

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
École Nationale Polytechnique



Département Génie Minier  
Mémoire de Master  
en Génie Minier

**Désulfuration environnementale des  
rejets de la mine de la mine Kherzet  
Youcef par prétraitement gravimétrique  
(Couloir alluvionnaire)**

**HORRI Hadjer**

Sous la direction de  
**Mme : A. MERCHICHI**

Présenté et soutenu publiquement le  
20/06/2017

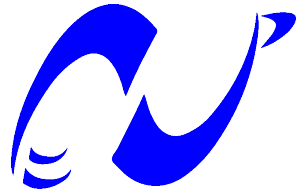
**Composition du Jury :**

Président	Dr. AKKAL Rezki	M.C.A	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteur	Mme. A. MERCHICHI	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Dr. OULD HAMOU Malek	M.C.A	Ecole Nationale Polytechnique

**ENP 2017**



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
École Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier  
Mémoire de Master  
en Génie Minier

**Désulfuration environnementale des  
rejets de la mine de la mine Kherzet  
Youcef par prétraitement gravimétrique  
(Couloir alluvionnaire)**

**HORRI Hadjer**

Sous la direction de  
**Mme : A. MERCHICHI**

Présenté et soutenu publiquement le  
20/06/2017

**Composition du Jury :**

Président	Dr. AKKAL Rezki	M.C.A	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteur	Mme. A. MERCHICHI	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
Examineur	Dr. OULD HAMOU Malek	M.C.A	Ecole Nationale Polytechnique

**ENP 2017**

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو اجراء دراسة حول تنقية نفايات منجم خرزة يوسف.

الغرض من هذه الدراسة هو تقليص كمية الكبريتات في المخلفات بحيث تصبح غير مولدة للحوامض، بتطبيق تقنية التعويم غير الانتقائي.

قمنا بدراسة تأثير عملية المعالجة الثقالية على المعالجة البيئية للكبريتات بالتعويم غير انتقائي، وذلك باستخدام ممر طمي، وتطوير علاج إصلاح نظام الإصدار الألغام Kherzet يوسف، ووضع خطة لعلاج نفايات منجم خرزة يوسف .

**الكلمات المفتاحية:** التعويم، خرزة يوسف، معالجة ثقالية، الكبريتات.

## Abstract

The objective of this work is to carry out a decontamination study of the discharges from the Kherzet Youcef mine.

The aim of this study is to remove the maximum amount of sulphides from these mining residues so that they are no longer acid generators by applying the non-selective flotation technique.

In this study, we studied the influence of gravimetric pretreatment on environmental desulphurization by non-selective flotation, using the alluvial corridor, and to develop a treatment plan for decontamination of mine discharges of Kherzet Youcef.

**Key words :** flotation, Kharzet Youcef, discharges, gravimetric separation.

## Résumé

L'objectif de ce travail consiste à réaliser une étude de dépollution des rejets de la mine de Kherzet Youcef.

Le but de cette étude est de retirer le maximum de sulfures à partir de ces résidus miniers afin qu'ils ne soient plus générateurs d'acide, et ce en appliquant la technique de flottation non sélective avec prétraitement gravimétrique.

Dans cette étude nous avons étudié l'influence d'un prétraitement gravimétrique sur la désulfuration environnementale par flottation non sélective, en utilisant le couloir alluvionnaire, et élaborer un schéma de traitement de dépollution des rejets de la mine de Kherzet Youcef.

**Mots clés :** flotation, Kharzet Youcef, rejets miniers, désulfuration, separation gravimétrique.

# *Dédicace*

*A mes chers parents pour leur amour, soutien, encouragements et sacrifices.*

*A mon cher frère et mes adorables sœurs.*

*A mes beaux-frères.*

*A mon neveu.*

*A ma chère amie Racha qui a toujours été là pour moi.*

*Et à tous mes amis.*

*Hadjer*

# Remerciements

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes.

