande influence et l'importance capitale qu'il peut avoir pour la réussite des essais de flottation.

Non seulement ces essais nous ont permis de trouver une concentration du collecteur, ils nous donnent la possibilité d'extraire une bonne quantité de notre concentré tout en évitant de gaspiller des quantités plus que suffisantes de ce réactif, mais aussi d'extraire un concentré ayant un degré de pureté très élevé en minerai utile.

Afin de vérifier cette hypothèse, de nouveaux essais de flottation furent établis tout en fixant la concentration optimale du collecteur sur des classes granulométriques bien spécifiques de ces échantillons (celles qui sont susceptibles de contenir les plus grande quantités possibles de minerai utile libéré).

## 8.2 Flottation des classes granulaires

Les résultats et les interprétations des essais de Flottation des classes granulométriques choisies pour chaque échantillon seront mentionnés ci-dessous :

### 8.2.1 Echantillon n° 1

Echantillon n° 1 de Boucaïd						
Classe	$m_{Zn}(g)$	$m_{Pb}(g)$	$m_{rejet}(g)$	$RP_{Zn}(\%)$	$RP_{Pb}(\%)$	$RP_{rejet}(\%)$
100-125 $\mu\text{m}$	163	105	182	36.22	23.33	40.44
125-160 $\mu\text{m}$	120	76	254	26.67	16.89	56.44
160-250 $\mu\text{m}$	107	39	304	23.78	2.06	67.56

TABLE 8.4 – Tableau renfermant les résultats de flottation des classes granulométriques de l'échantillon n° 1 de Boucaïd

### Interprétation

Les résultats de flottation se trouvant dans le tableau 8.4 ci-dessus nous donnent le rendement pondéral des concentrés du plomb et du zinc pour chaque classe. On remarque que le rendement pondéral minimal de la gangue a été trouvé pour la classe 100-125 $\mu\text{m}$  ainsi que le rendement pondéral maximal pour chacun des deux concentrés.

Donc la classe à utiliser lors de nos essais de flottation sera la classe 100-125 $\mu\text{m}$ . Pour confirmer ceci, on s'appuiera sur les images provenant du stéréomicroscope de type Zeiss Stemi™ DV4. Des échantillons ont été pris pour chaque classe dans le but d'observer la distribution des particules minérales à valoriser dans chaque concentré.

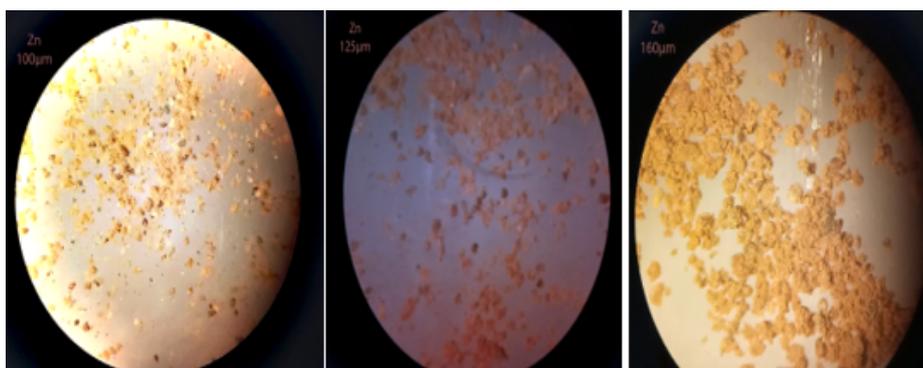


FIGURE 8.5 – Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de Zinc sur les classes de l'échantillon n° 1 de Boucaïd

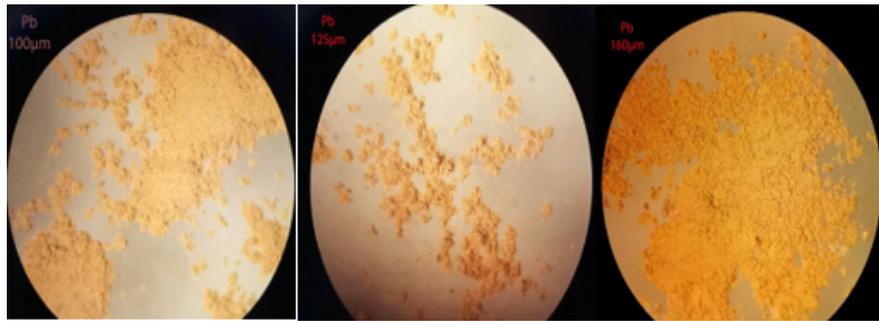


FIGURE 8.6 – Images issus du microscope montrant la distribution des particules de Plomb sur les classes de l'échantillon n° 1 de Boucaïd

On remarque que la plus grande concentration et distribution des grains des concentrés ( les images des échantillons de zinc le montrent plus clairement) est celle de la première classe, i.e : la classe 100-125µm ( les particules du minerai utile sont sombres, voir noirâtres ) confirmant ainsi les résultats obtenus par les essais de flottation.

