

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département des Mines et géologie

# *Memoire de Fin d'Etudes*

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master**  
**Filière : Génie Minier**  
**Option : Valorisation des ressources**  
**minérales**

**Présenté par :**  
**KHELOUFI Abderrahmane**

## Thème

**Étude de la qualité de broyage et son influence sur les  
produits de séparation (étude comparative des deux  
minerais)**

Soutenu le 14 /09/2023 devant le jury composé de :

Président	Mr. MEGHERFI Karim	U.A.M.Bejaia
Encadrant	Mr. AYADEN Brahim	U.A.M.Bejaia
Examinatrice	Mme. KICHER	U.A.M.Bejaia

**Promotion: 2022-2023**



# *Remerciements*

Ce travail est le fruit de la combinaison d'efforts de plusieurs personnes. je remercie tout d'abord mon père , ma mère et ma sœur puis mes amis et tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin .

Cet humble travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de *M<sup>r</sup>* AYADEN Brahim, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Mes remerciements aussi au jurys, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce travail.

Mes remerciements, s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs enseignements de qualité, leurs conseils, générosité, eux qui nous ont permis de poursuivre notre itinéraire académique jusqu'à présent.

À tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'accomplissement de ce travail. À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude, merci.

# *Dédicaces*

À Mima-Said-Kenza

À celle qui s'appelait -joie-

À cette femme d'exception -Sonia-

À Malek, À Moustafa et À Zidane.

À Naim et À Idir.

À Mehdi, À Aldja, À nonor, À Linda, À Bihman, À Yanis et Tafrara, À Fahem, À Amel.

et tout le temps d'après pour Sanes et tous ceux qui comptent pour moi.

*KHELOUFI Abderrahmane.*



# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>V</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>VII</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>VIII</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur le complexe minier de KHERZET-Youcef</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Situation Géographique . . . . .	3
1.3 Historique des Travaux . . . . .	4
1.4 Topographie . . . . .	4
1.5 Géologie . . . . .	4
1.6 Géologie Locale . . . . .	5
1.7 Tectonique . . . . .	6
1.8 Minéralisation . . . . .	6
1.9 Réserves exploitables . . . . .	7
1.10 Mode d'exploitation . . . . .	7
1.11 Description de l'usine de traitement (laverie) de Kherzet-Youcef . . . . .	9
1.12 Atelier de préparation mécanique . . . . .	9
1.12.1 Section de criblage et de concassage . . . . .	9
1.12.1.1 Concasseur à mâchoires . . . . .	9
1.12.1.2 Crible vibrant . . . . .	9
1.12.1.3 Concasseur à cône . . . . .	10
1.12.2 Section de broyage et de classification . . . . .	11
1.12.2.1 Broyeur à boulets . . . . .	11
1.12.2.2 Classificateur . . . . .	12

1.13	Atelier de flottation et de filtration . . . . .	12
1.13.1	Réactifs utilisés . . . . .	13
1.14	Conclusion . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Aperçu sur le broyage et la flottation</b>	<b>15</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	Théorie de broyage . . . . .	15
2.2.1	Les lois énergétiques . . . . .	15
2.2.2	Loi de Rittinger . . . . .	15
2.2.3	Loi de kick . . . . .	15
2.2.4	Loi de Bond . . . . .	16
2.3	Granularité . . . . .	16
2.4	Broyabilité . . . . .	16
2.5	But de broyage . . . . .	16
2.6	Évolution de la surface spécifique . . . . .	17
2.7	Variation de la densité . . . . .	17
2.8	Réactions mécano-chimiques du broyage . . . . .	17
2.8.1	Conséquences physico-chimiques du broyage . . . . .	18
2.9	Mécanisme de broyage . . . . .	18
2.10	Différents type du broyage . . . . .	18
2.11	Paramètres de broyage . . . . .	19
2.11.1	Rapport de réduction . . . . .	19
2.11.2	Finesse de fragmentation . . . . .	20
2.11.3	Capacité de broyage . . . . .	20
2.11.4	Circuits de broyage . . . . .	20
2.11.4.1	Circuit ouvert . . . . .	21
2.11.4.2	Circuits fermés . . . . .	21
2.12	Type de broyeurs . . . . .	22
2.13	Broyeur à boulets . . . . .	22
2.14	Théorie de flottation . . . . .	23
2.14.1	Définition . . . . .	23
2.14.2	Mécanisme de flottation . . . . .	23
2.14.3	Réactifs de flottation . . . . .	24
2.14.3.1	Collecteurs de flottation . . . . .	24
2.14.3.2	Déprimants (dépresseurs) . . . . .	24
2.14.3.3	Activant . . . . .	24

2.14.3.4	Régulateurs . . . . .	24
2.14.4	Circuits et type de flottation . . . . .	24
2.14.5	Machines de flottation (cellules et colonnes) . . . . .	25
2.14.5.1	Cellule de flottation . . . . .	25
2.14.5.2	Colonne de flottation . . . . .	26
2.15	Conclusion . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Matériels et méthodes</b>	<b>27</b>
3.1	Introduction . . . . .	27
3.2	Provenance des échantillons . . . . .	27
3.3	Préparation des échantillons . . . . .	27
3.4	Concassage . . . . .	28
3.5	Homogénéisation . . . . .	28
3.6	Broyage . . . . .	29
3.6.1	Mode opératoire du broyage . . . . .	29
3.7	Analyse granulométrique par tamisage . . . . .	30
3.7.1	Résultats d'analyse granulométrique des essais de broyage réalisé . . . . .	31
3.8	Essais de flottation du minerai plomb zinc du gisement kherzet youcef . . . . .	33
3.9	Cellule de flottation du laboratoire . . . . .	33
3.10	Préparation de l'échantillon Pb-Zn et les réactifs de la flottation . . . . .	33
3.11	Caractéristiques de la pulpe . . . . .	34
3.12	Paramètre de flottation varié . . . . .	34
3.13	Conduite des essais de flottation . . . . .	34
3.13.1	Description des conditions communes pour tous les essais . . . . .	34
3.14	Résultats d'analyses granulométriques . . . . .	36
3.14.1	Essai 1 (20 min de broyage) . . . . .	37
3.14.2	Essai 2 (40 min de broyage) . . . . .	38
3.14.3	Essai 3 (60 min de broyage) . . . . .	39
3.14.4	Essai 4 (80 min de broyage) . . . . .	40
3.15	Caractérisation des échantillons par DRX . . . . .	41
3.16	Conclusion . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Résultat et discussion</b>	<b>42</b>
4.1	Introduction . . . . .	42
4.2	Résultats de la caractérisation minéralogiques . . . . .	42
4.2.1	Fraction $100\mu m$ . . . . .	42
4.2.2	Fraction $63\mu m$ . . . . .	43



4.2.3	Fraction 45-61.5 $\mu\text{m}$ . . . . .	43
4.2.4	Echantillon flottant pendant 4min . . . . .	44
4.2.5	Rejets de flottation pendant 4min (PC-4min). . . . .	45
4.2.6	Echantillon flottant pendant 10 min . . . . .	45
4.2.7	rejets de flottation pendant 10min (PC-10min) . . . . .	46
4.3	Résultats de l'analyse quantitative . . . . .	47
4.4	Conclusion . . . . .	48
	<b>Conclusion générale</b>	<b>49</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>50</b>

# Table des figures

1.1	Situation Géographique de la mine de Kherzet-Youcef.[1] . . . . .	3
1.2	Situation de la zone d'étude dans le dispositif structural de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale.[4] . . . . .	5
1.3	Schéma structural simplifié de la région d'Ain Azel (extrait de la carte géologique N°143 au 1/50 000 d'Ain Azel) [1] . . . . .	6
1.4	Schémas synthétique des différents types d'accès des mines souterraines. [7] . . . . .	8
1.5	Mode d'exploitation du gisement de Kherzet-Youcef.[7] . . . . .	8
1.6	Concasseur à mâchoire.[6] . . . . .	10
1.7	Crible vibrant de l'usine Kherzet-Youcef.[6] . . . . .	10
1.8	Section de concassage – criblage . . . . .	10
1.9	Broyeur à boulets de Kherzet-youcef.[6] . . . . .	11
1.10	Classificateur mono spiral . . . . .	12
1.11	Section flottation – filtration . . . . .	13
1.12	Flottation de minerai de zinc de kherzet-youcef. . . . .	13
1.13	Schéma de traitement du minerai dans l'usine KHERZET-Youcef.[6] . . . . .	14
2.1	Types de mouvement dans un broyeur à boulets . . . . .	19
2.2	circuit de broyage ouvert . . . . .	21
2.3	Circuit de broyage fermé. . . . .	21
2.4	Broyeur à boulets [11]. . . . .	22
2.5	Circuit de flottation industriel. . . . .	25
2.6	Cellule de flottation. . . . .	25
2.7	Colonne de flottation. . . . .	26
3.1	Concasseur à mâchoire type laboratoire . . . . .	28
3.2	Diviseur à riffle . . . . .	28
3.3	Broyeur à boulets du laboratoire de préparation mécanique de l'université de Bejaia . . . . .	29

---

3.4	Tamiseuse du laboratoire de préparation mécanique de l'université de Bejaia . . . . .	30
3.5	Cellule de flottation pour laboratoire . . . . .	33
3.6	Filtration des produits de flottation . . . . .	35
3.7	Courbe d'analyse granulométrique pour l'essai N°01 (20Min). . . . .	37
3.8	Courbe d'analyse granulométrique pour l'essai N°02 (40Min). . . . .	38
3.9	Courbe d'analyse granulométrique pour l'essai N°03 (60Min). . . . .	39
3.10	Courbe de l'analyse granulométrique pour l'essai N°04 (80Min). . . . .	40
4.1	Diffractionogramme des rayons X de la fraction $100\mu m$ . . . . .	42
4.2	Diffractionogramme des rayons X de la fraction $63\mu m$ . . . . .	43
4.3	Diffractionogramme des rayons X de la fraction $45-61.5 \mu m$ . . . . .	44
4.4	Diffractionogramme des rayons X de l'échantillon flottant à 4min . . . . .	44
4.5	Diffractionogramme des rayons X de rejets de flottation pendant 4min (PC-4min). . . . .	45
4.6	Diffractionogramme des rayons X de l'échantillon flottant à 10 min. . . . .	46
4.7	Diffractionogramme des rayons X de rejets de flottation pendant 10min (PC-10min). . . . .	46

# Liste des tableaux

3.1	Différents essais réalisés . . . . .	30
3.2	Analyse granulométriques effectué sur l'échantillon broyé à l'usine Kherzet Youcef . . .	31
3.3	Analyse granulométrique pour l'essai 1 (20min de broyage) et l'essai 2 (40min de broyage) au niveau du laboratoire de l'université. . . . .	31
3.4	Analyse granulométrique pour l'essai 3 (60min de broyage) et l'essai 4 (80min de broyage) au niveau du laboratoire de l'université. . . . .	32
3.5	Condition de la variation du paramètre du temps. . . . .	35
3.6	Résultats des essais de flottation effectuée sur le minerai plomb zinc de Kherzet Youcef .	36
3.7	Résultat d'analyse granulométrique pour l'essai N°01 (20Min). . . . .	37
3.8	Résultat d'analyse granulométrique pour l'essai N°02 (40Min). . . . .	38
3.9	Résultat d'analyse granulométrique pour l'essai N°03 (60Min). . . . .	39
3.10	Résultat d'analyse granulométrie de l'essai N°04 (80Min). . . . .	40
3.11	Diamètres caractéristiques de l'ensemble des essai effectués. . . . .	41
3.12	Coefficients de la distrubution granulométriques de l'ensemble des essai effectués. . . .	41
4.1	Pourcentage des phases minéralogiques présentés dans l'ensemble des échantillons étudier.	47

# Liste des abréviations

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

DRX : Diffractométrie de rayons X.

LTMGP : Laboratoire de Technologie des Matériaux et Génie des Procédés.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

La valorisation des ressources minérales est une branche scientifique qui s'appuie sur plusieurs domaines, Fondamentalement elle est la spécialité qui s'occupe des traitements physiques et chimiques et physico-chimiques des ressources minérales.

Dans le complexe Minier de kherzet-Youcef on effectue le traitement minéralurgique du plomb-Zinc dans l'usine minière (Laverie) de ce dernier, cette opération consiste en l'enrichissement du minerai de plomb-Zinc qui vient comme alimentation depuis la mine de kherzet-Youcef. L'enrichissement du plomb-Zinc dans l'usine minière de kherzet-Youcef s'effectue dans la Laverie du complexe en utilisant la technique de la flottation.

Dans l'usine de traitement minéralurgique de Kherzet Youcef le broyage est une opération indispensable, elle est réalisée grâce au broyeur de la laverie, notre étude consiste en la réalisation de l'opération de broyage à l'échelle laboratoire dans l'optique de la détermination du temps optimal de broyage, cette opération est une clé dans le processus de la valorisation du minerai Pb-Zn qui est obtenue avec la réalisation de la méthode de la flottation.

La flottation est la méthode d'enrichissement utilisée pour le minerai Pb-Zn de Kherzet-Youcef et pour la réalisation de cette méthode et avoir un bon taux de récupération ; un broyage efficace doit être réaliser et dans notre travail nous nous intéressons à l'étude de la qualité de broyage et son influence sur les produits de séparation.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres distincts :

Le premier chapitre vise d'abord à mettre en considération le contexte géologique du gisement de kherzet-Youcef, il explique la nature de la minéralisation, et la relation entre la nature du minerai étudié et la technique d'enrichissement utilisée.

Dans le deuxième chapitre ce mémoire donne un aperçu générale sur le procédé de broyage et les paramètres qu'il faut ajuster progressivement pour l'efficacité de ce dernier mais aussi une vue globale sur la flottation.

Dans le troisième chapitre nous allons décrire la partie expérimentale réalisée au niveau du laboratoire de la préparation mécanique et LTMGP sur les échantillons Pb-Zn de Kherzet-Youcef prélevés

lors du stage effectué dans le complexe minier.

Le dernier chapitre sera consacré à la caractérisation minéralogique des échantillons Pb-Zn par DRX et à l'interprétation des résultats obtenus et si il y a lieu la proposition d'une solution pour l'amélioration des taux de récupération.



# CHAPITRE 1

## Généralités sur le complexe minier de KHERZET-Youcef

# Généralités sur le complexe minier de KHERZET-Youcef

## 1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons au complexe minier de Kherzet-Youcef, nous allons exposer d'une manière générale la géologie du gisement et la nature de sa minéralisation.

Nous décrivons les différentes parties de l'usine de traitement et le procédé d'enrichissement du minerai Pb-Zn utilisé qui est la flottation.

## 1.2 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 au nord par Djebel Sekrine et à l'Est par la commune de Salah Bey et celle de Aïn Oulmane au Nord-Ouest.[1]

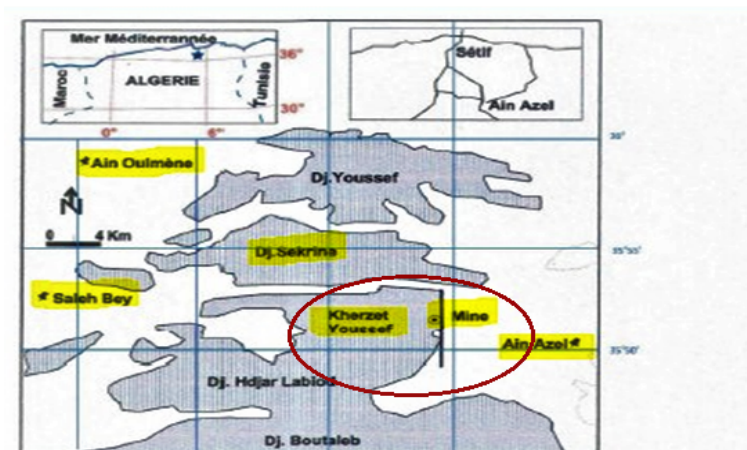


FIGURE 1.1 – Situation Géographique de la mine de Kherzet-Youcef.[1]

### 1.3 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>ème</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>ème</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.[2]

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. [3]

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

### 1.4 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 : [1]

- \* Zones montagneuses au sud et à l'ouest, dont l'altitude varie entre 1150m et 1250m.
- \* Zones de hautes plaines au nord et au centre, dont les altitudes varient entre 950m et 1050m.
- \* 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 1050m et 1150m.