Nous souhaitons ici les en remercier. Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement Mme MERCHICHI Amira qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'elle nous a prodigués, la patience, la confiance qu'elle nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études. Nous tenons aussi à remercier très sincèrement Mr OULD HAMOU et Mr Akkal qui nous font le grand honneur d'accepter de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

# Table des matières

<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>Introduction Générale</b>	<b>10</b>
<b>1 Présentation de la zone d'étude</b>	<b>11</b>
1.1 Introduction	11
1.2 Situation géographique	11
1.3 Topographie	14
1.4 Aspect climatologique	15
1.5 Traitement au niveau de l'usine	15
1.5.1 Le concassage	15
1.5.2 Le broyage et la classification	15
1.5.3 Flottation et Filtration	15
<b>2 Méthodes de traitement</b>	<b>17</b>
2.1 Introduction	17
2.2 Drainage minier acide	17
2.3 Mesures de prévention du DMA	17
2.3.1 Traitements actifs	17
2.3.2 Traitements passifs	17
2.3.3 Imperméabilisation des résidus	18
2.4 Désulfuration environnementale	18
2.5 Méthodes de traitement	18
2.5.1 Méthodes gravimétriques	18
2.5.2 Désulfuration par flottation	21
2.6 Théorie de la flottation	21
<b>3 Partie expérimentale</b>	<b>25</b>
3.1 Introduction	25
3.2 Enrichissement par nappe pelliculaire fluente (couloir alluvionnaire)	25
3.2.1 Déroulement de l'expérience	25
3.2.2 Résultats de la séparation gravimétrique	26
3.3 Enrichissement par flottation	27
3.3.1 Déroulement de l'expérience	27
3.4 Conclusion	30
<b>Conclusion Générale</b>	<b>31</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>32</b>

# Liste des tableaux

3.1 Réactifs utilisés dans l'essai de flottation . . . . .	28
3.2 résultats de l'essai de flottation . . . . .	29



# Liste des figures

1.1	Situation géographique de la mine de Kherzet Youcef . . . . .	12
1.2	Coupe géologique schématique de la région de Kherzet Youcef. . . . .	13
1.3	colonne stratigraphique de la mine Kherzet Youcef[4]. . . . .	14
1.4	Schéma technologique de traitement plombo-zincifere de la laverie de Kherzet Youcef [1] . . . . .	16
2.1	Position des particules sur la nappe pelliculaire fluente . . . . .	20
2.2	fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air . . . . .	21
2.3	Cellule de flottation[7] . . . . .	23
3.1	Séparation gravimétrique par le couloir alluvionnaire . . . . .	26
3.2	Concentré séché de obtenu par la séparation gravimétrique . . . . .	26
3.3	stabilisation de la pulpe . . . . .	27
3.4	concentré sulfuré obtenu par flottation . . . . .	28
3.5	rendements pondéraux des produits de flottation avec et sans séparation gramétrique . . . . .	29

# Liste des abréviations

*AFNOR* : Association Française de Normalisation

*ANRH* : Agence Nationale des Ressources de Normalisation

*Ba* : Ba

*BRMA* : Bureau de Recherche Minière d'Algérie

*Cc* : Coefficient de Courbure

*Cd* : Cad

*Cu* : Cuivre

*Cu* : Coefficient d'Uniformité

*DMA* : Drainage Minier Acide

*DRX* : Diffraction aux Rayons X

*Eh* : Potentiel d'oxydoréduction

*ENOF* : Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des Substances Utiles

*ETM* : Eléments Traces Métalliques

*ETP* : Evapotranspiration Potentielle

*ETR* : Evapotranspiration Réelle

*Fe* : Fer

*L/S* : Rapport liquide-solide

*Mg* : Magnésium

*Mn* : Manganèse

*MO* : Matière Organique

*MO(WB)* : Matière Organique par la méthode de Wlakley Black

*M<sub>p</sub>* : Masse de la couche de paraffine

*M'<sub>p</sub>* : Masse de l'échantillon recouvert de paraffine

*M<sub>s</sub>* : Masse sèche

*M<sub>w</sub>* : Masse de l'eau

*ONM* : Office National de Météorologie

*ORGM* : Office Nationale de Recherche Géologique et Minière

*PAF* : Perte Au Feu

*PAM* : Potentiel d'Acidité Maximal

*Pb* : Plomb

*PGA* : Potentiel de Génération Acide

*pH* : Potentiel d'hydrogène

*PN* : Potentiel de Neutralisation Brut

*PNN* : Potentiel de neutralisation net

*Pp* : Volume de la paraffine

*UTM* : Universal Transverse Mercator

*V* : volume de l'échantillon

*W* : Teneur en eau

*Zn* : Zinc

# Introduction Générale

L'industrie minière est une activité économique importante et cela depuis de nombreuses décennies. Bien que cette industrie amène des retombées socio-économiques importantes, de nombreux impacts négatifs sur l'environnement en découlent. A court terme, la destruction du paysage naturel, la fragmentation de milieux écologiques sont des impacts négatifs majeurs tandis qu'à long terme, elle peut causer d'importants dommages par l'acidification du milieu communément appelée le drainage minier acide (DMA).