### 8.2.2 Echantillon n° 2

Echantillon n° 2 de Boucaïd						
Classe	$m_{Ba}(g)$	$m_{Pb}(g)$	$m_{rejet}(g)$	$RP_{Ba}(\%)$	$RP_{Pb}(\%)$	$RP_{rejet}(\%)$
100-160µm	93	0	357	20.67	0	79.33
160-250µm	59	0	391	13.11	0	86.88
250-315µm	53	0	397	11.78	0	88.22

TABLE 8.5 – Tableau renfermant les résultats de flottation des classes granulométriques de l'échantillon n° 2 de Boucaïd

#### Interprétation

Après avoir obtenu les résultats des essais de flottation, et en s'appuyant sur les images obtenues du stéréomicroscope, tout en se basant sur le même raisonnement, on détermine la classe granulométrique optimale.

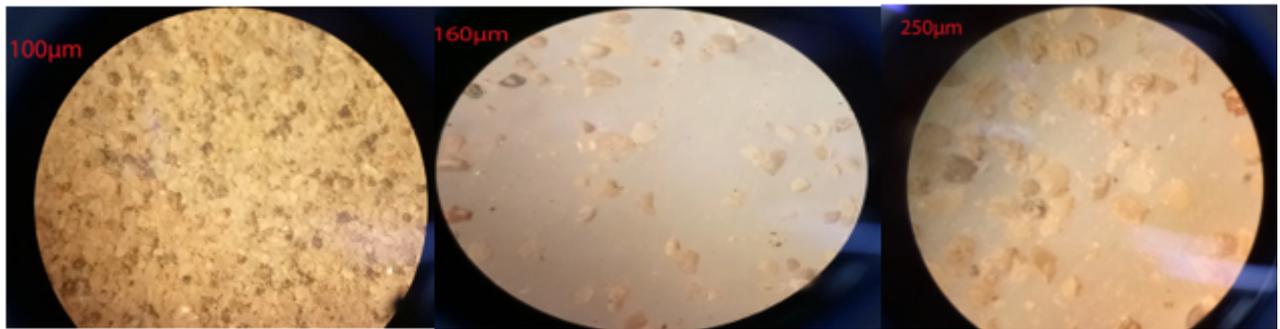


FIGURE 8.7 – Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de baryte sur les classes de l'échantillon n° 2 de Boucaïd

Ainsi pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd, la fraction granulométrique optimale est celle de 100µm relative à une masse de 93g de Baryte extraite.

Une remarque sur laquelle il faudrait faire le point. En ayant observé un échantillon tout-venant de ce minerai, on a constaté l'existence de particules sombres qu'on a considéré comme étant du plomb malgré que lors de nos essais de flottation on n'a pas réussi à le faire flotter, et ceci en se basant sur la nature du gisement barytique qui est un gisement plombo-barytique. Afin de confirmer cette hypothèse, on sera dans l'obligation de changer un autre paramètre de flottation, qui sera le paramètre solide-liquide



FIGURE 8.8 – Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des différentes particules de l'échantillon n° 2 de Boucaïd

### 8.2.3 Echantillon de Kherzet-Youcef

Echantillon n° 1 de Boucaïd						
Classe	$m_{Zn}(g)$	$m_{Pb}(g)$	$m_{rejet}(g)$	$RP_{Zn}(\%)$	$RP_{Pb}(\%)$	$RP_{rejet}(\%)$
80-100 $\mu\text{m}$	149	73	228	33.11	16.22	50.67
100-125 $\mu\text{m}$	112	81	257	24.89	18.00	57.11
125-160 $\mu\text{m}$	127	105	218	28.22	23.33	48.44

TABLE 8.6 – Tableau renfermant les résultats de flottation des classes granulométriques de l'échantillon de Kherzet-Youcef

#### Interprétation

La classe granulométrique optimale choisie en se basant sur les mêmes raisonnements précédents est celle de 80 $\mu\text{m}$

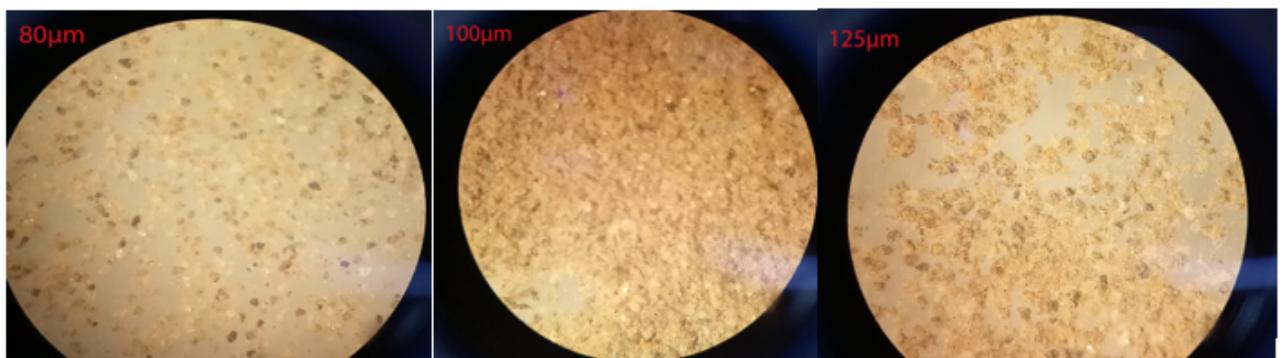


FIGURE 8.9 – Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de Plomb sur les classes de l'échantillon de Kherzet-Youcef