### 1.5 Géologie

Dans le cadre de notre spécialité, la géologie est d'une importance primordiale, elle permet de maîtriser l'exploitation et le traitement et la persévération même de 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 : l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au sud.[4]

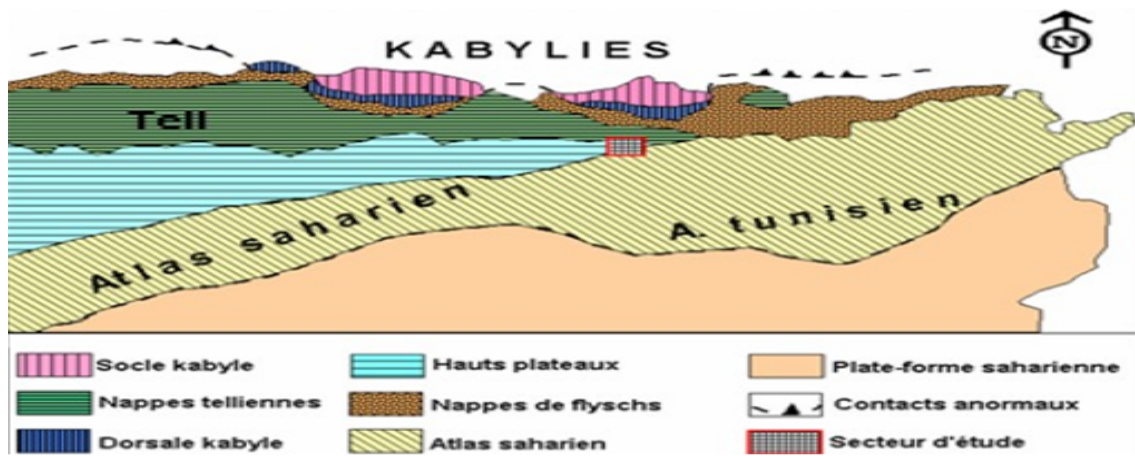


FIGURE 1.2 – Situation de la zone d'étude dans le dispositif structural de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale.[4]

## 1.6 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-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 ) [7].

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.[3]

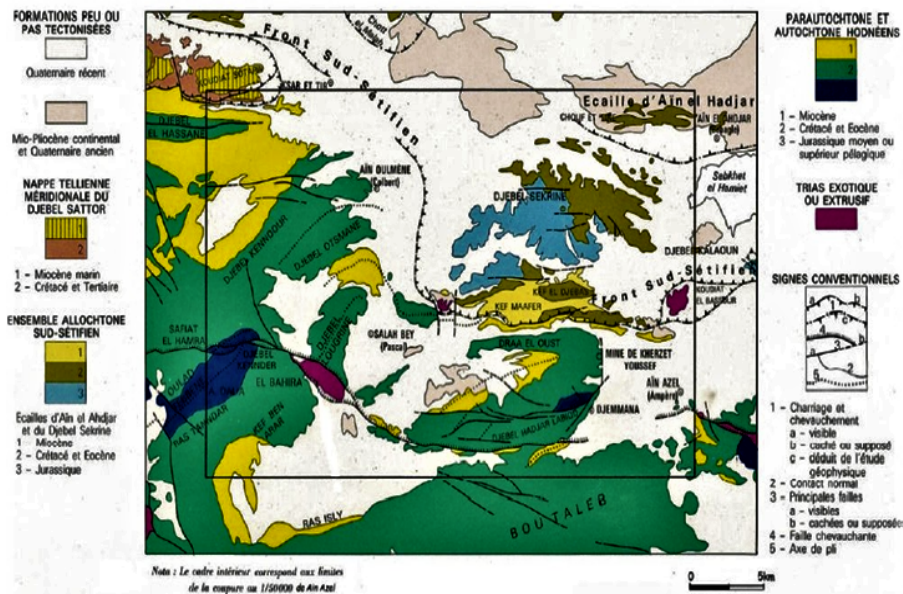


FIGURE 1.3 – Schéma structural simplifié de la région d'Ain Azel (extrait de la carte géologique N°143 au 1/50 000 d'Ain Azel) [1]

## 1.7 Tectonique

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

- \* Allochtone sud sétifien au Nord, constitué d'un vaste empilement d'écaillés limitées par des cisaillements.
- \* 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. [6]

## 1.8 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 marcassite ( $FeS_2$ ), 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 marcassite.

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.

**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%.[8]

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. Elles varient 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 , Sphalérite II , Galène, Pyrite et Marcassite).

Le minerai se présente sous forme de sulfures avec une paragenèse simple dont les principaux minéraux métallifères sont : le cuivre gris, la pyrite, la marcassite, la galène et la sphalérite. Ces sulfures sont souvent associés à des minéraux d'oxydation. [3]

## 1.9 Réserves exploitables

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 :

- \* Réserves certaines s'élèvent à 60.7%
- \* Réserves probables à 23.2% ;
- \* Réserves possibles à 16.1%

Toutefois des difficultés d'exploitation sont apparues en 1990, suite aux inondations souterraines, ayant causées plusieurs victimes (exhaure).[6]

## 1.10 Mode d'exploitation

Une fois qu'un corps minéralisé a été exploré et que des informations suffisantes ont été recueillies pour justifier une analyse plus approfondie, l'étape suivante consiste à choisir le mode d'exploitation le plus approprié pour le gisement. Le mode d'exploitation souterraine est utilisé lorsque l'extraction à ciel ouvert de minerai devient prohibitif. On distingue trois étapes principales de l'exploitation souterraine

(Chibka) :

- \* Ouverture du gisement (développement) : consiste à creuser des ouvrages donnant l'accès au gisement à partir du jour. Il y a différents types d'accès selon la morphologie du site, se font par puits, galerie au jour, descenderie ou avec entrées en cavage comme l'illustre la figure 1.4.
- \* Préparation des chantiers d'abattage : les travaux préparatoires sont destinés à partager le gisement en quartiers ou en éléments (étage, blocs, panneaux...etc.) .
- \* Le défilage du minerai : cette étape comprend plusieurs opérations telles que l'abattage, le marinage et le traitement des vides créés par l'exploitation.[7]

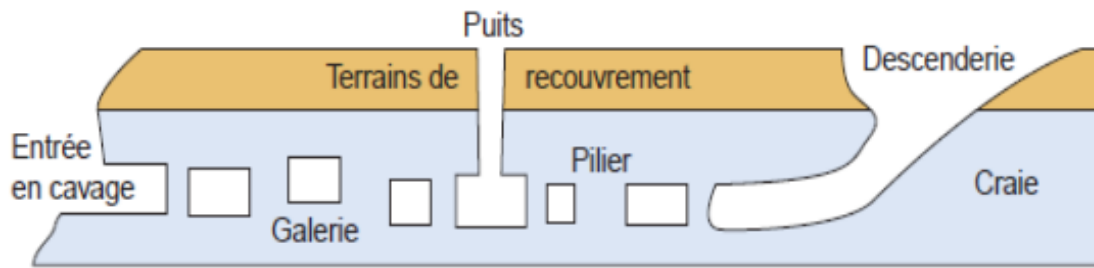


FIGURE 1.4 – Schémas synthétique des différents types d'accès des mines souterraines. [7]

En ce qui concerne l'exploitation du gisement de Kherzet-Youcef la méthode mise en oeuvre est l'exploitation souterraine.(voir la figure ci-dessous).



FIGURE 1.5 – Mode d'exploitation du gisement de Kherzet-Youcef.[7]

## 1.11 Description de l'usine de traitement (laverie) de Kherzet-Youcef

Le schéma technologique inclut le broyage humide avec deux broyeurs à boulets, après le concassage en deux étapes (la première avec un concasseur à mâchoire et la deuxième avec concasseur à cône), suivant le cycle de la flottation qui contient une opération de contrôle et trois opérations d'épuration. La capacité de travail de la laverie est de 100 000 tonnes, pour l'année 2000, pour un niveau de production :

\* Annuelle : tout venant 70 000 tonnes ; concentré zinc 5585T à 53 % Zn.

\* Journalière : tout venant 303 tonnes ; concentré zinc 24T à 53 % Zn.

## 1.12 Atelier de préparation mécanique

### 1.12.1 Section de criblage et de concassage

La section de traitement mécanique du minerai est conçue pour fonctionner avec une cadence de l'ordre de 221820T /j.

La réduction du tout-venant de 0 à 350 mm jusqu'à 0 à 20 mm s'effectue en deux étapes :

**Première étape** : obtention de la classe 0 - 40mm une fois déversé dans la trémie de réception, le minerai est introduit dans un concasseur à mâchoires.

**Deuxième étape** : obtention de la classe 0-15mm :

Les produits issus du concasseur à mâchoire (0/40mm) est acheminé à l'aide d'un transporteur à bande n°1 d'une longueur de 74 m vers le crible vibrant de type SYMONS. La classe supérieure à 20mm est dirigée vers le concasseur à cône, cet appareil fonctionne en cycle fermé avec le transporteur à bande n°1( voir la figure (1.13)).

Le produit inférieur à 20 mm est stocké dans 02 trémies métalliques d'une capacité de 25 tonnes chacun

Le minerai est acheminé vers le corps principal de la laverie par l'intermédiaire du convoyeur à bande n°5 (L=45m) est stocké dans deux trémies en béton de capacité de 100 tonnes chacune.[8]

#### 1.12.1.1 Concasseur à mâchoires

Dans l'usine de Kherzet-Youcef on utilise dans le cadre de la préparation mécanique un concasseur à mâchoire de type VB-57 qui provient de France avec une ouverture de 380 x 570mm vidange 40mm et une capacité de 75T/h.[6]

#### 1.12.1.2 Crible vibrant

Le criblage est une opération qui permet de séparer les particules concassées suivant leur dimension en deux (ou plusieurs) parties.

En ce qui concerne le crible utilisé nous avons une machine de type (SYMONS-NORBERG) qui



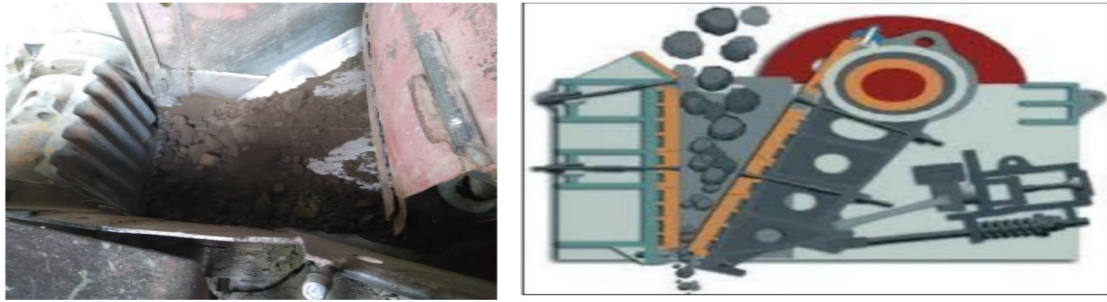


FIGURE 1.6 – Concasseur à mâchoire.[6]

provient d'Angleterre. sa dimension et de maille 20 mm et sa capacité de production est de 150 t/h.[6]



FIGURE 1.7 – Crible vibrant de l'usine Kherzet-Youcef.[6]

### 1.12.1.3 Concasseur à cône

Le concasseur à cône existant dans l'usine de Kherzet-Youcef provient de Bulgarie, il est de Type KCT-1200 son diamètre mesure 1200 mm avec une orifice d'évacuation 10 mm. Sa capacité de production s'estime de 45T/h.[6]

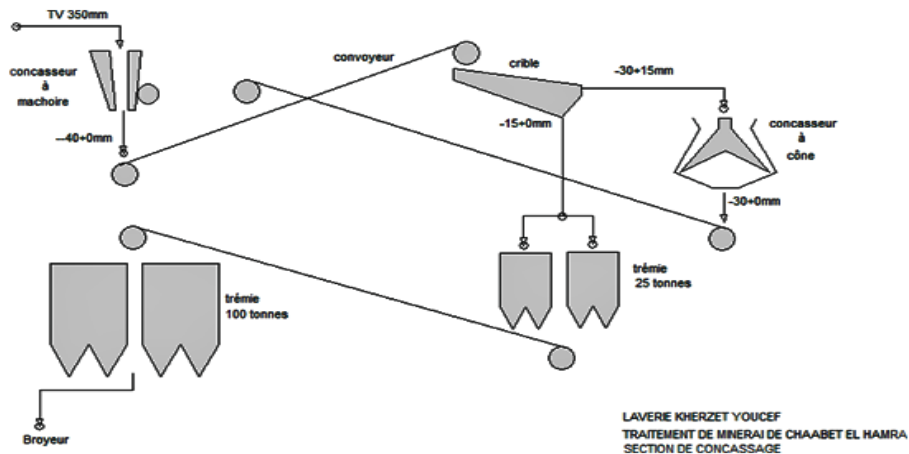


FIGURE 1.8 – Section de concassage – criblage

### 1.12.2 Section de broyage et de classification

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

Le procédé de broyage s'effectue par un broyeur à boulets fonctionnant avec un classificateur mono spiral.

#### 1.12.2.1 Broyeur à boulets

Les broyeurs à boulets sont destinés à moudre des solides en poudres très fines. Ils sont donc habituellement très utilisés pour le broyage fin.[6]

Le broyeur à boulets utilisé au complexe minier à un diamètre de 2100 mm et une longueur de 2200 mm avec un volume de 6,2  $m^3$ . [6]



FIGURE 1.9 – Broyeur à boulets de Kherzet-youcef.[6]

Ce que est très important lors de la première phase de broyage, c'est de s'assurer que les équipements aptes à réaliser la capacité de production voulue et ceci à la base du minerai tout- venant et la classe inférieure à 0,075mm préparée.

Il faut mentionner qu'il existe au niveau de la laverie de kherzet-youcef, un deuxième petit broyeur qui est à l'arrêt et qui nécessite des travaux de réhabilitation. Ce broyeur peut augmenter la capacité de broyage jusqu'au 14 T/h.[6]

### 1.12.2.2 Classificateur

Dans le traitement des minéraux, les composants de classification séparent les particules grossières des particules plus fines et sont également utilisés pour construire des circuits en boucle fermée.

Le type de classificateur est mono spirale telle que le diamètre de la spirale 1200mm.[6]



FIGURE 1.10 – Classificateur mono spirale

## 1.13 Atelier de flottation et de filtration

Il s'agit d'un circuit de flottation simple, à un seul produit (zinc), qui est constitué des étapes suivant :

- \* Flottation principale où dégrossissage de zinc.
- \* Flottation de contrôle où épuisage du zinc.
- \* Trois stades de flottation de relevage du concentré de zinc.

À noter que le pré concentré du <sup>er</sup> relevage et les mousses de l'épuisage sont renvoyés entête du dégrossissage, tandis que les produits non flottés de l'épuisage sont dirigés vers la digue des stériles.

Les mousses du 3<sup>me</sup> relevage, qui constituent le concentré de zinc, sont décantées dans un épaisseur avant de passer à travers des filtres où tambours s'effectue la filtration des produits.

Le drainage des concentrés vers les épaisseur se fait par des pompes à membranes.[ 1]



FIGURE 1.11 – Section flottation – filtration

### 1.13.1 Réactifs utilisés

Pour la flottation de zinc, l'usine de traitement de minerai de Kherzet-Youcef utilise les réactifs suivants :

- \* Régulateur du milieu : la chaux , à raison de 1 à 2.5 kg/t
- \* Activant : sulfates de cuivre à un dosage de 250 à 500g/t
- \* Collecteur : isobuthylxanthate à un dosage de 50 à 150g/t
- \* Moussant : l'huile de pin à un dosage de 25 à 75g/t [ 1]



FIGURE 1.12 – Flottation de minerai de zinc de kherzet-youcef.