Le cas du complexe minier de Kherzet Youcef où des travaux de recherche réalisés par Belkhiri, 2011 et Aitouchak, 2006, portant sur les eaux souterraines, les sols et les sédiments des oueds de la plaine de Ain Azel, ont confirmé la pollution de la région. Nous nous sommes donc proposés d'entreprendre, dans le cadre de ce projet, à réaliser une étude de dépollution de ces rejets.

L'objectif de cette étude est de retirer suffisamment de sulfures des rejets de la digue du complexe minier de Kharzet Youcef (Ain Azel, W. Sétif), pour que le résidu final ne soit plus acidogène et ne contienne pratiquement de métaux lourds.

Le présent travail est structuré en trois chapitres, dans le premier nous allons présenter la zone d'étude, en décrivant la géologie, la topographie et les caractéristiques climatiques de la région ainsi que les différentes étapes de traitement au niveau de l'usine.

Dans le second chapitre, nous allons d'abord décrire la problématique de la pollution provoquée par les sulfures présents dans les résidus miniers, ensuite expliquer les méthodes de prévention de la génération d'acide, en particulier la méthode de désulfuration par flottation utilisée dans cette étude, ainsi que la méthode de séparation gravimétrique que nous allons utiliser avant de procéder à la flottation.

Dans le troisième chapitre nous allons expliquer les différentes méthodes et procédés que nous avons mis en pratique, présenter les résultats des essais expérimentaux réalisés puis les discuter afin de pouvoir en tirer de bonnes conclusions.

# Chapitre 1

## Présentation de la zone d'étude

### 1.1 Introduction

Ce chapitre présente la zone d'étude et cela dans le but de décrire la géologie et l'hydrogéologie, les différentes structures et installations ainsi que les caractéristiques physiques de la zone et leurs impacts sur le milieu. Le but de ce chapitre est aussi de connaître chacune des étapes par lesquelles passe le minerai depuis son extraction de la mine jusqu'à l'obtention des rejets

### 1.2 Situation géographique

La mine de Kherzet Youcef est située à l'Est de l'Algérie, à 5km au Nord-Ouest de la ville d'Ain Azel, à environ 50 km Sud-Est de la ville de Sétif et de 60 KM Nord-Ouest de la ville de Batna. A côté de la mine Kherzet Youcef sont situées une laverie et une digue de stockage des résidus de traitement. Cette digue occupe une surface de 07ha (ENOF, 2011), recueillant depuis 1979, les résidus de traitement du minerai de Kherzet Youcef et depuis 1994, les résidus du traitement du minerai de Chaabet El Hamra.



FIGURE 1.1: Situation géographique de la mine de Kherzet Youcef

Le gisement de Kherzet Youcef est un gisement stratiforme, à structure monoclinale, se localise dans les formations sédimentaires du Barremien et est associé à une série de dolomies de plates-formes subsidente et instables. Cette série comprend des bancs de dolomies et des intervalles de dolomies marneuses, de marnes et de laminites.

La géologie locale de la mine de Kherzet youcef est caractérisée par la présence d'une grande faille normale, de direction N-S à pendage 65 à 85°, limitant le gisement à l'Est et portant le nom de « faille de Kherzet Youcef ». Le flanc Est de cette faille s'enfonce à une profondeur qui atteint les 700m et est recouvert par des formations terrigènes du tertiaire et du quaternaire.

La tectonique de la région de Kherzet Youcef est cassante avec des fissures diaclases et failles.