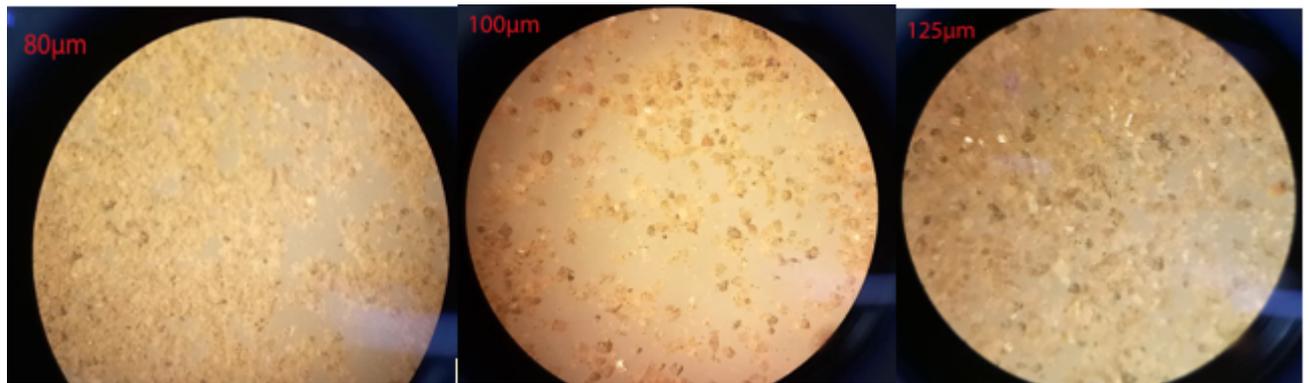


FIGURE 8.10 – Images issus du stéréomicroscope montrant la distribution des particules de Zinc sur les classes de l'échantillon de Kherzet Youcef

### 8.3 Variation du Rapport Solide-Liquide

Les résultats obtenus lors de la variation du rapport liquide-solide seront déployés dans les tableaux suivants :

Concentré	Masse (g)	R.P (%)
<b>Echantillon n° 1 de Boucaïd</b>		
Plomb	63	8.4
Zinc	123	16.4
Rejets	564	75.2
<b>Echantillon n° 2 de Boucaïd</b>		
Plomb	40	5.3
Baryte	215	28.67
Rejets	505	67.3
<b>Echantillon de Kherzet-Youcef</b>		
Plomb	106	14.13
Zinc	176	23.47
Rejets	468	62.4

TABLE 8.7 – Tableau regroupant les résultats obtenus lors de la flottation des 3 échantillons en changeant le rapport solide-liquide

#### 8.3.1 Interprétation

En se basant sur les résultats se trouvant dans le tableau ci-dessus :

- On remarque tout d'abord que le rendement pondéral des rejets lors de la variation du

rapport solide-liquide a augmenté par rapport à celui obtenu par les essais avec un rapport solide-liquide de 30% à une exception presque, celui de l'échantillon n° 2 de Boucaïd ;

- Le rendement pondéral du Zinc a connu une diminution conséquente lors du changement du rapport solide-liquide ;
- Idem pour le plomb, sauf que concernant l'échantillon n° 2, les essais de flottation ont permis d'extraire un concentré de plomb lors de l'augmentation du rapport solide-liquide.
- Concernant le concentré de Baryte, on remarque une nette augmentation dans son rendement pondéral lors de la variation du rapport solide-liquide

Donc on peut dire que la variation du rapport solide-liquide influe sur le rendement des essais de flottation, vu que ceci nous a permis d'extraire du plomb de l'échantillon n° 2 de Boucaïd. Mais son influence reste encore inconnue vu que pour certains échantillons, le rendement pondéral d'extraction de certains concentrés a augmenté tandis que dans un autre il a diminué.

Ceci est dû à la qualité des réactifs de flottation utilisés, tel que le collecteur, à l'homogénéité de l'échantillon, au temps d'agitation de ces derniers ou au temps de raclage.