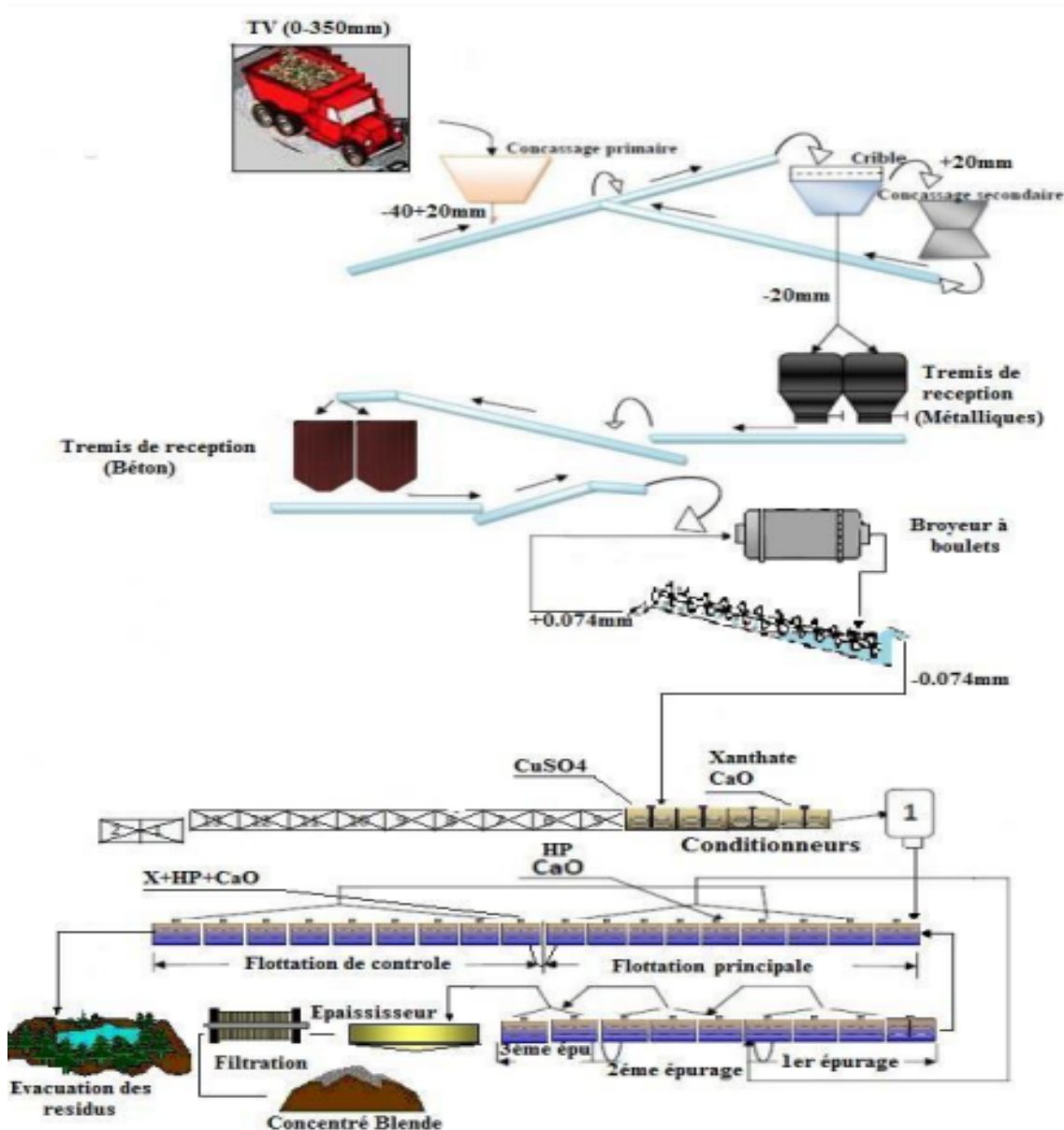


FIGURE 1.13 – Schéma de traitement du minerai dans l'usine KHERZET-Youcef.[6]

## 1.14 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le volet géologique du gisement de Kherzet-Youcef, mais aussi les différents compartiments qui constitue l'usine de traitement et les équipements utilisé pour l'enrichissement du mènèrai Pb-Zn.

## CHAPITRE 2

# Aperçu sur le broyage et la flottation

# Aperçu sur le broyage et la flottation

## 2.1 Introduction

Ce second chapitre présente la théorie de broyage et de flottation. Il définit les lois et les paramètres qui influencent le phénomène du broyage.

Ce chapitre s'intéresse aussi à la description de la méthode d'enrichissement du minerai Pb-Zn qui est la flottation.

## 2.2 Théorie de broyage

### 2.2.1 Les lois énergétiques

Trois principales théories ont été émises pour décrire la relation liant l'énergie consommée ( $E$ ) par le matériau et la réduction de la dimension ( $D$ ) de matériau lors de la fragmentation. Jusqu'à présent les hypothèses avancées pour élaborer cette relation ne sont pas rigoureusement prouvées et qu'on ne sait toujours pas mesurer la quantité d'énergie réellement absorbée par les particules au cours de leur fragmentation. On peut mesurer que l'énergie totale consommée par l'appareil de la fragmentation. [9]

### 2.2.2 Loi de Rittinger

Von Rittinger postule que l'énergie consommée  $E$  est directement proportionnelle à la quantité de surface nouvellement créée, il écrit alors la relation  $1E = Kr(S_2 - S_1)$  Avec  $Kr$  : constante qui dépend à la fois du matériau et de l'appareil de fragmentation  $S_1$  et  $S_2$  surface des particules respectivement avant et après broyage. Si l'on considère l'énergie spécifique par unité de volume. [9,10]

### 2.2.3 Loi de kick

Pour Kick, l'énergie nécessaire pour fragmenter un matériau homogène est Proportionnel à la variation du volume.  $E = K_K \ln(\frac{D}{d})$ [9,10]

### 2.2.4 Loi de Bond

Comme aucune des deux lois précédente ne s'accordait bien avec l'ensemble des résultats observés lors des opérations de fragmentation industrielle, Bond a proposé en analysant une multitude de résultats expérimentaux, une troisième loi qui postule que l'énergie spécifique requise est inversement proportionnelle à la racine carré de la nouvelle surface produite.  $E = K_B(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}})$  .[[9,10]

Les constantes "  $K_R$ ,  $K_K$  et  $K_B$  " sont caractéristiques du produit et de l'appareil. En réalité, l'énergie nécessaire à la fragmentation n'est qu'une faible partie de l'énergie dépensée (moins de 3%), le reste sert à vaincre les frottements, déplacer les produits et absorber les déformations élastiques.

## 2.3 Granularité

La granularité est une notion qui englobe la forme et la dimension des particules. La forme des particules est un paramètre important qui conditionne souvent l'utilisation finale des produits obtenus. La morphologie des particules peut être définie par une série de termes, définis par le Glossary of terms relating to powders : forme aciculaire, angulaire, cristalline.

Ces définitions descriptives sont rattachées à des définitions mathématiques : les indices d'élongation, les facteurs de forme, les facteurs d'épaisseur, les nombres d'angularité, qui font appel à l'analyse d'images. [9]

## 2.4 Broyabilité

La broyabilité d'un matériau peut être définie comme la réaction de ce matériau à l'opération de broyage, conditionnée par les caractéristiques de l'installation de broyage. L'analyse de cette propriété peut s'effectuer de façon qualitative ou de façon quantitative :

- \* Aspect qualitatif de l'aptitude au broyage se traduit par un classement de produits selon leur dureté, la dimension des grains, l'abrasivité, l'adhésivité.
- \* Aspect quantitatif permet d'affecter au produit un indice obtenu après expérimentation, et de le classer par rapport à d'autres échantillons. [9]

## 2.5 But de broyage

Le but essentiel du broyage est de diviser des solides et de réduire la granulométrie des produits étudiés.



## 2.6 Évolution de la surface spécifique

Le mode de broyage, humide ou sec, a une grande importance sur l'évolution de la surface spécifique. D'une manière générale on remarque que la surface tend le plus souvent vers un maximum.

Lors d'un broyage prolongé (plusieurs heures) sur les minéraux présentant une dureté comparable à celles des phosphates, on a observés que la surface spécifique mesurée augmentait jusqu'à une même valeur limite et quel que soit la substance étudié L'augmentation de la surface spécifique est liée également à la différence de broyabilité entre les phases qui compose le produit broyé, les composants les plus durs on tendances à broyer les plus friables par les chocs lorsqu'ils entrent en contact lors du broyage. [9]

Ce phénomène est suivi d'une ré-agrégation de petites cristallites après quelque heure de broyage et entraîne une diminution de la valeur de la surface. Ceci s'explique par le phénomène de ré-agrégation et les phénomènes d'adsorption de surface. Des essais réalisés sur de la dolomie ont montré une décroissance de la surface spécifique en fonction du temps de broyage, qui a été corrélée avec une augmentation du phénomène d'agglomération, vérifié par microscopie.

## 2.7 Variation de la densité

Comme pour la surface spécifique, le broyage prolongé peut se traduire par une diminution de la densité. Des travaux réalisés par Lin sur le quartz montrent que l'on observe une diminution de la densité attribuée à une amorphisation, alors que les broyats obtenus dans l'eau sont plus cristallisés. Cette dernière observation a été expliquée par une dissolution de la partie amorphe dans l'eau. Les diverses variations ont été attribuées également à l'adsorption de molécules gazeuses par les surfaces fraîchement créées ou bien à une introduction de défauts dans le réseau. [9]

## 2.8 Réactions mécano-chimiques du broyage

Si le broyage entraîne une évolution des propriétés physico-chimiques, il peut aussi, lors d'essais prolongés permettre la réalisation de réactions chimiques, dont l'importance n'est pas négligeable dans beaucoup de processus . [9]

Les réactions mécano-chimiques sont régies par un ensemble de phénomènes d'origine physique, du au contact des solides entre eux tel :

- \* Libération de chaleur.
- \* Apparition de hautes pressions.
- \* Production de charges électriques . [9]

### 2.8.1 Conséquences physico-chimiques du broyage

Les phénomènes physico-chimiques qui apparaissent au cours du broyage sont décrits comme jouant un grand rôle sur de nombreuses propriétés :

- \* Accélération des procédés de dissolution,
- \* Augmentation des vitesses de décomposition et de synthèse,
- \* Activation des catalyseurs,
- \* Obtention de composés avec de nouvelles propriétés, séparation d'éléments ayant les mêmes propriétés,
- \* Optimisation des processus existants. [9]

## 2.9 Mécanisme de broyage

La vitesse à laquelle le broyeur tourne est un élément déterminant du processus de broyage. C'est ce paramètre qui va déterminer le régime de fonctionnement du broyeur. La vitesse permet de déterminer à quel moment la masse broyante va se détacher de la surface du cylindre pour retomber sur les granulats solides.

- \* À vitesse réduite, le régime est dit « en cascade ». Dans ce cas, la charge broyante a tendance à rouler jusqu'au point bas du cylindre. Il y a un phénomène d'abrasion des granulats à cause de cette charge broyante qui « roule » tout simplement sur eux. Ce régime induit la production de particules fines. Afin d'éviter l'usure du broyeur à cause de cette même abrasion, il faut augmenter l'épaisseur du blindage, ce qui peut s'avérer coûteux. Ce régime n'est dès lors pas choisi préférentiellement.
- \* À plus haute vitesse, le régime est dit « en cataracte ». La charge broyante est dans ce cas projetée sur les granulats à broyer en une série de paraboles et s'écrase sur ces derniers. La fragmentation produit dès lors de plus gros grains. Cette méthode permet de réduire l'épaisseur du blindage. Ce régime est choisi préférentiellement. Lorsque la vitesse augmente encore, la charge broyante ainsi que les granulats sont plaqués contre les parois et il n'y a plus aucune réduction de taille. Ce point correspond à la vitesse critique du système. En pratique, on choisit une vitesse entre 50% et 90 % de la vitesse critique. Ce choix est influencé par des considérations économiques.[11]

## 2.10 Différents type du broyage

Le broyage constitue une étape clé et essentielle du processus d'extraction des minerais. De toutes les activités d'exploitation minière, le broyage est le processus consommant le plus d'énergie en moyenne. Pour garantir la rentabilité de l'exploitation, il convient de mettre en place un circuit de broyage

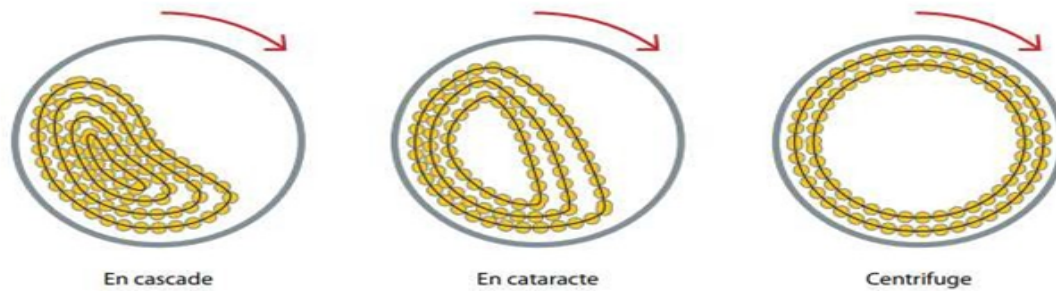


FIGURE 2.1 – Types de mouvement dans un broyeur à boulets

efficace, surtout à l'heure actuelle, face à l'épuisement des ressources mondiales en minerais et à la nécessité grandissante d'exploiter des gisements à faible teneur.

Il existe plusieurs niveaux de broyage, dont les équipements utilisés produisent la Granulométrie souhaitée. Le concassage : il permet d'obtenir des particules de taille au cm, et il est souvent utilisé en Pré-broyage. Il se subdivise en concassage primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire. Ce Dernier est assimilable au broyage grossier. Le broyage grossier : il permet d'obtenir des particules de l'ordre du mm. Le broyage fin : les particules obtenues varient de 10 à quelques centaines de micromètres. Le broyage ultrafin : il est peu utilisé et n'est nécessaire que pour certains types de Recyclage, très spécifiques. [11,12]

**Broyage à sec** : est généralement utilisé lorsque le broyage humide n'est pas favorable au type de roche. En effet, l'eau est susceptible de modifier la structure chimique de certaines roches. Outre cet aspect pratique, le broyage à sec permet de limiter l'usure du broyeur et produira plus de fines. Le broyage humide est la plupart du temps favorisé car son fonctionnement améliore le rendement énergétique par rapport au broyage à sec. En effet, les consommations de puissance sont plus faibles. De plus, le broyage humide permet d'humidifier le milieu qui peut s'avérer utile pour les procédés en aval, et permet de limiter les problèmes de poussière.

**Broyage humide** : favorise le transport des produits et leurs manipulations (utilisation de pompes) Notons néanmoins qu'en pratique, il est nécessaire d'obtenir un taux d'humidité supérieure à 50%. En effet, sous cette barrière, il y a risque de formation de pâtes, et de blocage du broyeur (bourrage). [11,14]

## 2.11 Paramètres de broyage

### 2.11.1 Rapport de réduction

Plus précisément, c'est le rapport des modules granulométriques similaires de la matière, avant et après broyage. Le pourcentage de réduction d'un appareil de fragmentation est défini par la valeur :

$$r = D/d \quad (2.1)$$

\* r : Rapport de réduction

\* D : Dimension du plus gros morceau de l'alimentation [mm].

\* d : Dimension du plus gros morceau après traitement à la sortie de l'appareil [mm].

Les rapports de réduction industriellement réalisables par une seule machine de fragmentation peuvent aller de 4/1 (cas du concassage grossier de roches dures) jusqu'à 100/1 (cas de la plupart des appareils de pulvérisation). Mais toutefois, par défaut de dimension des matières à broyer, on considère l'ouverture de la maille du tamis à travers laquelle on a 80% de passant comme référence de mesure. Le rapport (2.1) devient comme suit :

$$r = D80/d80 \quad (2.2)$$

\* D80 : dimension des 80% des particules de l'alimentation ayant passé à travers la maille tamis .