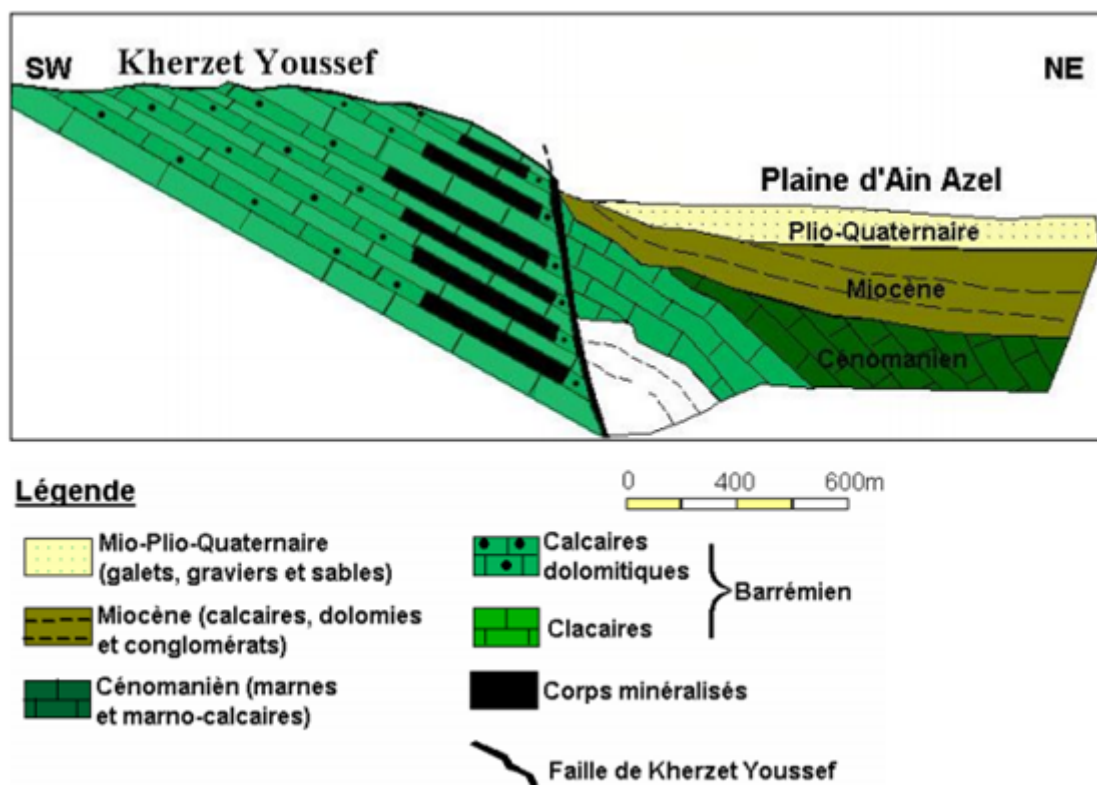


FIGURE 1.2: Coupe géologique schématique de la région de Kherzet Youcef.

Le gisement de Kherzet Youcef comprend une vingtaine de couches minéralisées à des intensités variables dont sept sont exploitables et le reste est en dessous des limites d'exploitabilité.[1]

La série dolomitique métallifère atteint une épaisseur qui varie de 170-190 m. Les minéralisations commencent à 10-30m du mur de la faille de Kherzet Youcef qui limite le gisement à l'Est, le nombre de couches minéralisées est maximum à son voisinage.

Les couches se répartissent dans deux cycles dolomitiques qui composent l'ensemble médian du Barrémien. Ces deux cycles sont séparés par un épisode d'affaissement qui a amené des dépôts réduits tidaux de plate-forme ouverte (marnes, argiles et marno-calcaires noduleux)[2].


La morphologie dominante est celle d'amas stratiformes de runs plus ou moins allongés en direction NNE, leur largeur varie de 60 à 150m. L'amas minéralisé peut atteindre 3m d'épaisseur. Il est à noter que l'intérieur du gisement n'est affecté par aucune tectonique, seules des déformations souples s'observent au niveau du mur de la faille[2].

La série métallifère qui correspond à l'ensemble médian du Barrémien, constitué par une alternance rapide de dépôts qui varient entre un pôle carbonaté, repose sur une série d'alternance de marnes, de calcaires, d'argiles et de grès à intercalation de dolomies. Elle se termine par une quarantaine de calcimicrites argileux à intercalations régulières de marnes, à fragments de grands Lamellibranches et quelques bancs de calcisparites grises massives.

Cette série se différencie en deux faisceaux séparés par 10-15m de calcimicrites à intercalations calcaires à la partie inférieure et à Ostracodes[3]

### 1.3 Topographie

La mine de KHARZET YOUCEF se trouve dans une zone représentée par un ensemble de chainons, dont certains atteignent des hauteurs dépassant les 1500m (Djebel Boutaleb 1886), ces derniers se relient pour former une barrière topographique et climatique entre le nord de l'Algérie et le domaine saharien.



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

FIGURE 1.3: colonne stratigraphique de la mine Kherzet Youcef[4].



## 1.4 Aspect climatologique

La région d'AIN AZEL appartient au sud Sétifien caractérisé par un climat semi-aride, avec un hiver moyennement tempéré et un été chaud et sec.