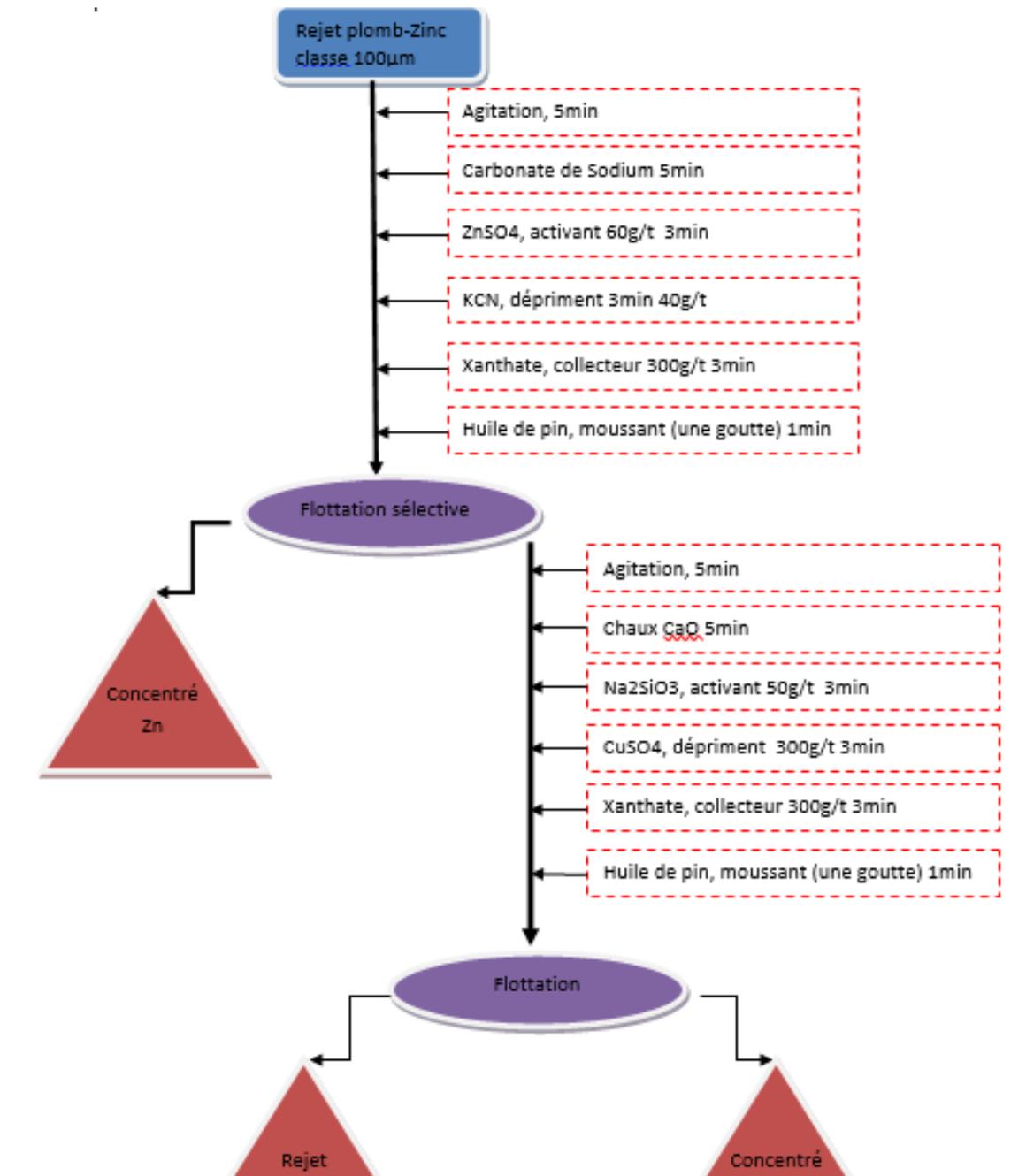


FIGURE 8.11 – Schéma technologique résumant le processus de flottation établi pour l'échantillon n° 1 de Boucaïd (flow-sheet)