\* d80 : Dimension des 80% des particules à la sortie de l'appareil de fragmentation ayant passé à travers la maille du tamis. [3,14]

### 2.11.2 Finesse de fragmentation

C'est une caractéristique de la qualité de réduction de taille par un appareil de fragmentation. C'est aussi une caractéristique de l'état de réduction de dimension des particules fragmentées. [12]

### 2.11.3 Capacité de broyage

La capacité d'un broyeur désigne le tonnage traité par heure. [11]

### 2.11.4 Circuits de broyage

Les broyeurs à barres et les broyeurs à boulets sont généralement mis en série dans un circuit de broyage. Car l'un permet d'obtenir des plus gros granulats, qu'on peut ensuite broyer plus finement dans un broyeur à boulets. Des broyeurs mixtes, utilisant à la fois des boulets et des barres, sont également disponibles sur le marché. Ces systèmes présentent les avantages de chacune des méthodes en une seule machine, et permet dès lors d'épargner le fonctionnement d'un broyeur. Comme pour les circuits de concassage, il faut distinguer les circuits ouverts des circuits fermés :

### 2.11.4.1 Circuit ouvert

Ce circuit est généralement d'application lorsque les procédés en aval ne sont pas sensibles aux variations de tailles des granulats. En effet, il n'est pas possible de régler la granulométrie du produit autrement qu'en agissant sur les variables d'entrées du broyeur. Le débit d'alimentation doit dès lors être assez faible pour assurer aux particules un temps de séjour suffisant qui permette au broyeur d'éliminer les plus grosses particules, tout en risquant de sur broyer d'autres particules. [13]

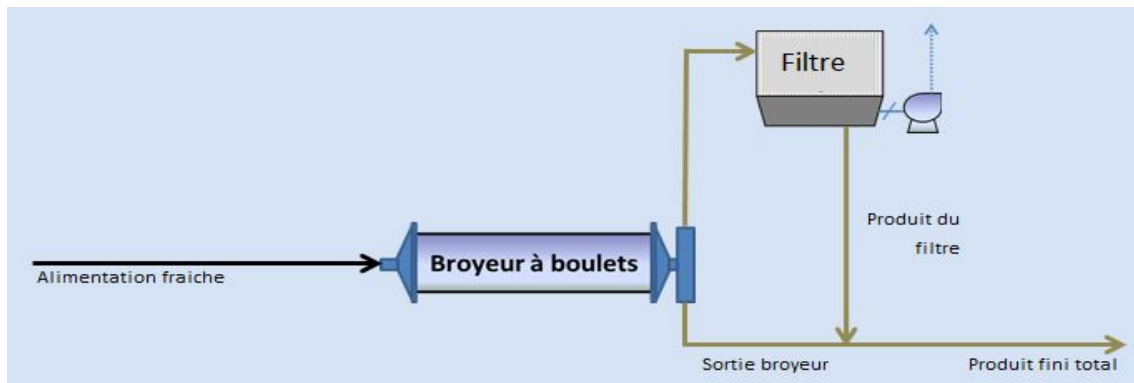


FIGURE 2.2 – circuit de broyage ouvert

### 2.11.4.2 Circuits fermés

Les particules de dimensions convenables sont immédiatement retirées du circuit par un classificateur alors que les morceaux grossiers retournent au broyeur ; Ce qui permet de prévenir tout risque de sur broyage. En conséquence, le temps de séjour des granulats dans un broyeur en circuit fermé est moindre. Le circuit fermé présente donc l'avantage d'être moins consommateur d'énergie. À présent, il y a lieu de différencier le broyage à sec et le broyage humide . [13]

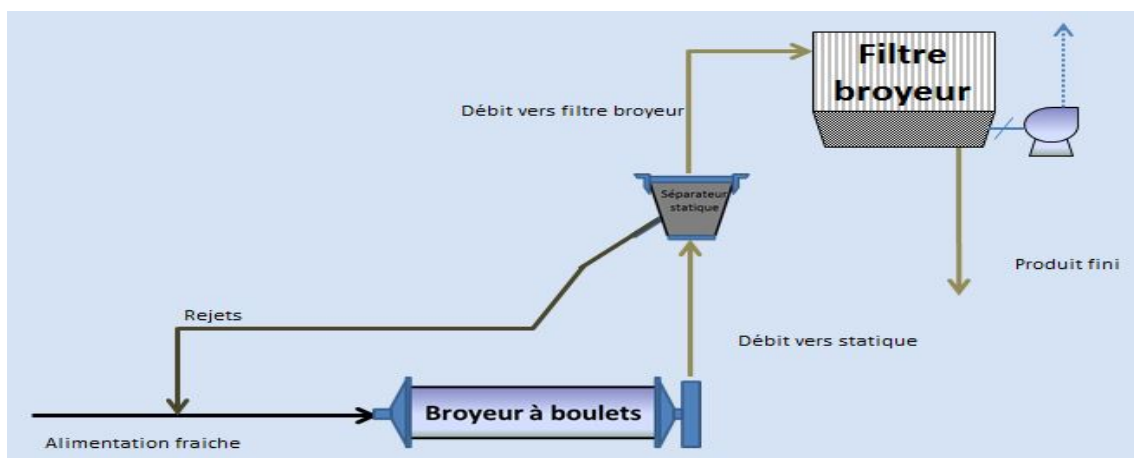


FIGURE 2.3 – Circuit de broyage fermé.

## 2.12 Type de broyeurs

Un broyeur est une machine de broyage des matériaux qui est réalisé par un mariage de deux parties suivante : partie mécanique ; qui comporte une trémie, des axes, des utiles de broyage (Couteaux, lames, marteaux...etc.), un réducteur de vitesse et une carcasse qui assure l'assemblage de tous ces éléments...etc. partie électrique ; qui contienne un circuit de commande (tableau de commande), Et un circuit de puissance (moteur électrique ou thermique).[11]

L'industrie minière fait appel à plusieurs type de broyeurs tel ; le broyeur autogène, le broyeur à barres, le broyeur à cylindre, le broyeur à boulets.[11,12]

Dans mon travail je m'intéresse au broyeur à boulets car il est le type utilisé dans l'usine et dans le laboratoire de l'université de Bejaia.

## 2.13 Broyeur à boulets

Les broyeurs à boulets sont destinés à moudre des solides en poudres très fines. Ils sont donc habituellement très pris pour le broyage fin (ex : ciment). Le broyeur à boulets se compose d'un tambour horizontal partiellement rempli du produit à moudre et des éléments de broyage. Sa paroi intérieure est équipée de barres releveuses qui, comme le nom l'indique, relèvent les boulets afin qu'ils retombent sur le produit à broyer. Les corps broyant sont généralement des boulets d'acier inoxydable : leur efficacité est due à la forte densité de ce métal et à la relative «inertie» de l'inox qui ne contamine pas trop les produits à broyer. Notons que le fer peut altérer certains matériaux bruts : on utilise alors des galets en silex ou en céramique. En général, le tambour est rempli à 30% de sa capacité en boulets. Le broyeur à boulets peut être compartimenté (chambre) ; la taille et la quantité de boulets étant différentes dans chaque chambre afin d'optimiser celles-ci en fonction de la taille du produit qui la traverse. Les broyeurs industriels fonctionnent généralement en continu : ils sont chargés à une extrémité et déchargés à l'autre. [11]



FIGURE 2.4 – Broyeur à boulets [11].

## 2.14 Théorie de flottation

### 2.14.1 Définition

La flottation est le procédé qui permet le traitement d'énormes masses rocheuses en séparant les particules solides entre-elles, la réalisation de cette dernière est possible par la mise en profit des différences existant entre les propriétés superficielles de ces particules (hydrophobie, hydrophile) dans une solution aqueuse en présence de l'air. Ce procédé s'applique aussi pour la séparation solide-liquide (flottation de précipité) et à l'extraction d'ions en solution (flottation ionique).[8]

### 2.14.2 Mécanisme de flottation

Le principe de la flottation des minerais est le suivant : les particules solides sont mises en suspension par agitation dans de l'eau après qu'un broyage en humide, plus ou moins poussé, ait libéré de la gangue l'espèce minérale valorisable. Ce mélange solide-eau (pulpe) est conditionné avec un réactif chimique appelé collecteur, dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface du minéral à flotter, dans le but de lui créer une affinité plus grande pour la phase gazeuse que pour la phase liquide.

On obtient une action sélective du collecteur en faisant appel à des modificateurs, les déprimants et les activant, qui modifient son affinité pour certaines surfaces minérales. Il s'agit alors du procédé de flottation différentielle, permettant par exemple la séparation des sulfures, des oxydes, des silicates, des sels.

La pulpe ainsi conditionnée est introduite dans des réacteurs dotés d'agitateurs aérés (cellules de flottation) ou d'injecteurs d'air (colonne de flottation) ou d'électrodes (électro-flottation) générant des bulles d'air et les dispersant. Les particules rendues hydrophobes se fixent à la surface des bulles qui constituent un vecteur de transport grâce à leur mouvement ascensionnel vers la surface libre de la pulpe. On obtient ainsi une mousse surnageant chargée en solides, appelée écume. La taille des bulles (et en cela l'aire inter faciale liquide-air) et la durée de vie de la mousse sont modulées par l'addition d'un moussant. Le liquide entraîné est drainé par gravité à l'intérieur même de la mousse, laquelle est recueillie par débordement.

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

- \* conditionnement des surfaces des solides par des modificateurs de l'adsorption du collecteur .
- \* Adsorption du collecteur sur la surface d'un solide déterminé ;
- \* Contact entre les particules solides et les bulles d'air .
- \* Transport de l'ensemble bulles-particules vers la surface de la pulpe .
- \* Formation et récupération de l'écume.[1]

### 2.14.3 Réactifs de flottation

Pour la réalisation du procédé de la flottation nous avons besoin de différents réactifs chimique.

#### 2.14.3.1 Collecteurs de flottation

Les collecteurs utilisés industriellement sont des substances anioniques appartenant à la famille des Thio sels. Ces produits, très sélectifs, sont les xanthates et les dithiophosphates.

#### 2.14.3.2 Déprimants (dépresseurs)

Les corps empêchent ou retardent la flottation de certains minéraux et permettent ainsi le déroulement de flottations sélectives. Les déprimants usuels sont :

- \* Le cyanure de sodium déprime la blende et la pyrite et est sans effet sur la galène.
- \* La chaux déprime la pyrite et tout en agissant faiblement vis à vis des autres sulfures.
- \* Les chromâtes et bichromates alcalins dépriment la blende et les sulfures de cuivre. Le silicate de soude déprime les gangues, ce qui est indispensable à la flottation des oxydes nécessitant des collecteurs très énergiques et permettant ainsi de faire remonter les gangues.

#### 2.14.3.3 Activant

Ces corps ont la faculté de pouvoir augmenter l'action des collecteurs sur certains minéraux, ce sont surtout des sels, qui par double décomposition donnent, à la surface des minéraux, une pellicule réagissant avec les collecteurs.

#### 2.14.3.4 Régulateurs

Ils sont destinés à :

- \* Précipiter des sels solubles qui nuisent à l'action des collecteurs (poisons de la flottation) : sels ferreux, ferriques, d'aluminium... etc.
- \* Adapter le pH de la pulpe, ce qui confère une grande influence sur le traitement ; on utilise la chaux, le carbonate de soude et l'acide sulfurique.

### 2.14.4 Circuits et type de flottation

À l'échelle industrielle, la pulpe est alimentée en continu dans des bancs de cellules.

La pulpe peut subir préalablement une étape d'aération ainsi qu'une période de conditionnement suite à l'ajout des réactifs. Les concentrés sont extraits en continu par débordement de l'écume des cellules et les rejets sont acheminés par gravité aux étapes subséquentes du traitement. Un circuit de flottation industriel est composé de plusieurs regroupements de cellules de flottation en série appelés bancs de cellules.[1]



Un banc de cellules est constitué en général de 4 à 8 cellules. Le trajet que suivent la pulpe et les concentrés à l'intérieur du circuit varie d'un procédé à l'autre. La figure suivante présente un arrangement de bancs de cellules pour l'ébauchage et l'épuisage d'un concentré.

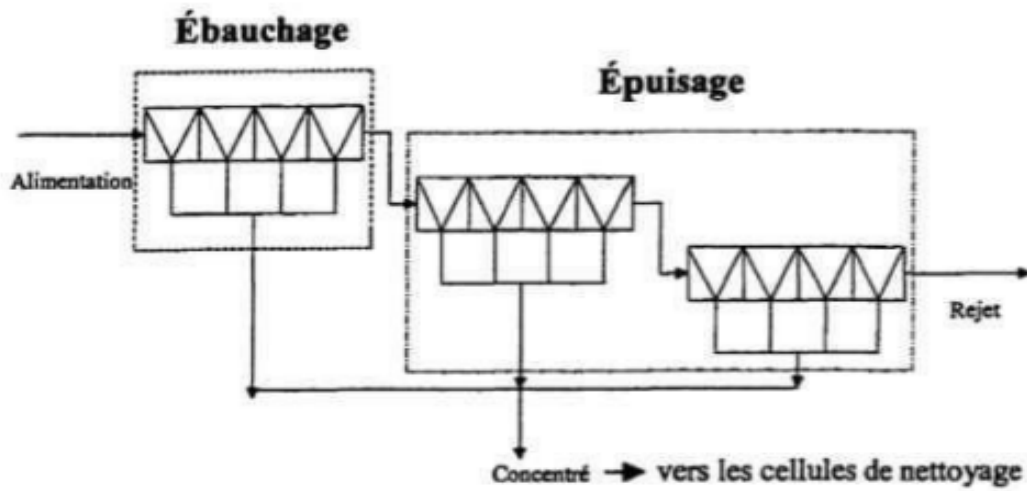


FIGURE 2.5 – Circuit de flottation industriel.

### 2.14.5 Machines de flottation (cellules et colonnes)

Les cellules mécaniques et les colonnes sont les machines de flottation les plus utilisées dans l'industrie minière.

#### 2.14.5.1 Cellule de flottation

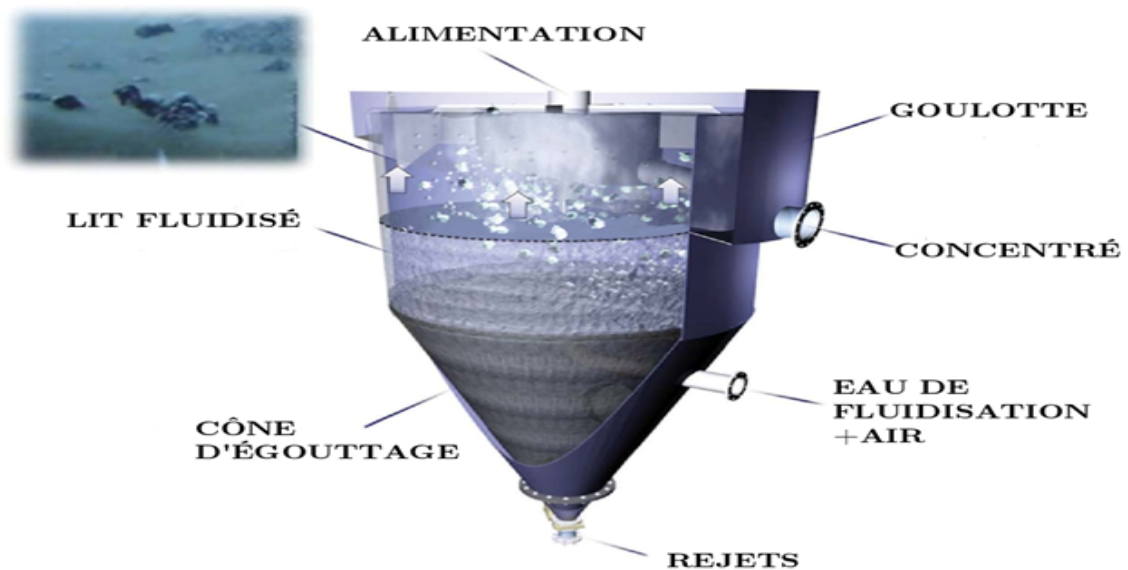


FIGURE 2.6 – Cellule de flottation.

Les cellules mécaniques furent les premiers modèles de machine de flottation utilisée dans l'industrie minière et sont toujours parmi les plus utilisées aujourd'hui.