Le climat de la région est caractérisé par une saison sèche s'étendant sur la plus grande partie de l'année et une saison « humide », avec des précipitations assez faibles par rapport à celles des régions nordiques. Le vent dominant est le sirocco (vent chaud) de direction Nord-Est. Il souffle pendant la période estivale.

## 1.5 Traitement au niveau de l'usine

Le traitement du minerai de la mine de Kharzet Youcef se fait au niveau de la laverie appartenant au complexe minier de Kharzet Youcef qui est l'une des plus grandes réalisations algériennes du domaine minier et cela parce qu'elle présente presque la totalité des méthodes d'enrichissement.

Cette usine a été conçue initialement pour le traitement du minerai plombo-zincifère de la mine de Kherzet Youcef, mais suite aux inondations qui ont causé l'arrêt des travaux d'exploitation dans la mine de Kharzet Youcef, la laverie s'est dirigée vers le traitement du minerai plombo-zincifère de la mine de Chaabet El Hamra.

Le traitement du minerai plomb-zinc se fait à travers 3 étapes principales :

### 1.5.1 Le concassage

Cette première étape commence par un pré-criblage à 80mm du tout-venant qui a une granulométrie inférieure à 350mm, ensuite le concasseur primaire à mâchoire avec une capacité de 400 tonnes traite la fraction supérieure à 80mm.

La fraction inférieure à 80mm et le produit du pré-crible passent par la suite par une deuxième opération de criblage à moins de 15mm, le produit de cette opération est dirigé vers l'étape suivante de la préparation mécanique alors que la fraction supérieure à 15mm passe par un concasseur secondaire de mode giratoire.

### 1.5.2 Le broyage et la classification

Cette deuxième étape concerne le minerai avec une granulométrie inférieure à 15mm, une étape durant laquelle le minerai subit des opérations de lavage, criblage, broyage et classification avec une cadence avoisinant les 15 tonnes/heure Le premier broyeur de cette étape est un broyeur à boulets placé en circuit fermé avec un classificateur à spirale.

Dans le but d'augmenter la réduction des sables du classificateur, un deuxième petit broyeur fonctionne en série avec le premier.

### 1.5.3 Flottation et Filtration

Les concentrés à partir desquels se fait l'extraction des minéraux sont obtenus au bout de cette étape de flottation.

Un circuit de flottation simple à un seul produit est constitué des étapes suivantes :

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

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

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

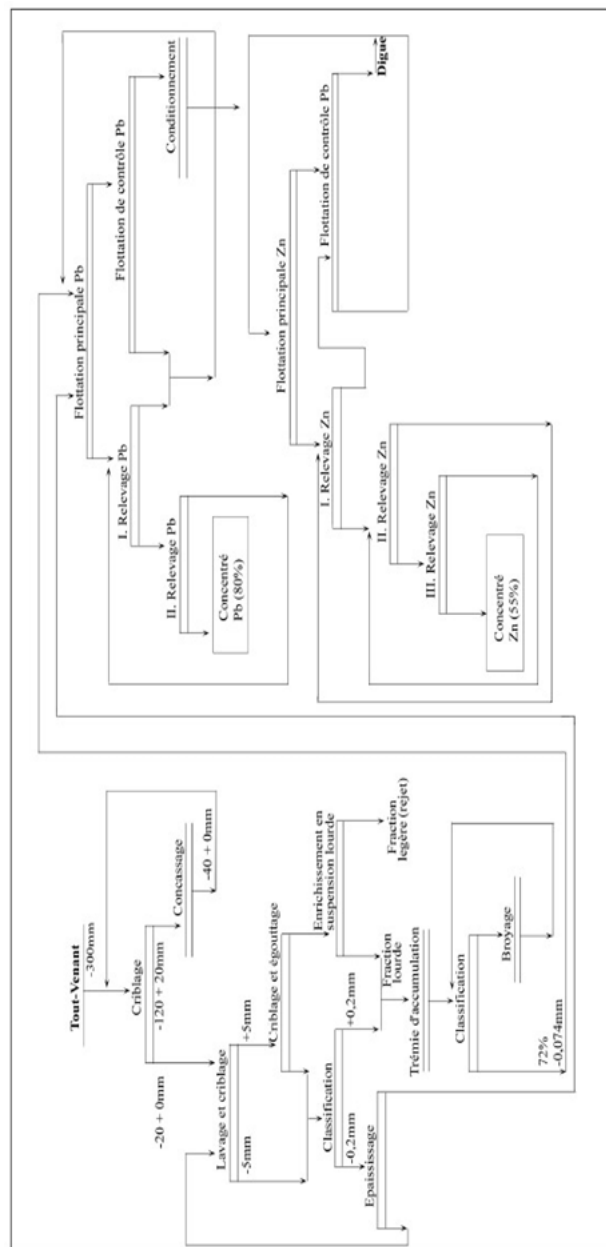


FIGURE 1.4: Schéma technologique de traitement plombo-zincifère de la laverie de Kherzet Youcef [1]