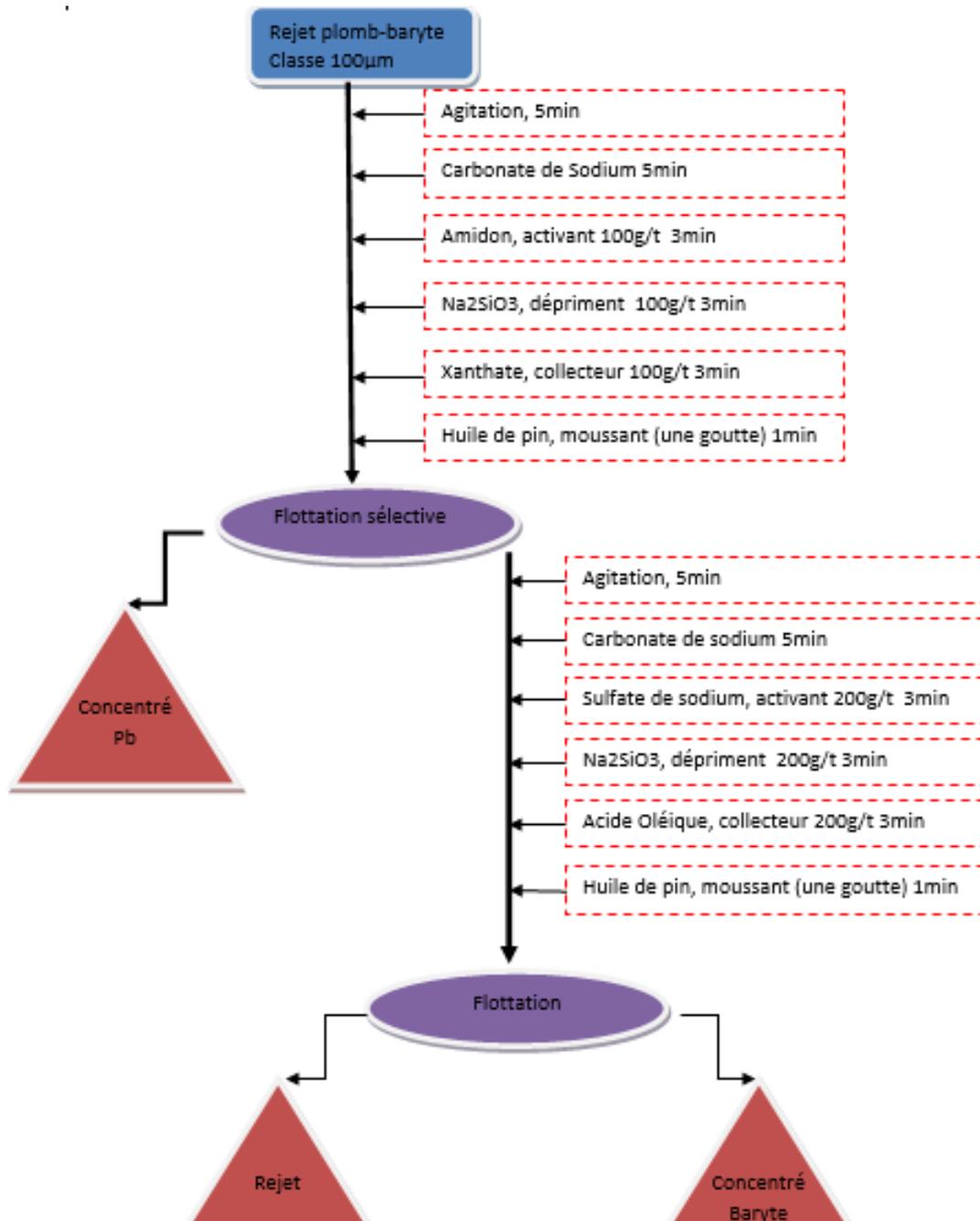


FIGURE 8.12 – Schéma technologique résumant le processus de flottation établi pour l'échantillon n° 2 de Boucaïd (flow-sheet)