La cellule comporte une cuve rectangulaire à l'intérieur de laquelle on retrouve un agitateur muni d'un dispositif qui permet l'introduction de l'air dans la cellule. Le réacteur met en suspension les particules pour obtenir un mélange homogène eau-particules, il favorise l'introduction et la dispersion des bulles d'air dans la pulpe afin de maximiser la probabilité de contact bulles-particules.[17]

#### 2.14.5.2 Colonne de flottation

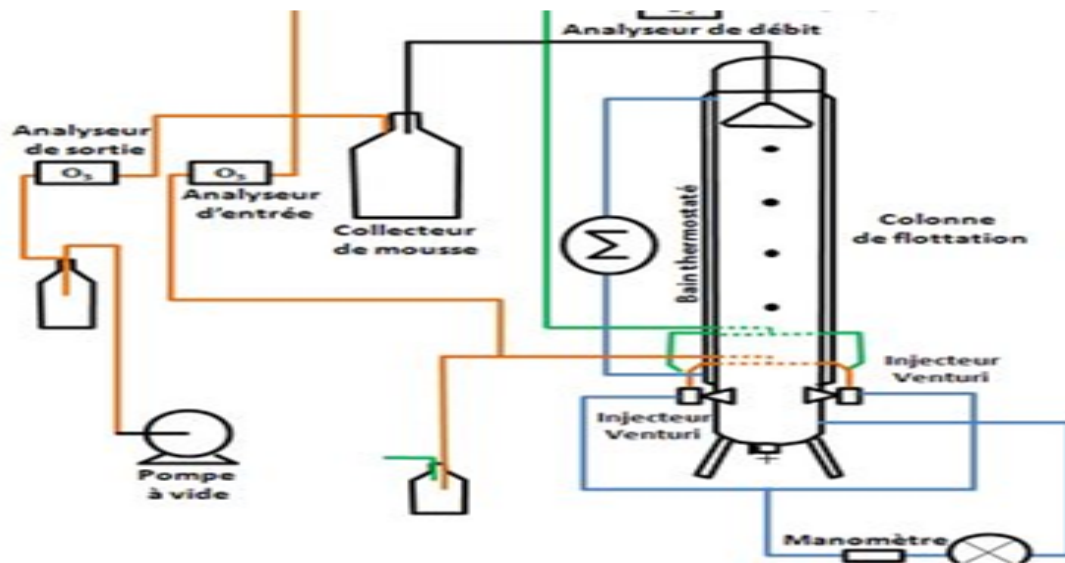


FIGURE 2.7 – Colonne de flottation.

Les colonnes de flottation offrent un moyen d'améliorer l'efficacité de la flottation par mousse. Une colonne fonctionne essentiellement comme s'il s'agissait d'un circuit de flottation à plusieurs étages disposés verticalement, le lixivier s'écoulant vers le bas tandis que les bulles d'air se déplacent vers le haut, produisant un écoulement à contre-courant. La première conception de machine de flottation à utiliser un flux à contre-courant de lixivier et d'air a été développée par Town et Flynn en 1919. Ce n'est qu'avec les travaux de Boutin et Tremblay au début des années 1960 qu'une nouvelle génération de colonnes à contre-courant a été développée qui est finalement devenue industriellement réussie.[18]

## 2.15 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre les paramètres théoriques qu'il faut ajuster pour l'optimisation du procédé du broyage.

Dans la seconde partie nous avons donné un aperçu générale sur la flottation et l'équipement utilisé pour la réalisation de cette méthode d'enrichissement.

# CHAPITRE 3

## Matériels et méthodes

# Matériels et méthodes

## 3.1 Introduction

La flottation est la technique que nous avons utilisée pour l'enrichissement du minerai plomb-zinc de Kherzet-Youcef

Cette technique demande une grande précision en ce qui concerne le choix du dosage des réactifs, la granulométrie du minerai et le temps du séjour.

Ce troisième chapitre est consacré pour la présentation et la description des méthodes d'analyses et les équipements utilisés pour la préparation mécanique et la réalisation de flottation.

## 3.2 Provenance des échantillons

L'échantillonnage est l'opération qui nous a permis l'obtention de plusieurs échantillons représentatifs à partir d'un seul en le divisant suivant des procédures très précises. Cette phase est indispensable dans une opération de valorisation.

Un bon échantillonnage assure la représentativité de l'échantillon ce qui veut dire la préservation des propriétés initiales du tout venant.

Les échantillons de minerai du Pb-Zn étudié ont été prélevés de l'usine de Kherzet Youcef pendant la période de stage effectué dans ce dernier. Ils ont un poids total de 12 kg.

Deux types d'échantillons ont été prélevés ; produit avant broyage qui est en état solide et produit après broyage qui est sous forme de pulpe .

## 3.3 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons est réalisée au niveau du laboratoire du département génie minier de l'université de Béjaia, cette préparation est effectuée avec la réalisation d'opérations qui sont le concassage, l'homogénéisation et de broyage.

Premièrement nous avons séché à l'étuve a une température de  $105^{\circ}\text{C}$ , le produit d'après broyage prélevé à l'usine de Kherzet Youcef pendant une durée de 24 h dans le but d'éliminer l'humidité dans l'échantillon et de lui faire subir une analyse granulométrique.

### 3.4 Concassage

L'échantillon d'avant broyage prélevé dans l'usine de Kherzet Youcef a suivis au niveau du laboratoire un concassage jusqu'à une granulométrie d'environ 2 mm par un concasseur à mâchoire de type laboratoire.



FIGURE 3.1 – Concasseur à mâchoire type laboratoire

### 3.5 Homogénéisation

Pour une homogénéisation efficace il faut donner la même chance pour chaque particule présente dans le lot de l'échantillon. L'échantillon du Pb-Zn étudié est homogénéisé avec le diviseur à riffle du laboratoire de préparation mécanique.



FIGURE 3.2 – Diviseur à riffle

Une fois les échantillons sont homogénéisés, ils vont subir une analyse granulométrie par tamisage.

### 3.6 Broyage

Pour l'opération du broyage qui consiste en la réduction des particules en dimension très fine (en micromètres), cette opération est réalisée avec un broyeur à boulets (à billes) du laboratoire de l'université de Bejaia. Quatre essais de broyage ont été réalisés par voie humide pendant des durées différentes dans le but de déterminer le temps optimal du broyage.

Les produits obtenus sont aussi séchés dans une étuve pendant 24 h, l'échantillon est broyé à l'aide de ce broyeur jusqu'à une granulométrie qui est inférieure à 80  $\mu\text{m}$ .



FIGURE 3.3 – Broyeur à boulets du laboratoire de préparation mécanique de l'université de Bejaia

#### 3.6.1 Mode opératoire du broyage

Données sur les quantités du minerai broyé et l'opération du broyage réalisé Le volume du broyeur est de trois litres ce qui implique que la charge à broyer entre solide, liquide, et billes du broyage doit avoir un litre de volume, donc pour un broyage optimal Nous avons eu besoin de :

- \* 300 ml de solide (minerai)
- \* 300 ml de liquide (eau)
- \* 400 ml de billes de différentes dimensions.

Les billes de différentes dimensions servent à la réalisation d'un broyage très fin car toutes les particules du minerai seront touchées et écrasées par ces billes de différentes dimensions.

Les dimensions et les poids des billes utilisées :

- \* Pour la petite et la moyenne dimension nous avons utilisé 786 g
- \* Pour les billes de grande dimension nous avons utilisé 1572 g .

Ces mesures sont équivalentes à 400 ml de volume.

Le tableau 3.1 montre les différents essais réalisés :

Essai	Temps du broyage	Energie consommée	Vitesse du broyage	Poids de l'échantillon solide avant broyage	Poids de l'échantillon pulpe après broyage
1	20 minutes	29 w	323 ms.-1	689,9 g	1094,3 g
2	40 minutes	29 w	323 ms.-1	656,9 g	1143,3 g
3	60 minutes	29 w	323 ms.-1	660 g	940,5 g
4	80 minutes	29 w	323 ms.-1	670 g	742, 4 g

TABLE 3.1 – Différents essais réalisés .

Une fois l'opération du broyage est terminée, un séchage de 5 a 6 heurs est effectué avec une étuve dans le but d'éliminer l'humidité dans le produit broyé et passé à l'analyse granulométrique pour déterminé le temps optimal du broyage.

### 3.7 Analyse granulométrique par tamisage

Le tamisage est le passage d'un produit solide ou d'une suspension au tamis pour réaliser la séparation et éventuellement l'analyse granulométrique de certains éléments.



FIGURE 3.4 – Tamiseuse du laboratoire de préparation mécanique de l'université de Bejaia

Dans notre travail, l'opération du tamisage consiste à définir les classes granulométriques obtenue après le broyage, ce qui défini, la qualité du broyage mais aussi c'est ce qui va nous permettre d'avoir des résultats en ce qui concerne le degré de broyage donc systématiquement le taux de récupération qui se fait au niveau de l'usine de traitement de kherzet yoyccéf.

La première analyse granulométriques est effectuée pour l'échantillon broyé, prélevé de l'usine kherzet youcef , après une opération de séchage qui a durée 24 h , les résultât de cette analyse sont dans le tableau ci-dessous.

Pour un échantillon de 500 g en plomb-zinc, nous avons pris six tamis de dimensions suivantes : 1 millimètre, 500  $\mu\text{m}$  , 250  $\mu\text{m}$ , 125 micromètres, 63  $\mu\text{m}$  et 45 et avec la tamiseuse du laboratoire de l'université de Bejaia réglée sur une amplitude de trois et pendant 15 minute nous avons obtenu les résultats suivant :

	La dimension du tamis	Le poids de la fraction
500 g d'échantillon plomb zinc	500 $\mu\text{m}$	9,49 g
	250 $\mu\text{m}$	50,51 g
	125 $\mu\text{m}$	150,69 g
	63 $\mu\text{m}$	154,24 g
	45 $\mu\text{m}$	54,24 g
	Fond de tamis	76,39 g

TABLE 3.2 – Analyse granulométriques effectuée sur l'échantillon broyé à l'usine Kherzet Youcef .

L'analyse granulométrique effectuée sur l'échantillon broyé à l'usine kherzet youcef montre que sur les 500 g de l'échantillon nous avons 440 g qui sont inférieure à 125  $\mu\text{m}$ .

### 3.7.1 Résultats d'analyse granulométrique des essais de broyage réalisé

Essai 1 (20 min de broyage)		Essai 2 (40 min de broyage)	
Fraction	Poids de la fraction	Fraction	Poids de la fraction
1 mm	144,73 g	1 mm	93,78 g
500 $\mu\text{m}$	80,32 g	500 $\mu\text{m}$	18,66 g
250 $\mu\text{m}$	205,52 g	250 $\mu\text{m}$	23,56 g
125 $\mu\text{m}$	157,08 g	125 $\mu\text{m}$	210,43 g
63 $\mu\text{m}$	31,65 g	63 $\mu\text{m}$	135,32 g
45 $\mu\text{m}$	0,66 g	45 $\mu\text{m}$	14,31 g
Fond de tamis	0 g	Fond de tamis	0,94 g

TABLE 3.3 – Analyse granulométrique pour l'essai 1 (20min de broyage) et l'essai 2 (40min de broyage) au niveau du laboratoire de l'université.



Essai 3 (60 min de broyage)		Essai 4 (80 min de broyage)	
Fraction	Poids de la fraction	Fraction	Poids de la fraction
1 mm	75, 71 g	1 mm	70,13 g
500 µm	61, 24 g	500 µm	80,31 g
250 µm	74,22 g	250 µm	175,59 g
125 µm	122,27 g	125 µm	87,10 g
63 µm	149, 59 g	63 µm	28,03 g
45 µm	61, 56 g	45 µm	1,57 g
Fond de tamis	9,77	Fond de tamis	0 g

TABLE 3.4 – Analyse granulométrique pour l’essai 3 (60min de broyage) et l’essai 4 (80min de broyage) au niveau du laboratoire de l’université.

L’analyse granulométrique montre que le temps optimal du broyage réalisé au laboratoire de l’université donc le temps qui rend le broyage efficace est de 60 minutes.

La classification granulométrique pour les 4 essais du broyage pendant des durées différentes montre qu’à 60 minutes nous avons un broyage fin car la quantité du minerai qui est inférieure à 63 µm est beaucoup plus importante par rapport aux classifications quantitatives observées dans les autres essais.

Après le tamisage de l’échantillon et la pesée des refus de chaque tamis, une courbe granulométrique est tracée et en fonction de celle-ci, les coefficients d’uniformité  $c_u$  et de courbure  $c_c$  sont effectués.

Le coefficient d’uniformité de Hazen est un indice d’irrégularité de la distribution de la taille des particules. Il est obtenu selon la Norme Française (NFP 18-540) par la formule suivante :[19]

$$c_u = D_{60}/D_{10} \quad (3.1)$$

\*  $c_u$  :Coefficient d’uniformité de Hazen

$D_{60}$  et  $D_{10}$  étant les valeurs lues en abscisse pour les points de la courbe granulométrique correspondant aux ordonnées de 60 % et 10 %. Par conséquent, la référence suivante permet de déterminer l’uniformité de la courbe.

\* Si  $c_u < 3$ , alors la granulométrie est uniforme ou encore serrée.

\* Si  $c_u > 3$ , alors la granulométrie est variée ou encore étalée.

Le coefficient de classement ou de courbure ( $c_c$ ) quant à lui, permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre  $D_{10}$  et  $D_{60}$ . Le coefficient de classement fait appel à la notion de diamètre effectif correspondant au pourcentage de passants placés en indice déterminé à l’aide de la courbe

granulométrique.  $D_{60}$  est le diamètre effectif des particules qui correspond à 60 % de passants,  $D_{10}$  est le diamètre effectif des particules qui correspond à 10 % de passants et  $D_{30}$  le diamètre effectif des particules qui correspond à 30 % du passant.[19]

La détermination du coefficient de classement est donnée par la formule suivante :

$$c_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60}) \quad (3.2)$$

\* Si  $c_c \in ]1; 3[$ , alors la granulométrie est bien Graduée.

\* Si  $c_c \notin ]1; 3[$ , alors la granulométrie est mal graduée.

### 3.8 Essais de flottation du minerai plomb zinc du gisement kherzet youcef

Nous avons réalisé des essais de flottation au niveau du laboratoire LTMGP à l'aide d'une cellule de flottation de type metso comme le montre la figure (3.5).



FIGURE 3.5 – Cellule de flottation pour laboratoire

### 3.9 Cellule de flottation du laboratoire

La cellule est dotée d'un agitateur entraîné par un moteur électrique, l'agitateur est plongé dans un bac (cuve de la cellule). La taille de l'agitateur est variable, selon les besoins de l'application.

L'air est injecté à la base de l'agitateur par aspiration à travers l'axe de ce dernier.

### 3.10 Préparation de l'échantillon Pb-Zn et les réactifs de la flottation

Le minerai plomb-zinc destiné à la flottation doit être finement broyé, sa granulométrie doit être inférieure 75  $\mu\text{m}$ , condition qui est une exigence de traitement par flottation à l'usine.

Nous avons préparé 600 g de minerai finement broyé de plomb zinc pour effectuer 4 essais de flottation avec une quantité de 150 g pour chaque essai.

Les réactifs préparés pour la flottation ont été obtenu de l'usine de Kherzet Youcef pendant la période de stage :

- \* Il s'agit de la chaux, comme régulateur.
- \* Le sulfate de cuivre, comme activant.
- \* L'isobuthylxanthate, comme collecteur.
- \* L'huile de pin, comme moussant.

Les dosages des réactifs sont mentionnés de le tableau (3.5)

### 3.11 Caractéristiques de la pulpe

On a travaillé avec une pulpe épaisse a 30% environs en ce qui concerne les 4 essais, il est a noter qu'avant de commencer la flottation, on agite la peuple pendant 5 min avant d'ajouter les réactifs.

### 3.12 Paramètre de flottation varié

Pour l'amélioration des résultats de la flottation, on a opté pour la variation d'un paramètre clé dans la technique de flottation qui est le temps en fixant le dosage des réactifs.

### 3.13 Conduite des essais de flottation

Pour pouvoir procéder à des essais de flottation, il est indispensable d'atteindre la maille de libération qui permet d'avoir le concentré le plus riche en matière utile, dans notre étude il s'agit du minerai du plomb-zinc.

C'est dans cette optique que nous avons broyé notre minerai jusqu'à une granulométrie inférieure à 63  $\mu\text{m}$  pour une meilleure libération des particules du plomb et du zinc.

#### 3.13.1 Description des conditions communes pour tous les essais

- \* Introduire 150 g de minerai (finement broyé).
- \* Remplir la cellule avec 850 ml d'eau distillé (généralement jusqu'au repère de la cellule).
- \* Mettre en place la cellule au niveau de l'appareil de manière a ce que l'agitateur atteigne el fond de celle-ci.
- \* Mettre l'appareil en marche tout en laissant le robinet d'admission fermé, c'est la phase d'agitation qui débute et elle doit durée environ 3 minutes.
- \* Introduire progressivement de la chaux en ajustant le PH entre 11 - 11.5

- \* Introduire le collecteur amyloxanthate de potassium avec un temps de conditionnement de 2 minutes.
- \* Ajouter l'activant et le conditionner pendant environ 3 minutes.
- \* Ajouter le moussant et le laisser en agitation pour 2 minutes environs.
- \* Ouvrir le robinet d'air et c'est la flottation proprement dite qui commence, le flottant est collecté à l'aide d'une raclette dans un récipient préalablement mis en place.
- \* La récupération de l'écume se fait par raclage manuel.
- \* Enregistrement du temps de flottation qui est le paramètre variable d'un essai à un autre.
- \* On arrête l'essai de flottation en ferment le robinet d'air et en éteignant l'appareil.