# Chapitre 2

## Méthodes de traitement

### 2.1 Introduction

Il existe plusieurs procédés minéralurgiques d'enrichissement permettant de produire un concentré de la substance recherchée. Dans ce chapitre nous allons expliquer le phénomène de génération d'acide causé par les sulfures présents dans les rejets miniers ainsi que la méthode de désulfuration environnementale. Nous allons aussi mettre en évidence les principaux procédés de traitement utilisés dans notre étude.

### 2.2 Drainage minier acide

Les résidus miniers constituent une source importante de pollution dans la mesure où, riches en sulfures, génèrent des effluents acides qui peuvent être chargés en métaux. Cette acidification est due à l'oxydation des minéraux sulfureux présents dans ces résidus. Il existe plusieurs méthodes de prévention reposant sur trois axes principaux, à savoir limiter la percolation d'eau, limiter la diffusion de l'oxygène ou éliminer les sulfures.

### 2.3 Mesures de prévention du DMA

Plusieurs méthodes de prévention sont proposées dans le but de minimiser les impacts du drainage minier acide sur l'environnement, ou de le traiter. On peut citer :

#### 2.3.1 Traitements actifs

ce type de traitement consiste à récolter les eaux de lixiviation provenant des parcs à résidus miniers et à les canaliser vers un bassin où elles sont traitées chimiquement. De façon générale, les procédés comprennent l'ajout de la chaux afin d'augmenter le pH, une aération afin d'oxyder les ions métalliques en solution et l'ajout de flocculant pour favoriser l'agglomération et la précipitation.

#### 2.3.2 Traitements passifs

Le principe des systèmes de traitement passif consiste à faire circuler les effluents miniers à travers des matériaux ou systèmes vivants qui génèrent suffisamment d'alcalinité pour neutraliser l'acidité et par conséquent diminuer la charge en métaux.

### 2.3.3 Imperméabilisation des résidus

Il s'agit d'empêcher ou de limiter la pénétration d'eau dans les résidus, ou de réduire le contact de l'oxygène avec ces derniers.

Différentes techniques sont proposées : les barrières imperméables à l'eau, soit monocouches ou multicouches et barrières spécifiquement consommatrices d'oxygène. Il est à noter que les matériaux de recouvrement doivent faciliter la revégétalisation et avoir un rôle dans la limitation de l'érosion mécanique (ajout de terre végétale, de blocs rocheux...). L'aménagement de barrières à oxygène est la méthode la plus efficace pour conter le DMA[5].

## 2.4 Désulfuration environnementale

L'objectif de la désulfuration de rejet minier est de retirer suffisamment de sulfures pour que le résidu final ne soit plus générateur d'acide. C'est l'une des techniques utilisées pour prévenir cette production acide et est un procédé qui produit des rejets classés non-acidogènes et qui, conséquemment, rend leur gestion moins contraignante. Le moyen le plus radical pour éviter les effluents acides est bien évidemment de supprimer les sulfures présents. La désulfuration se fait par flottation ou par biolixiviation, il est possible, soit de récupérer les sulfures par flottation, soit récupérer leur contenu en métaux par biolixiviation.

## 2.5 Méthodes de traitement

### 2.5.1 Méthodes gravimétriques

Les méthodes de concentration gravimétriques sont parmi les plus anciennes et les plus utilisées de nos jours. Ce fait résulte d'un ensemble de raisons parmi lesquelles on trouve la simplicité de fonctionnement, la capacité élevée pour des particules assez grosses et les coûts de fonctionnement moindres que par d'autres méthodes. Ces méthodes comportent donc des avantages mais aussi des facteurs d'application. Elles sont employées pour environ la moitié (en débits massiques) de toutes les concentrations, à l'échelle de la planète.