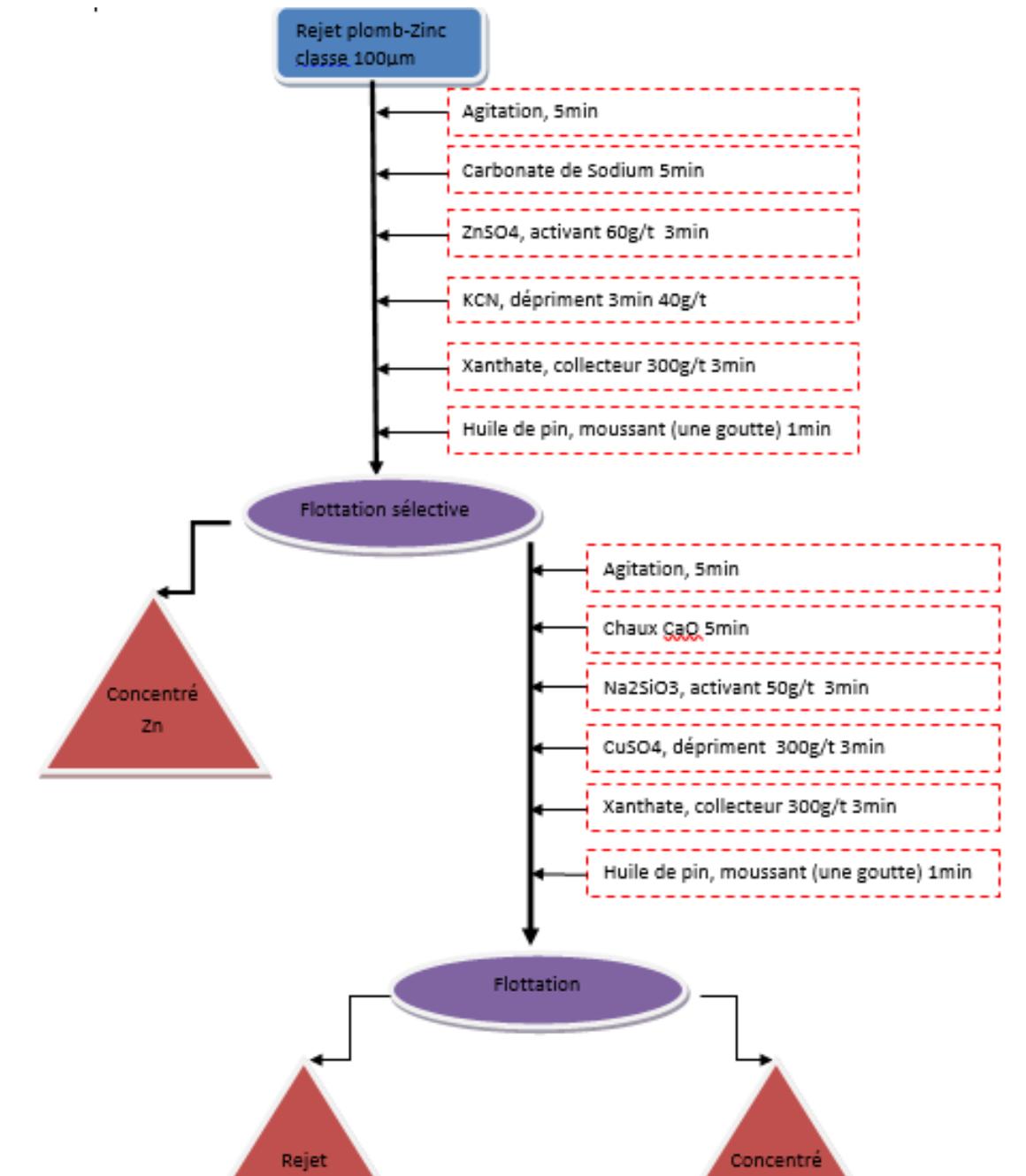


FIGURE 8.13 – Schéma technologique résumant le processus de flottation établi pour l'échantillon de Kherzet-Youcef (flow-sheet)

# Chapitre 9

## Analyse Granulochimique

Par manque de moyens et de temps, les analyses granulochimiques ne furent pas établies au sein de notre laboratoire afin de mieux cerner la composition minéralogique de chacun de nos échantillons, et surtout dans le but d'éclaircir la controverse que nous avons eu lors de notre flottation de l'échantillon n° 2 de Boucaïd Ceci nous a conduit à se baser sur des résultats obtenus au préalable par notre encadreuse et qui sont :

- Les résultats de l'analyse granulochimique de la digue de Kherzet-Youcef faites lors de son magister ;
- Les résultats de l'analyse granulochimique de l'échantillon plombo-barytique de Boucaïd dans le cadre de sa préparation de son mémoire de doctorat.

Ces analyses ont été réalisé par la diffraction en rayons X.

### 9.1 Echantillon n° 2 de Boucaïd

La composition minéralogique de l'échantillon n° 2 de Boucaïd est constitué des minéralisations suivantes :

- Des minéralisations sulfuré dont la sphalérite et la pyrite ;
- Des minéralisation sulfatée dont la baryte et la roselite ;
- D'autres minéralisation résiduelles telles quel la calcite

Un constat à faire c'est que d'après cette analyse chimique, on ne trouve aucune trace de la galène, la principale minéralisation plombifère, ce qui contredit notre essai de flottation lors de la variation du rapport solide-liquide.

## 9.2 Echantillon de Kherzet-Youcef

Cet échantillon a été sujet à des analyses chimiques poussées faites par la DRX et la SAA, les minéralisations constituants cet échantillons sont les suivantes :

- Des minéralisation polymétalliques sulfurés de plomb, de zinc et de fer ;
- Des minéralisation sulfatés de plomb ;
- Des minéralisations non-métallique , principalement carbonatées, telle que la dolomie

Donc cette analyse chimique vient confirmer les résultats obtenus par nos essais de flottation, avec une teneur élevée en minéralisation zincifère

# Chapitre 10

## Conclusion Générale

Les travaux effectués lors de notre projet de fin d'étude sur les trois échantillons qui sont : les rejets miniers plombo-zincifères de Kherzet-Youcef ainsi que ceux de Boucaïd, dont l'un est de nature plombo-zincifère et l'autre est plombo-barytique nous ont permis de déterminer ce qui suit :