Les produits de flottation obtenus sont filtrés dans l'objectif de les préparer pour le séchage et ce-là dans des béchers avec du papier filtre.

Les produits que nous avons obtenus ont subit un séchage pendant une durée de 6h à une tempé-



FIGURE 3.6 – Filtration des produits de flottation

rature de 105°C.

Nous avons effectué quatre essais de flottation, en flottant 150g de minerai Pb-Zn pour chaque essais.

Le tableau (3.5) décrit la condition de la variation du paramètre du temps.

Essai	Temps de flottation	Collecteur	Activant	Déprimant	Moussant
Essai 1	4 min	0.035 g	0.045 g	0.6 g	2 gouttes
Essai 2	7 min	0.035 g	0.045 g	0.6 g	2 gouttes
Essai 3	10 min	0.035 g	0.045 g	0.6 g	2 gouttes
Essai 4	13 min	0.035 g	0.045 g	0.6 g	2 gouttes

TABLE 3.5 – Condition de la variation du paramètre du temps.

Les quantités des réactifs ont été calculées selon les quantités utilisées a l'usine de traitement Kherzet Youcef .

On observant les résultats des essais de flottation, nous constatons que la masse du concentré (flottant)

TABLE 3.6 – Résultats des essais de flottation effectuée sur le minerai plomb zinc de Kherzet Youcef .

Flottation du minerai plomb-zinc		Masse g
Essai 1	Flottant	38.23
	Rejet	105
Essai 2	Flottant	48.07
	Rejet	93.48
Essai 3	Flottant	58.20
	Rejet	90
Essai 4	Flottant	67.2
	Rejet	78.3

augmente avec l'augmentation du temps de flottation, et le phénomène inverse se produit en ce qui concerne les rejets.

### 3.14 Résultats d'analyses granulométriques

En utilisant la règle de trois, on calcule le pourcentage de la masse pour la réalisation des courbes granulométriques.

$$M \text{ total} \rightarrow 100\%$$

$$M_n \rightarrow X\%$$

## 3.14.1 Essai 1 (20 min de broyage)

OUVERTURES DES TAMIS	Masse (g)	Masse %	Passant cumulatifs	Refus commutatifs
1mm	144.73	23.35	76.65	23.35
500 $\mu\text{m}$	80.32	12.95	63.7	36.3
250 $\mu\text{m}$	205.52	33.15	30.55	69.45
125 $\mu\text{m}$	157.08	25.33	5.22	94.78
63 $\mu\text{m}$	31.65	5.11	0.11	99.89
45 $\mu\text{m}$	0.66	0.11	0	100
Fond de tami	0	0	0	0
Total	619.96	100		

TABLE 3.7 – Résultat d'analyse granulométrique pour l'essai N°01 (20Min).

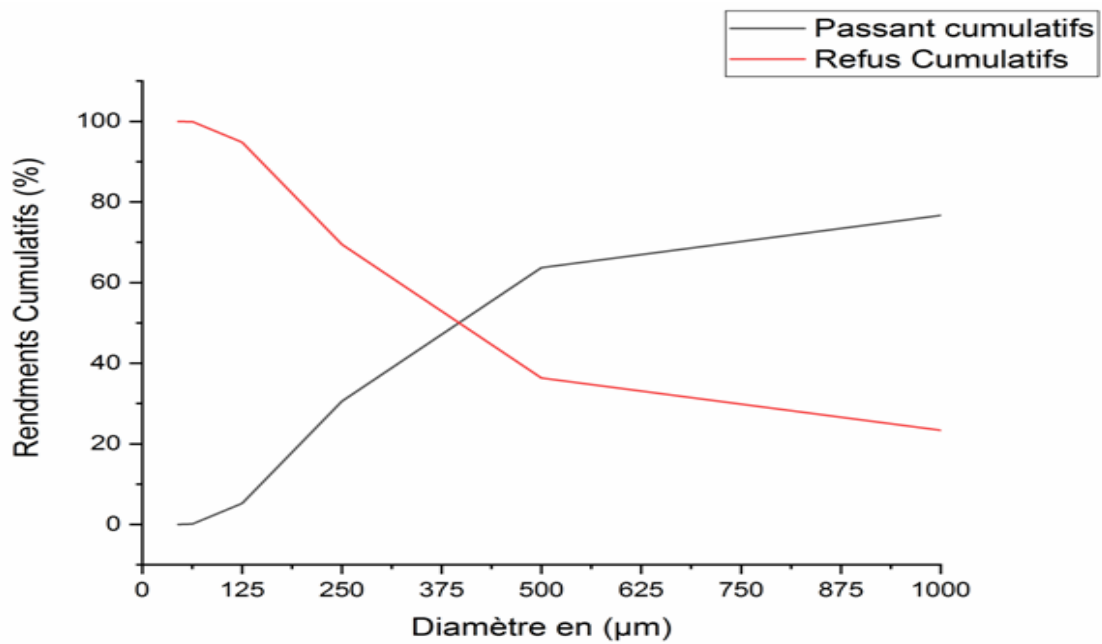


FIGURE 3.7 – Courbe d'analyse granulométrique pour l'essai N°01 (20Min).

## 3.14.2 Essai 2 (40 min de broyage)

OUVERTURES DES TAMIS	Masse (g)	Masse %	Passant cumulatifs	Refus commutatifs
1mm	93.78	18.86	81.14	18.86
500 $\mu\text{m}$	18.66	3.75	77.39	22.61
250 $\mu\text{m}$	23.56	4.74	72.65	27.35
125 $\mu\text{m}$	210.43	42.34	30.31	69.69
63 $\mu\text{m}$	135.32	27.24	3.07	96.93
45 $\mu\text{m}$	14.31	2.88	0.19	99.81
Fond de tami	0.94	0.19	0	100
Total	497g	100		

TABLE 3.8 – Résultat d'analyse granulométrique pour l'essai N°02 (40Min).

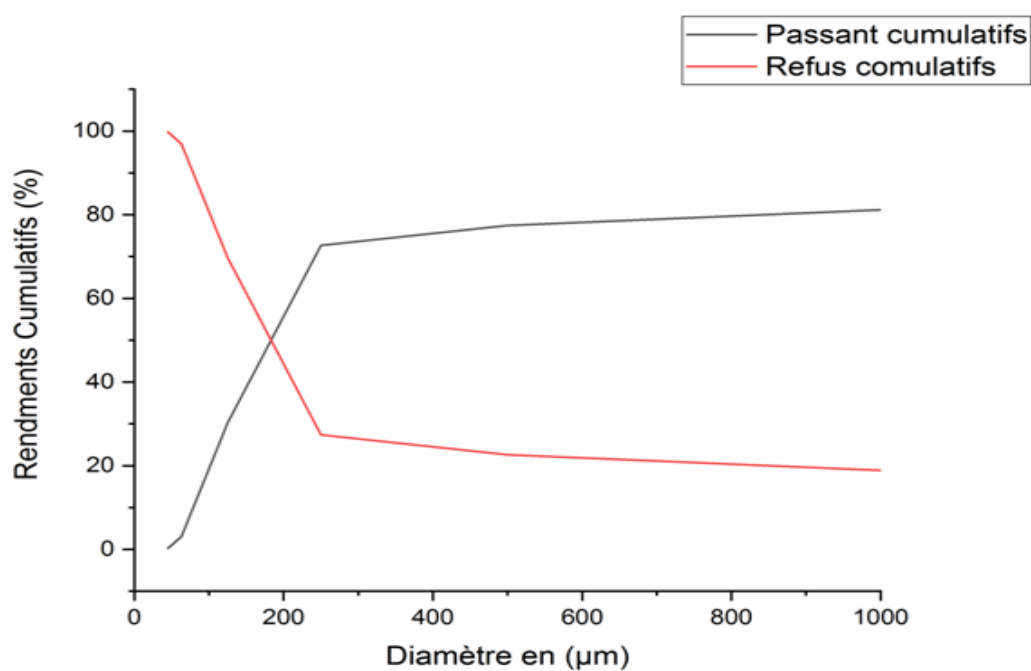


FIGURE 3.8 – Courbe d'analyse granulométrique pour l'essai N°02 (40Min).

## 3.14.3 Essai 3 (60 min de broyage)

OUVERTURES DES TAMIS	Masse (g)	Masse %	Passant cumulatifs	Refus commutatifs
1mm	75.71	13.66	86.34	13.66
500 $\mu\text{m}$	61.24	11.04	75.3	24.7
250 $\mu\text{m}$	74.22	13.39	61.91	38.09
125 $\mu\text{m}$	122.27	22.07	39.84	60.16
63 $\mu\text{m}$	149.59	26.98	12.86	87.14
45 $\mu\text{m}$	61.56	11.10	1.76	98.24
Fond de tamis	9.77	1.76	0	100
Totale	554.36	100		

TABLE 3.9 – Résultat d'analyse granulométrique pour l'essai N°03 (60Min).

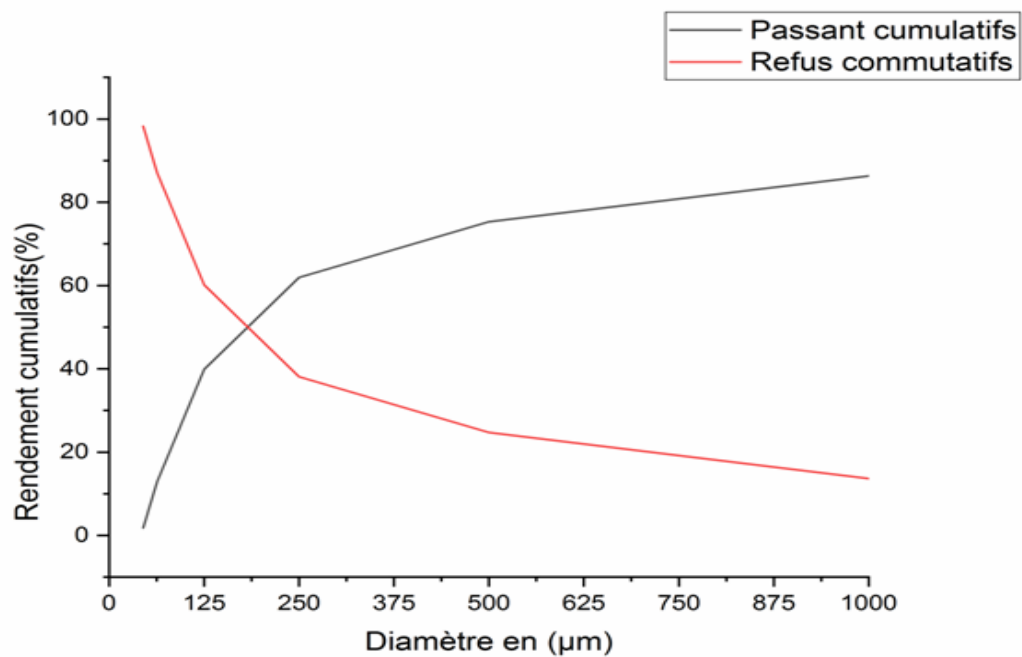


FIGURE 3.9 – Courbe d'analyse granulométrique pour l'essai N°03 (60Min).



## 3.14.4 Essai 4 (80 min de broyage)

OUVERTURES DES TAMIS	Masse (g)	Masse %	Passant cumulatifs	Refus commutatifs
1mm	70.13	15.84	84.16	15.84
500 $\mu\text{m}$	80.31	18.14	66.02	33.98
250 $\mu\text{m}$	175.59	39.66	26.36	73.64
125 $\mu\text{m}$	87.10	19.67	6.69	93.31
63 $\mu\text{m}$	28.03	6.34	0.35	99.65
45 $\mu\text{m}$	1.57	0.35	0	100
Fond de tamis	0	0	0	100
Totale	442.73	100		

TABLE 3.10 – Résultat d'analyse granulométrie de l'essai N°04 (80Min).

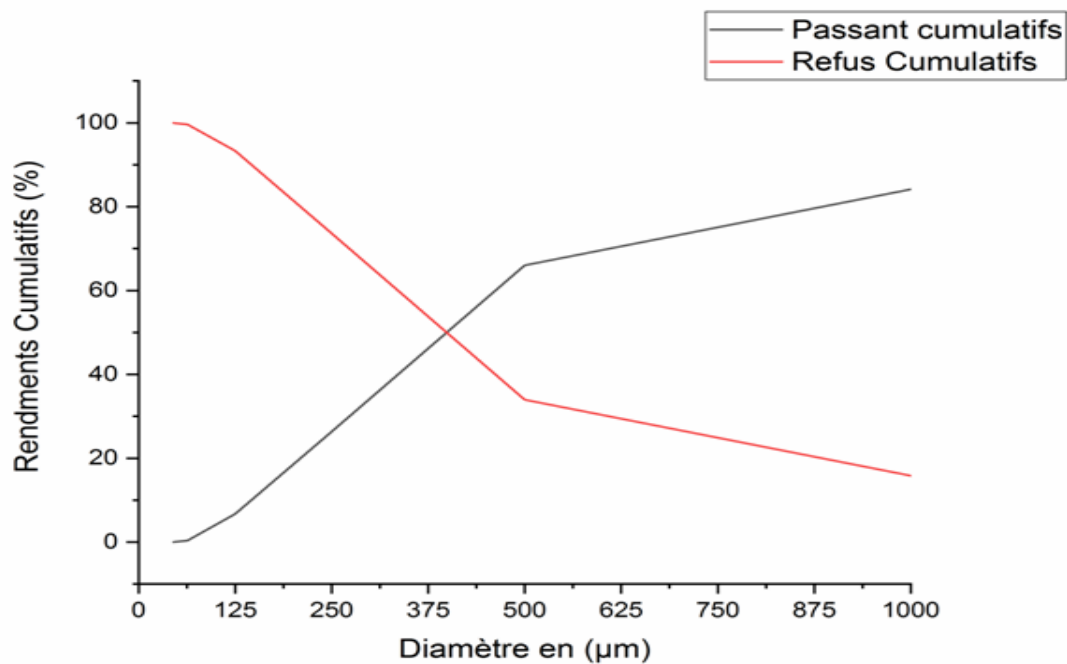


FIGURE 3.10 – Courbe de l'analyse granulométrique pour l'essai N°04 (80Min).

Les quatre courbes de l'analyse granulométrique montrent que le rendement cumulatif de l'essai numéro 03 est le plus important car à 50% nous avons obtenu la fraction la plus fine qui est de 125 $\mu\text{m}$  ce qui n'est pas le cas dans les trois autres essais. En se basant sur les résultats des tableaux de l'analyse granulométrique et les courbes de ces derniers ; il y a lieu de dire que le temps optimal du broyage est de 60 minutes ce qui est l'objectif technique de la réalisation du broyage.

	D10	D30	D50	D60
ESSAI N°01	147.74	246.47	397.40	476.52
ESSAI N°02	80.027	124.49	182.63	215.45
ESSAI N°03	58.82	105.2	182.63	238.7
ESSAI N°04	145.69	271.55	399.22	463

TABLE 3.11 – Diamètres caractéristiques de l'ensemble des essai effectués.

Les coefficients de Hazen  $c_u$  et de Courbure  $c_c$  sont calculés d'après les formules (3.1) et (3.2) citées dans le chapitre précédant.

	ESSAI N°01	ESSAI N°02	ESSAI N°03	ESSAI N°04
Cu	3.23	2.69	4.05	3.17
Cc	0.86	0.89	0.78	1.09
Observations cu	granulométrie étalée	granulométrie serrée	granulométrie étalée	
Observations cc	mal graduée			bien graduée

TABLE 3.12 – Coefficients de la distribution granulométriques de l'ensemble des essai effectués.

### 3.15 Caractérisation des échantillons par DRX

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique d'analyse qui permet d'étudier les différentes phases de matières et matériaux cristallins.

Si l'analyse élémentaire permet d'identifier et de quantifier les éléments chimiques constitutifs d'un matériau, la DRX permet d'accéder à de nombreuses informations contenues dans l'arrangement même des éléments au sein d'un matériau.

L'analyse qualitative par DRX permet ainsi d'identifier le ou les composés cristallisés présents dans un matériau ainsi que leurs formes cristallographiques.