#### Principe

Les procédés de concentration par gravité utilisent l'effet combiné de la masse, du volume et de la forme des particules pour obtenir des trajectoires de particules différentes dans un milieu liquide, statique ou en mouvement. Trois méthodes ont été mises au point industriellement :

#### **-Méthode de la nappe pelliculaire fluente**

il s'agit d'une nappe d'eau de faible épaisseur (quelques millimètres à quelques centimètres) s'écoulant, sur un plan incliné. Les particules, suivant leur vitesse de chute et leur résistance au mouvement, se séparent en plusieurs catégories densimétriques.

#### **Méthode de l'accélération différentielle**

Les particules sont soumises à des oscillations imposées à un liquide. Le mouvement périodique provoque une sédimentation différentielle entre les particules lourdes et légères.

### Méthode des milieux denses

les blocs ou les particules du minerai sont plongés dans un mélange d'eau et de fines particules denses se comportant comme une pseudo-solution appelée milieu dense. Les éléments légers surnagent à la surface, alors que les éléments lourds plongent. Le milieu dense peut être statique ou dynamique.

Les procédés de concentration par gravité deviennent inefficaces lorsque les forces de friction dues à la viscosité du liquide ou aux frottements entre particules deviennent prépondérantes vis-à-vis des forces de gravité (cas des particules de dimensions égales ou inférieures à  $70\mu\text{m}$ ). Toutefois, des procédés ont été développés pour traiter les particules fines, mais ils consistent en un piégeage incomplet des particules denses. La récupération et la capacité de traitement sont médiocres.

Les lois de la sédimentation permettent enfin de juger l'aptitude à la séparation de particules de dimensions identiques, mais de densité différente. Le critère de Taggart, basé sur les conditions d'équivalence en régime turbulent, s'écrit :

Critère de Taggart  $\frac{d_1-p}{d_2-p}$

$p$  : densité du fluide ;

$d_1$  : densité du minéral lourd ;

$d_2$  : densité du minéral léger.

Lorsque le quotient est :

- Supérieur à 2.5, la séparation est facile ;
- Compris entre 1.75 et 1.50, la séparation est possible pour des particules de dimensions supérieures à 0.2 mm ;
- Compris entre 1.50 et 1.25, la séparation n'est possible que pour des particules de dimensions supérieures à 1.65 mm ;
- Inférieure à 1.25, la séparation est impossible.

### Méthodes par nappe pelliculaire fluente

Les méthodes basées sur le principe de la nappe pelliculaire fluente s'appliquent à des appareils très nombreux et très variés, elles comprennent tout autant des appareils très anciens que récents, tout autant simples que complexes. De plus les appareils les plus modernes peuvent effectuer de la concentration sur des minerais dont la granulométrie est très petite en comparaison. Ces appareils sont le couloir d'alluvionnement, le cône de Reichert, la spirale de Humphreys, la table à secousses et les séparateurs centrifuges.

### Principe

La concentration par nappe pelliculaire fluente est basée sur la longueur de parcours effectué par une particule sur un plan incliné, fixe ou mobile, à la surface duquel s'écoule, par gravité, un film liquide. La poussée exercée par le film est proportionnelle à la section de la particule perpendiculaire au mouvement. La taille de la particule, sa densité, sa forme interviennent dans le déplacement au même titre que la pente et la rugosité de la surface, l'épaisseur et la vitesse d'écoulement du film d'eau[6].

D'une manière générale, la séparation est provoquée par le jeu de deux facteurs :

- Le premier est le temps que met la particule pour rejoindre la surface du plan incliné. Ce temps est fonction de la densité, de la taille et de la forme des particules, ainsi que la nature de l'écoulement ;

- Le second est la résistance qu'offrent les particules, une fois qu'elles ont atteint le plan incliné, au déplacement imposé par le mouvement de la nappe pelliculaire fluente.

Trois caractéristiques physiques des particules minérales jouent un rôle primordial dans la séparation par nappe pelliculaire. Ces caractéristiques sont : la densité, le volume et la forme des particules.

Les particules se disposent suivant leur position la plus stable, offrant une section transverse minimale au courant liquide et une résistance maximale à des mouvements qui tendraient à les retourner. Ainsi, dans un mélange de particules de même densité, soumis à l'action d'une nappe pelliculaire fluente, les particules plates s'arrêtent les premières, les particules cubiques vont plus loin, avec les particules rondes. Ce caractère est d'autant plus affirmé que le plan incliné offre une surface rugueuse qui augmente le coefficient de friction dynamique entre la surface et les particules.