- Concernant le 2<sup>e</sup> échantillon de Boucaïd, i.e : celui ayant une nature plombo-barytique, on constate que le pourcentage de baryte contenu est valorisable compte tenu des rendements pondéraux obtenus.
- Le zinc est aussi valorisable que ce soit dans l'échantillon de Boucaïd ou bien dans celui de Kherzet-Youcef compte tenu aussi des rendements pondéraux de ceux-ci, et aussi en s'aidant du mémoire de magister de MERCHICHI A.
- Concernant le zinc, la nature des deux gisements est similaire. Donc en se basant sur les rendements pondéraux qui ont donnés des valeurs avoisinantes l'une à l'autre. On peut confirmer notre hypothèse que ce dernier est valorisable.
- La valorisation du plomb ne peut avoir lieu vu son faible rendement pondéral dans les trois échantillons, ce qui constituerait une non-rentabilité économique flagrante ; bien-sûr pour le moment vu les développements techniques et technologiques que l'industrie minière connaît au fur et à mesure du temps.
- Vu que la valorisation du zinc peut avoir lieu tandis que celle du plomb n'est pas d'actualité. On peut penser à réaliser d'une pierre deux coups, extraire le zinc et en même temps penser à la dépollution des rejets du plomb pour empêcher la genèse d'un DNC.
- Les essais de flottation établis sur les échantillons composites nous ont permis de déterminer les concentrations optimales pour les collecteurs relatifs à chaque concentré dans chaque échantillon. Par conséquent, ceci nous permet de réduire nos exigences vis à vis de ce réactif de flottation dans le but d'avoir des concentrés avec un degré de pureté le plus possiblement élevé en réduisant sa quantité et donc diminuer les coûts de la flottation.

- Les essais de flottations établis sur les classes granulométriques nous ont permis de déterminer que le broyage des échantillons à certaines dimensions spécifiques nous permet d'avoir un plus grand rendement pondéral du concentré à extraire, i.e libérer un maximum de particules chargées en minerai utile.
- Les essais de flottation réalisés sur les classes granulométriques optimales, tout en variant le rapport solide-liquide nous ont donné des résultats incohérents qui peuvent soit nous inciter à approfondir nos connaissances concernant ce paramètre ou bien que nos essais ne furent pas bien réalisés.
- Ces derniers essais nous ont permis, en tout les cas, de confirmer une chose, c'est que l'échantillon n° 2 de Boucaïd renferme des particules métallifères, que nous avons réussi à visualiser via le stéréomicroscope tandis qu'on n'a pas réussi à les faire flotter précédemment ( en réalisant 4 essais sur des échantillons composites, 3 sur des échantillons de classes granulométriques spécifiques et 3 essais à blanc ). Comme précédemment ceci peut être imputé soit à des erreurs de manipulation, ce qui est, en toute humilité, peu probable, soit au recouvrement des particules chargées en plomb par des schlammes ou bien que celles-ci vu leurs grande masse molaires n'ont pu flotter et par conséquent, il faudrait régler la densité de la pulpe selon la grosseur des particules minérales.
- Les analyses chimiques établis sur les rejets de la digue de Kherzet-Youcef, de nature plombo-zincifère viennent confirmer les résultats obtenus par nos essais de flottation. Par contre, en ce qui concerne l'échantillon n° 2 celles-ci infirment les résultats que nous avons préalablement obtenus, par conséquent :
  - Soit le concentré extrait lors de notre essai de flottation sur cet échantillon renferme d'autres minéralisations pouvant être extraites à l'aide des mêmes réactifs utilisés pour le plomb dans ces mêmes conditions qu'on classe comme étant une gangue ;
  - Ou bien, vu la déposition anarchiques des rejets d'exploitation du gisement de Boucaïd dans la digue, il est totalement impossible de réaliser un échantillonnage adéquat sur terrain, et vu que les analyses granulochimiques ne furent pas établis sur notre échantillon mais sur un échantillon qui lui ressemble du point de vue physique. Il est fortement possible que cet échantillon renferme une faible teneur en plomb que nous avons réussi à extraire via nos essais de flottation ;
  - Il est possible de dire que les particules métalliques extraites de cet échantillon sont des particules de nature zincifère, en se basant sur les images obtenues du stéréomicroscope, on a réalisé un essai pour voir si cet échantillon contient du zinc avec un rapport solide-liquide de 50% ; rien ne fut extrait.

Il est nécessaire de noter que, par faute de moyens, il nous a été impossible de réaliser des analyses granulochimiques et chimiques pour chaque concentré afin de bien appuyer nos conclusions, ce qui nous a conduit à prendre des résultats préalablement obtenus, comme il fut

mentionné ci-dessus, afin d'avoir plus d'éclaircissement sur les résultats obtenus par flottation.

Au vu des conclusions tirées de notre travail, on pourrait dire que celui-ci ne constitue qu'un modeste début pour des travaux à suivre dans le but d'optimiser les rendements des différents processus de flottation afin de valoriser ces différents rejets miniers et de protéger notre écosystème, qui fait office d'enjeu majeur dans ces temps-ci, sans oublier que la conduite adéquate de ces travaux de valorisation, si on leur donne des suites favorables constitueront aussi une source de revenue notable pour le système économique de notre pays.