L'analyse quantitative par affinement selon la méthode de Rietveld ou par étalonnage spécifique permet quant à elle de déterminer les teneurs de ces composés à l'état de traces comme à l'état de composés majeurs.

### 3.16 Conclusion

Dans ce troisième chapitre nous avons décrit la partie expérimental de notre travail. tous les procédés réalisés sont décrits méthodiquement ce qui nous a permis la réalisation de la méthode d'enrichissement qui la flottation.

## CHAPITRE 4

### Résultat et discussion

## Résultat et discussion

### 4.1 Introduction

Ce chapitre à pour objectif de présenter l'ensemble des résultats du broyage et l'analyse granulométrique de l'ensemble des fractions obtenues. les résultats sont présentés sous forme de courbes et de tableaux d'analyses granulométriques. Les résultats de la caractérisations minéralogiques par DRX sont exposés sous forme des diffractogrammes ,nous achèverons ce chapitre par une conclusion et perspective.

### 4.2 Résultats de la caractérisation minéralogiques

#### 4.2.1 Fraction 100 $\mu$ m

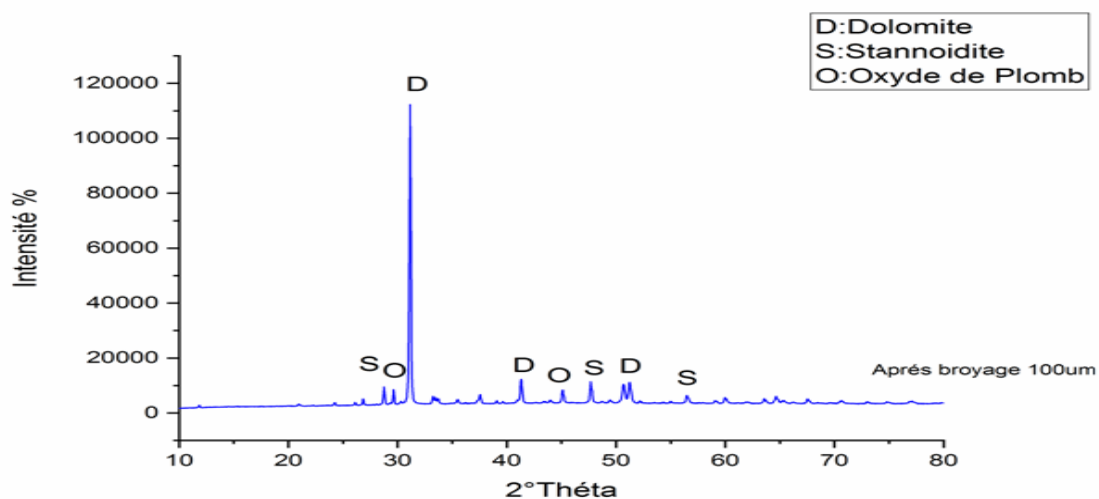


FIGURE 4.1 – Diffractogramme des rayons X de la fraction 100 $\mu$ m.

La figure (4.5) montre les résultats de l'analyse par DRX de la fraction 100 $\mu$ m, d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogiques comme la Dolomite ((CaMg)CO<sub>3</sub>), La Stan-

noidite ( $ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12}$ ), et l'oxyde du plomb avec des traces de tungstène ( $(PbO_6)(WO_3)(PbBr_2)_9$ ).

La dolomite a été observée vers ( $31.04; 2^0\theta$ ), en revanche la Stannoidite est apparue vers ( $28.67; 2^0\theta$ ) et vers d'autres pics moins importantes à  $2^0\theta = 47.62$  et  $56.73$ , en fin l'oxyde du plomb est observé vers ( $29.63; 2^0\theta$ ), ( $25; 2^0\theta$ ) et ( $41; 2^0\theta$ ). Les résultats de l'analyse quantitative ont été présentés dans le tableau (4.5).

#### 4.2.2 Fraction 63 $\mu m$

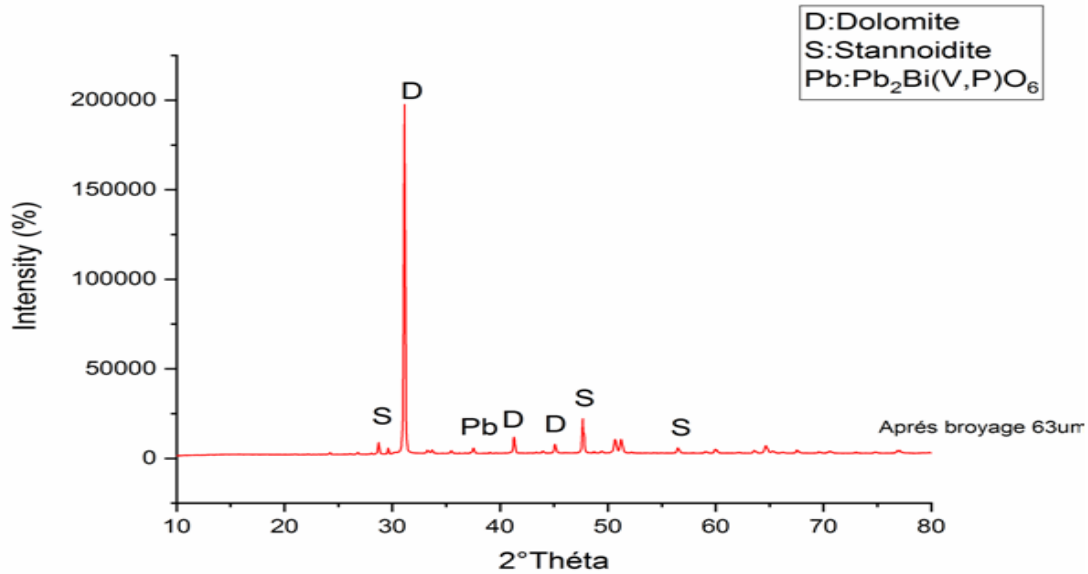


FIGURE 4.2 – Diffractogramme des rayons X de la fraction 63  $\mu m$ .

La figure (4.6) montre les résultats de l'analyse par DRX de la fraction 63  $\mu m$ , d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogiques comme la Dolomite ( $(CaMg)CO_3$ ), La Stannoidite ( $ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12}$ ), et une autre phase minéralogique qui porte un code de référence de 96-153-7222 de formule chimique ( $Pb_2Bi(V,P)O_6$ ).

La dolomite a été observée vers ( $31.04; 2^0\theta$ ), en revanche la Stannoidite est apparue vers ( $28.67; 2^0\theta$ ) et vers d'autres pics moins importants à  $2^0\theta = 47.62$  et  $56.73$ , cette phase minéralogique qui porte un code de référence de 96-153-7222 est apparue ( $19.32; 2^0\theta$ ), ( $30.15; 2^0\theta$ ) et ( $43; 2^0\theta$ ). Les résultats de l'analyse quantitative ont été présentés dans le tableau (4.5).

#### 4.2.3 Fraction 45-61.5 $\mu m$

La figure (4.6) montre les résultats de l'analyse par DRX de la fraction 45 – 61,5  $\mu m$ , d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogiques comme la Dolomite ( $(CaMg)CO_3$ ), La Stannoidite ( $ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12}$ ), et le Minium ( $Pb_3O_4$ )

. La dolomite a été observée vers ( $31.04; 2^0\theta$ ), la Stannoidite a été observée apparue vers ( $28.67; 2^0\theta$ ) et vers d'autres pics moins importantes à  $2^0\theta = 47.62$  et  $56.73$ , en fin le Minium est observé vers

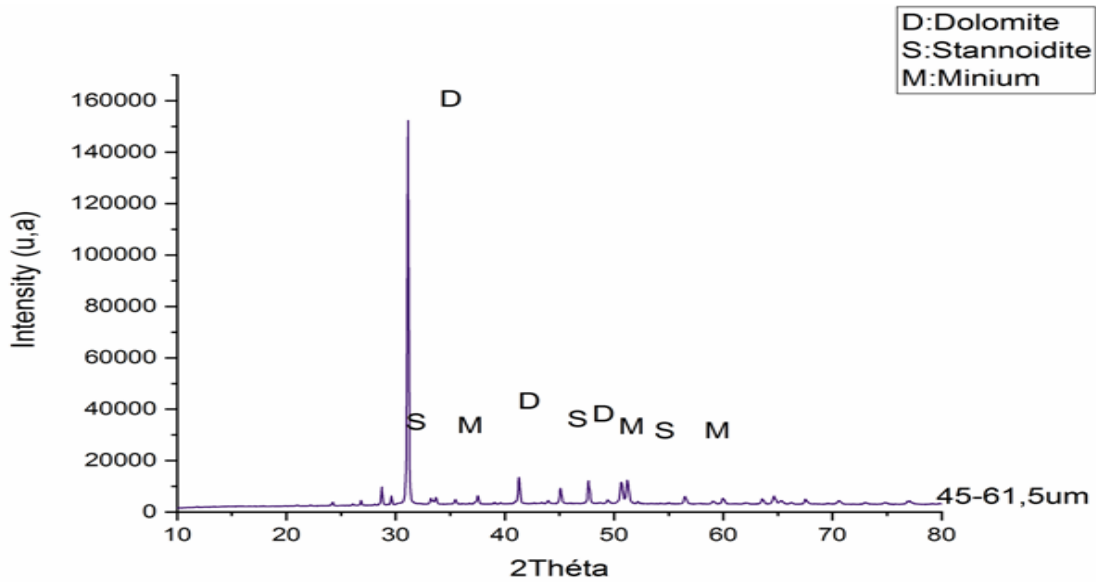


FIGURE 4.3 – Diffractogramme des rayons X de la fraction 45-61.5  $\mu m$ .

(25.97;  $2^{\theta}$ ) et (26.87;  $2^{\theta}$ ). les résultats de l'analyse quantitative ont été présentés dans le tableau (4.5).

#### 4.2.4 Echantillon flottant pendant 4min

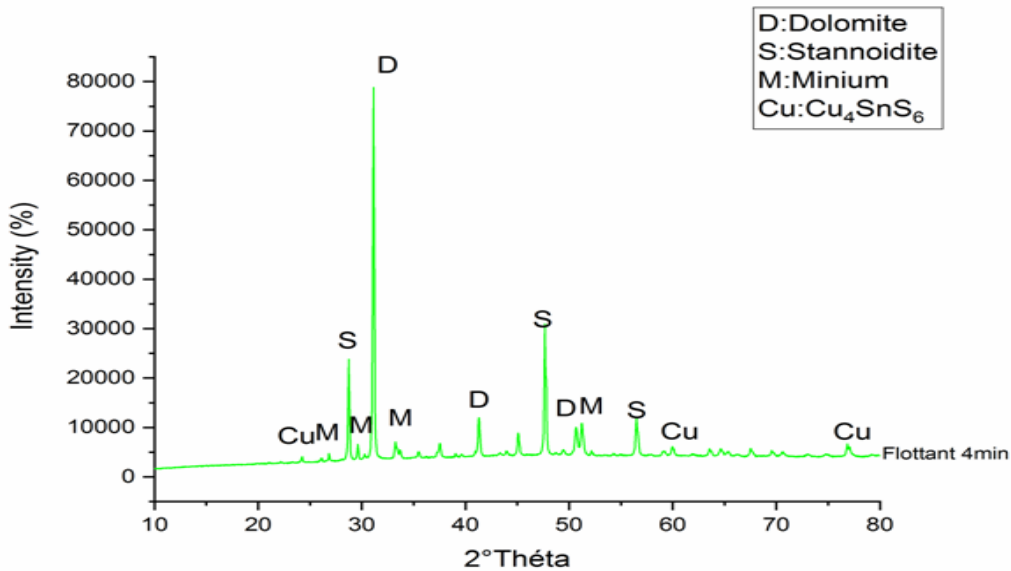


FIGURE 4.4 – Diffractogramme des rayons X de l'échantillon flottant à 4min .

La figure (4.8) montre les résultats de l'analyse par DRX de l'échantillon flottant à 4min, d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogique comme la Dolomite ( $(CaMg)CO_3$ ), La Stannoidite ( $ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12}$ ), et le Minium ( $Pb_3O_4$ ) et une phase minéralogique qui porte un code de référence de 96—152-0945 avec une formule chimique de ( $Cu_4SnS_6$ ).

La dolomite a été observée vers  $(31.04; 2^{\circ}\theta)$ , la Stannoidite a été observée apparue vers  $(28.67; 2^{\circ}\theta)$  et vers d'autres pics moins importantes à  $2^{\circ}\theta = 47.62$  et  $56.73$ , le Minium est observé vers  $(25.97; 2^{\circ}\theta)$  et  $(26.87; 2^{\circ}\theta)$ . La phase minéralogique  $(Cu_4SnS_6)$  a été apparue vers  $2^{\circ}\theta = 29.62$  et  $24.29$ ,  $48$  et  $79$ . les résultats de l'analyse quantitative ont été présentés dans le tableau (4.5).

#### 4.2.5 Rejets de flottation pendant 4min (PC-4min).

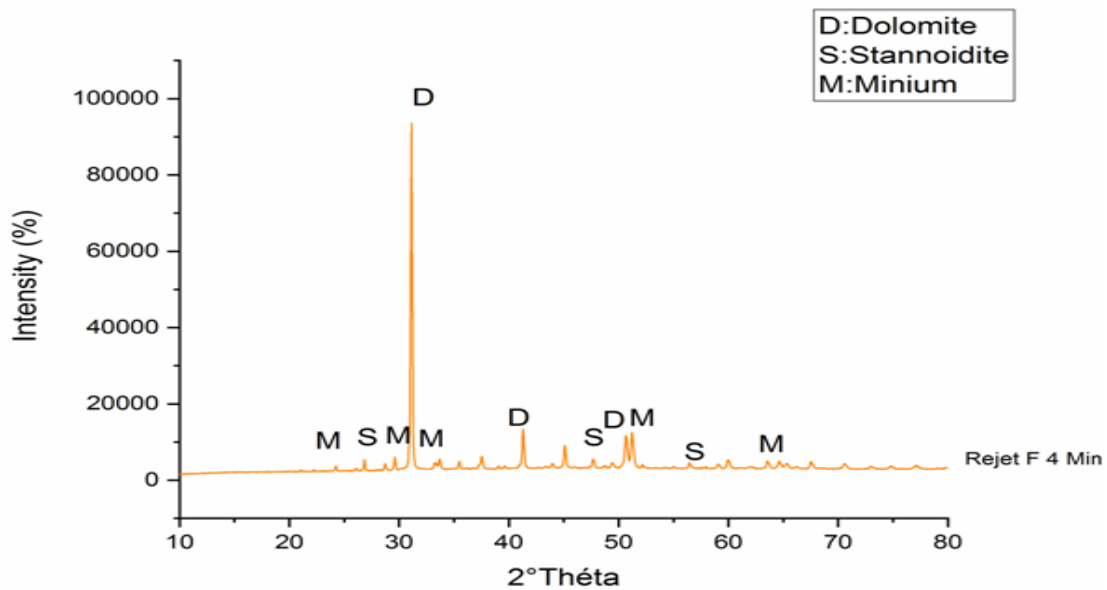


FIGURE 4.5 – Diffractogramme des rayons X de rejets de flottation pendant 4min (PC-4min).

La figure (4.9) montre les résultats de l'analyse par DRX de l'échantillon flottant à 4min, d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogique comme la Dolomite  $((CaMg)CO_3)$ , La Stannoidite  $(ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12})$ , et le Minium  $(Pb_3O_4)$  et une phase minéralogique qui porte un code de référence de 96—152-0945 avec une formule chimique de  $(Cu_4SnS_6)$ .

La dolomite a été observée vers  $(31.04; 2^{\circ}\theta)$ , la Stannoidite a été observée apparue vers  $(26.87; 2^{\circ}\theta)$  et vers d'autres pics moins importantes à  $2^{\circ}\theta = 47.62$  et  $56.73$ , le Minium est observé vers  $25.97^{\circ}$  et  $26.87^{\circ}$ . La phase minéralogique  $(Cu_4SnS_6)$  a été apparue vers  $2^{\circ}\theta = 29.62$ ,  $24.29$ ,  $48$ , et  $79$ . les résultats de l'analyse quantitative ont été présentés dans le tableau (4.5).

#### 4.2.6 Echantillon flottant pendant 10 min

La figure (4.10) montre les résultats de l'analyse par DRX de l'échantillon flottant à 10min, d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogique comme la Dolomite  $((CaMg)CO_3)$ , La Stannoidite  $(ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12})$ , et le Minium  $(Pb_3O_4)$  et l'aktachite de formule chimique de  $(Cu_6Hg_3As_4S_9)$ .

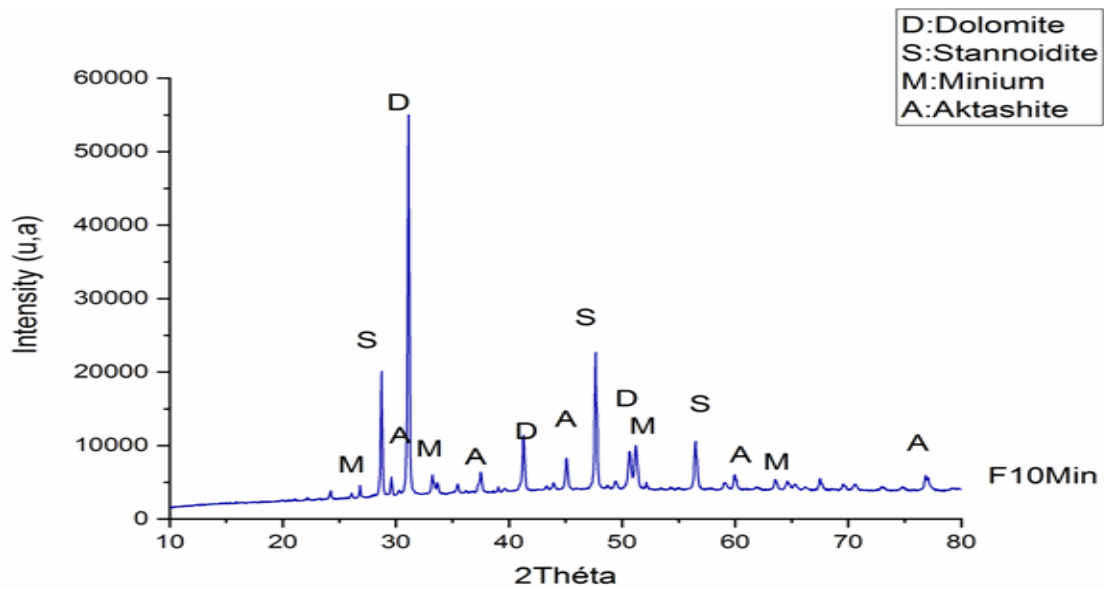


FIGURE 4.6 – Diffractogramme des rayons X de l'échantillon flottant à 10 min.

La dolomite a été observée vers  $31.04^\circ$ , la Stannoidite a été observée apparue vers  $28.67^\circ$  et vers d'autres pics moins importantes à  $2^\circ\theta = 47.62$  et  $56.73$ , le Minium est observé vers  $2^\circ\theta = 25.97$  et  $2^\circ\theta 26.87$ , l'aktachite a été apparus vers  $2^\circ\theta = 28.63, 33.17$ . les résultats de l'analyse quantitative ont été présentées dans le tableau (4.5).

#### 4.2.7 rejets de flottation pendant 10min (PC-10min)

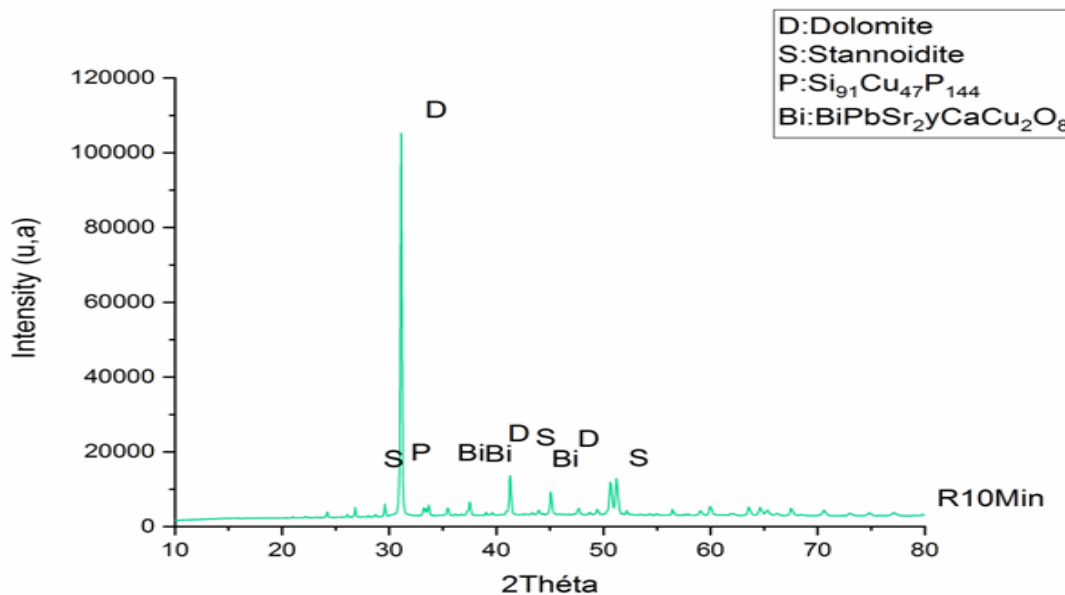


FIGURE 4.7 – Diffractogramme des rayons X de rejets de flottation pendant 10min (PC-10min).

La figure (4.11) montre les résultats de l'analyse par DRX de rejets de flottation pendant 10min (PC-10min)., d'après le diffractogramme on constate la présence des phases minéralogique comme la



Dolomite ( $(CaMg)CO_3$ ), LaStannoidite ( $ZnFe_2Cu_8Sn_2S_{12}$ ), et une phase minéralogique qui porte un code de référence de 01—081-0848 avec une formule chimique de  $(BiPbSr_2Y_0.(Ca_{0.5}Cu_2O_8)$  Et autre phase qui porte un code de référence 96-152-6073 de formule  $(Si_91Cu_47P_{144})$ .

La dolomite à été observée vers  $2^\theta 31.04$ , la Stannoidite à été observée apparue vers  $2^\theta 28.67$  et vers d'autres pics moins importantes à  $2^\theta = 47.62$  et  $56.73$ , la phase 01—081-0848 a été observée vers  $2^\theta = 33.022$ ;  $35$ ;  $40$  et  $47$ , en fin la phase 96-152-6073 a été observée vers  $2^\theta = 29.57$ . les résultats de l'analyse quantitative ont été présentées dans le tableau (4.5).

### 4.3 Résultats de l'analyse quantitative

Le tableau (4.6) montre les résultats de l'analyse quantitative de l'ensemble des échantillons caractérisés par la diffraction des rayons X (DRX).

	100µm	63 µm	45 µm	F4Min	R4Min	F10Min	R10Min
Dolomite	94.1	94	87	79.8	92	78	70.7
Stannoidite	4	5	3	7.2	1	8	1
Minum	0	0	10	11	5	12	0
01-081-0848	0	0	0	0	0	0	25.3
96-152-6073	0	0	0	0	0	0	3
96-152-0945	0	0	0	2	2	0	0
96-153-7222	0	1	0	0	0	0	0
Oxyde de Pb	1.9	0	0	0	0	0	0
Akatachite	0	0	0	0	0	2	0

TABLE 4.1 – Pourcentage des phases minéralogiques présentés dans l'ensemble des échantillons étudié.

D'après le tableau (4.7), on constate la présence de la dolomite dans l'ensemble des fractions analysées avec des pourcentage qui se diminues avec la diminution de la taille des particules allons de 94.1% dans la fraction 100 µm jusqu'à 87% dans la fraction 45 µm en revanche le minium qui n'es pas présenté dans les fraction 100 et 63 µm à montré un pourcentage important dans la fraction 45 µm , ce qui est justifie la libération de plomb à partir de cette granulométrie. La Stannoidite à été observée dans l'ensemble des concentrés et des rejets obtenus après les deux essais de flottation leur pourcentage augmente avec l'augmentation de temps de procédé de la flottation ce qui montre le bon déroulement des essais de flottations , et la même remarque a été attirée pour le minium.

## 4.4 Conclusion

Durant le broyage, la taille des grains se diffère en fonction de temps de broyage, une agglomération des particules a été enregistrés lors du broyage à 40 et 60 minute.

Les résultats de l'analyse par DRX de l'ensemble des fractions étudiées ont montrés la présence de la Dolomite la Stannoidite. Les résultats de l'analyse minéralogique par DRX des échantillons Concentrés par le procédé de la flottation ont montré un bon rendement de la séparation dans l'échantillon flotté pendant 10Min.

Selon les résultats de l'analyse quantitative, la fraction 45 $\mu$ m a montrée un pourcentage remarquable en Minium, sur cela on peut dire que c'est la maille de libération de notre minerai.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

# Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans les études menées sur la valorisation du minerai plomb-Zinc avec la méthode d'enrichissement adéquate pour ce type de martiaux qui est la flottation. Dans notre cas, c'est l'étude de l'impacte du broyage sur le minerai plomb-Zinc du gisement de kherzet Youcef et sa préparation pour la flottation dans une optique d'étude comparative des taux de récupérations qui sont obtenus dans l'usine de traitement minéralurgique du complexe de Kherzet-Youcef.

Dans la partie expérimentale de notre travail, nous avons réalisé la préparation mécanique sur les échantillons du pb-zn, et nous avons déterminé le temps optimal du broyage qui de 60 minutes mais aussi Dans la perspective de préparer ces derniers pour une flottation de qualité, et cela nous a permis la détermination des taux de récupérations. cette phase de ce travail s'est faite avec l'utilisation d'un broyeur à boulets qui nous a permis l'obtention des fractions granulométriques voulues, et évidemment la réalisation d'une flottation qui nous a donné des résultats acceptables.

La réalisation de la flottation nous a permis la préparation des échantillons à la dernière étape de notre travail qui est la caractérisation de ces matériaux dans le but de la détermination des phases minéralogiques où apparaît le plomb et le zinc et cela en s'appuyant sur la technologie de la DRX. Les résultats obtenus ont montré que les procédés utilisés lors de ce travail sont d'une qualité acceptable.

Finalement; les résultats obtenus nous ont éclairé sur le degré de réussite du procédé réalisé à l'usine minière de kherzet-Youcef. On a déduit que les taux de récupérations obtenus dans ce dernier sont acceptables pour le zinc, mais très contesté pour le plomb qui demande un degré de broyage très fin, ce qui n'est pas le cas de cette usine.

En perspective, il y a lieu de dire que le broyage réalisé dans ce dernier doit être amélioré dans l'optique de réussir un taux de récupération important en ce qui concerne le plomb, donc aller jusqu'à la granulométrie qui permet la libération de la maille de ce dernier qui doit être inférieure à 60  $\mu\text{m}$ .

# Bibliographie

- [1] Mehdi Medjitena. *Valorisation des rejets miniers plombo-zincifères de la mine de Kherzet-Youcef (W. Setif) par flottation et pré-traitement gravimétrique*. PhD thesis, 2017.
- [2] Amira Merchichi. *Etude géochimique et traitement des rejets de la digue provenant de la mine de Kherzet Youcef et Chaabet El Hamra*. PhD thesis, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2013.
- [3] Dina Bousdira. *Etude des impacts des activités d'exploitation des mines polymétalliques (Pb-Zn) sur l'environnement de la région de Kherzet Youssef (Wilaya de Sétif)*. PhD thesis, Ecole nationale polytechnique, 2009.
- [4] Emmanuel Dore Mathe and Boukaré Ouedraogo. *Caractérisation des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef (Sétif)*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [5] Lynda Attoucheik. *Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet youssef (setif) et son impact sur l'environnement*. PhD thesis, Alger, 2006.
- [6] Anfel MERABTI and Adnane DERRECHE. *Elaboration d'une méthode de traitement du minerai Zinc de Chaabet El-Hamra (Sétif)*. PhD thesis, 2020.
- [7] Ilyes Hezaimia. *Etude des glissements de terrains liés aux travaux miniers souterrains et leur impact sur l'environnement du sol et sous-sol.(Cas de la mine de Boukhadra-Tébessa-Algérie)*. PhD thesis, 2021.
- [8] Amel BOUSBAINÉ and Sara DJAFIA. *CONTRIBUTION à L'AMELIORATION DES INDICES DE PERFORMANCE DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT PAR FLOTTATION DU MINÉRAI SULFURE DE KHERZET YUCEF-SETIF*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie Amar Laskri. Annaba, 2020.
- [9] Belkacem Touahri. *Géochimie et métallogénie des minéralisations à plomb et zinc du Nord de l'Algérie*. PhD thesis, Paris 6, 1987.
- [10] Abderrahmane HENNI. *Minéralogie, géochimie et métallogénie du gisement pb-zn de kherzet youcef. Mémoires du Service géologique de l'Algérie, (9) :77–116, 1998.*

- [11] Khadidja Boubezari, Anis Boutafenouchet, and A Encadreur Bouzenoune. *Analyse comparative des caractères pétrographiques, minéralogiques, granulométriques et géochimiques des minerais de phosphates beiges et noirs du gisement de Kef es Sennoun (Djebel Onk, Tébessa, Algérie nord orientale)*. PhD thesis, Université de jijel, 2022.
- [12] Marie Debacq. *Opérations sur les solides pulvérulents*. PhD thesis, Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), 2019.
- [13] Abdelmalek Baamar and Riadh Skhara. *Concasseurs et broyeurs : Types et maintenance*. PhD thesis, Université M'sila, 2020.
- [14] Maxime VENTURELLI (Responsable de Projets). Fragmentation, aide au choix d'équipements permettant la fragmentation de matières solides sur des bases énergétiques. Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD) asbl, 2016.
- [15] Jean-Paul Duroudier. *Réduction de taille des solides divisés*, volume 10. ISTE Group, 2018.
- [16] RAJOELISOA Mbolanoro ANDRIANKAJA Hery Tsihoarana. Etude et conception d'appareils de broyage et de classement en vue de la concentration des dechets de la société kraomita malagasy. Memoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo Ecole superieure polytechnique d'Antananarivo ,2004.
- [17] Adel Filali. *Modélisation d'une cellule de flottation*. PhD thesis, Université Béjaia, 2019.
- [18] A Wies. University of brussels mining department : flotation column system. la colonne de flottation du service d'exploitation des mines de l'ul b. *Annales des Mines de Belgique ;(Belgium)*, 2, 1991.
- [19] Mamadou Thior, Tidiane Sané, Oumar Sy, Luc Descroix, Lat Grand Ndiaye, Abdou Kadri Sambou, Dramane Cissokho, and Boubacar Solly. Caractéristiques granulométriques et dynamique sédimentaire entre les différentes unités géomorphologiques du littoral de la casamance (sénégal). *revue ivoirienne des sciences et technologies*, 2019.

## Résumé

L'Algérie a des réserves considérables en minerai de plomb-Zinc qui s'estiment d'environ de 150 millions de tonnes. Le gisement de kherzet Youcef représente une réserve très importante en matière de ce minerai.

Le minerai de pb-zn exploité au gisement de kherzet Youcef est enrichi à travers des différentes étapes d'enrichissement au niveau de l'usine de traitement.

Au cours de notre étude nous avons essayé de déterminer la maille de libération de ces matériaux par de différentes méthodes analyses minéralogiques dans l'objectif d'optimisation du temps du broyage et son influence sur les produits de séparation, mais aussi le temps efficace de la flottation pour une meilleure caractérisation et une potentielle perspective dans l'objectif de l'amélioration des taux de récupérations.

**Mots clés** : Maille de libération, optimisation, usine d'enrichissement kherzet Youcef, Analyses minéralogiques, minerai Plomb-zinc, broyage, flottation, granulométrie, broyeur à boulets, DRX.

## Abstract

Algeria has considerable reserves of lead-zinc ore, estimated at around 150 million tonnes. The kherzet Youcef deposit represents a very large reserve of this ore.

The pb-zn ore mined at the kherzet Youcef deposit is enriched through various enrichment stages at the processing plant.

During our study we tried to determine the optimal liberation mesh by different mineralogical analysis methods in order to optimise the grinding time and its influence on the separation products, but also the effective flotation time for a better characterisation and a potential perspective in order to improve the recovery rates.

**Key words** : Release mesh, optimisation, kherzet Youcef enrichment plant, Mineralogical analysis, lead-zinc ore, grinding, flotation, granulometry, ball mill, DRX.