# Bibliographie

- [1] . Centre d'expertise en analyse environnementale du québec et ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du québec détermination de la matière organique par incinération : méthode de la perte au feu (paf), 2003.
- [2] *PROCÉDÉS ET MACHINES DE TRAITEMENT DES MINÉRAUX UTILES*, 2013.
- [3] HENNI Abderahmane. Minéralogie, géochimie du gisement pb-zn de kherzet youcef, 1998.
- [4] ZEGHARI Ahmed. Etude des blocs diachrones resedimentes dans le "flysch albo-aptien" (grand pic de l'ouarsenis) : Cartographie et aspects sédimentologique, 27/06/2013.
- [5] Aittoucheik. Etude géochimique des rejets du complexe minier de kherzet yousef (setif) et son impact sur l'environnement, 2006.
- [6] MERCHICHI Amira. Etude geochimique et traitement des rejets de la digue provenant de la mine de kherzet youcef et chaabet el hamra, Décembre 2013.
- [7] Aissa Banka. Essai de valorisation par flottation de minerais polymétallique de chaabet el-hamra, 2014.
- [8] Beaufort. *Table de la force des vents selon l'échelle de Beaufort*, •.
- [9] TOUAHRI Belkacem. Géochimie et métallogénie des minéralisations à plomb et zinc du nord de l'algérie, 1991.
- [10] Miloud Benhamou. Evolution tectono-eustatique d'un bassin de la téthys maghrébine : l'ouarsenins (algérie) pendant le jurassique inférieur et moyen, 1996.
- [11] Pierre Blazy. *La valorisation des minerais*. 1970.
- [12] Bourbala Brahim and Moussaoui El Abbas. Essais de valorisation de la barytine du gisement de bou-caïd par flottation, 2012.
- [13] BRGM. *Mémento roches et minéraux industriels : Barytine*, 1993.
- [14] Pascal Charbonneau. *Analyse des pratiques de valorisation des rejets miniers*, 2014.

- [15] BOUSDIRA Dina. Etude des impacts des activités d'exploitation des mines polymétalliques (pb-zn) sur l'environnement de la région de kherzet youssef (wilaya de sétif), 2008-2009.
- [16] Per Enghag. *Encyclopedia of the elements*. 2002.
- [17] ENOF. Gisement de lakhdar, 2016.
- [18] ENOF. Gisement de sidi-belabess, 2016.
- [19] ENOF. Rapport final, 2016.
- [20] ENOF. Rapport technique du gisement plombo-zincquifère de kherzet-youcef, 2016.
- [21] ENOF. Traitement du minerai de baryte au niveau de l'usine, 2016.
- [22] Barry A Wilss et Tim Napier-Munn. *Mineral Processing Technology*. 2006.
- [23] René Huppé. Evaluation, optimisation et comparaison des cellules et des colonnes de flottation afin de retirer des contaminants organiques des sédiments portuaires, 2001.
- [24] Ould Hamou Malek. *Cours de Flottation*, 2016.
- [25] Ouchene Midou. Contribution à l'étude géologique et géostatistique de la minéralisation à pb-zn de la mine de chabat-el-hamra, 2010.
- [26] Willy KITOBO SAMSON. Dépollution et valorisation des rejets miniers sulfurés du kantanga « cas des tailings de l'ancien concentrateur de kipushi », Juillet 2008.
- [27] Klassen V.I. *Magnetic treatment of water and aqueous systems in flotation and thickening of ores and coals*. Leningrad, 1968.
- [28] Chaouch Zohra. Contribution à l'analyse d'aéragé du quartier lakhdar de la mine souterraine de bou-caid (wilaya de tissemsilt), 2013.

# Annexe A

## Préparation des Solutions

136 La préparation des solutions de flottation est une étape délicate menant à la réussite de ce processus, chaque type de solution a un mode opératoire propre à elle :

### A.1 Régulateurs du Milieu

À savoir la chaux et les carbonates de sodium qui sont des réactifs se trouvant à un coût relativement bas comparé aux autres réactifs de flottation. Dn plus, les régulateurs du milieu sont utilisé massivement, ceci nous conduit à préparer des solutions à forte concentration avoisinant les 10% en réactifs chimiques ( 50g de régulateurs de pH dans une fiole de 500ml dilués dans l'eau).

Afin de réaliser une bonne pesée des concentrés, on utilise la balance de précision de  $10^{-5}$ , ensuite on les ajoute dans les fioles en s'aidant d'un entonnoir. Après cela on remplit la fiole avec de l'eau distillée au moyen d'une pissette.

### A.2 Les autres réactifs

Les autres réactifs de la flottation, à savoir les déprimants, les activants et les collecteurs sont tous préparés de la même manière, sauf l'acide oléïque dont on décrira le mode de préparation après.

Ces réactifs sont utilisés à une concentration de 2% chacune, qui sont dilués dans l'eau distillé. Les fioles les contenant sont celle de 1L de volume. On utilise toujours la même balance pour minimiser les erreurs de la manipulation.

Concernant l'acide Oléïque celui-ci est utilisé avec une concentration de 5% et on remplit la fiole avec de l'éthanol au lieu de l'eau distillée

Pour ce qui est du moussant, à savoir l'huile de pin, on utilise une solution déjà préparé au préalable.



FIGURE A.1 – Réactifs de flottation du Zinc (à gauche) et du Plomb (à droite)