Lorsqu'on utilise un appareil conçu sur le principe de la nappe pelliculaire fluente, le résultat est l'obtention d'un lit de particules stratifié selon la masse volumique. Le lit de particule est alors séparé en trois strates assez distinctes, soit une strate supérieure constituée des particules de faible masse volumique, une strate inférieure composée des particules de plus grande masse volumique, et enfin, une strate intermédiaire formée d'un mélange de particules de haute et de basse masse volumique.

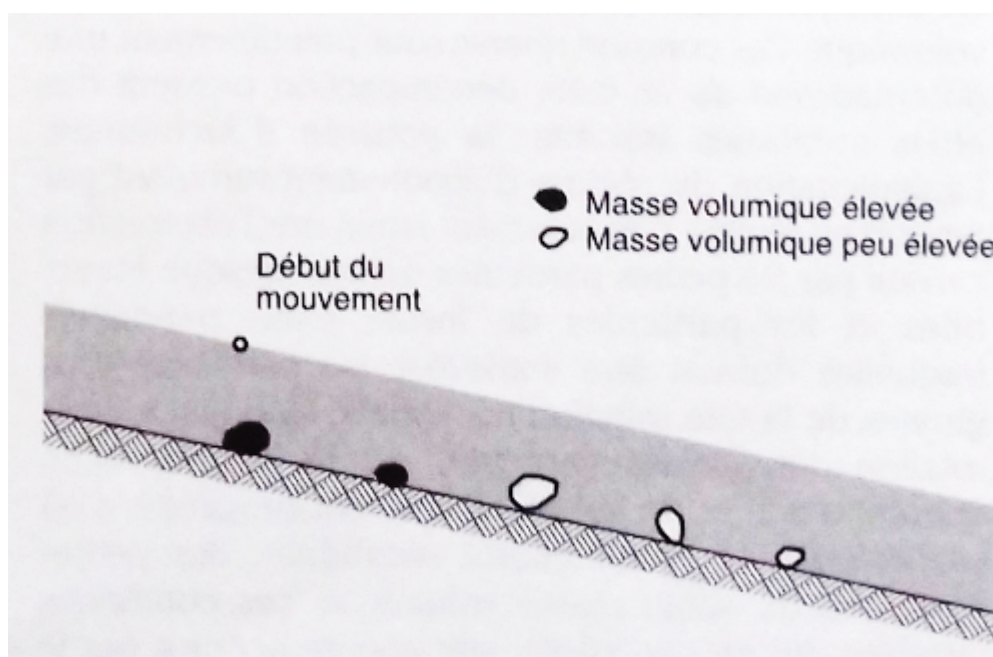


FIGURE 2.1: Position des particules sur la nappe pelliculaire fluente

### Principe de fonctionnement du couloir alluvionnaire

Le couloir alluvionnaire est l'un des appareils hydrauliques les plus simples, il s'agit d'un dalot fixe dont l'inclinaison est réglable.

La pulpe est introduite à l'entrée où le dalot est alimenté par un débit d'eau constant, qui s'écoule vers la sortie pendant que les particules stratifient selon leur masse volumique, les plus denses se trouvent piégées au fond du dalot.

Les particules légères, emportées par le courant, sont récupérées à la sortie comme rejet. Puis, la récupération des particules plus denses s'effectue en les soutirant à partir de l'entrée.

Le fonctionnement du couloir alluvionnaire est conditionné par plusieurs paramètres :

- L'inclinaison :
- Le débit d'eau d'alimentation
- Le temps de séparation

## 2.5.2 Désulfuration par flottation

La flottation est une technique de traitement physico-chimique basée sur les propriétés superficielles des particules minérales. Il s'agit de mettre en suspension dans de l'eau les particules de minerai, puis un conditionnement de cette pulpe avec des réactifs chimiques est nécessaire afin d'améliorer l'efficacité du procédé de flottation. La pulpe est introduite dans un appareil en agitation continue. Les particules devenues hydrophobes se fixent sur les bulles d'air et l'ensemble « particule + bulle » flotte à la surface de la cellule dans une écume formée par un agent moussant. Ces particules sont récupérées en recueillant la mousse résultante.

## 2.6 Théorie de la flottation

La théorie de la flottation est essentiellement liée aux différences entre les propriétés physico-chimiques des surfaces des substances mises en contact, dans lequel les particules hydrophobes (difficilement mouillables) s'attachent à des bulles d'air et se concentrent dans une mousse alors que les particules hydrophiles (facilement mouillables) restent en suspension dans l'eau.

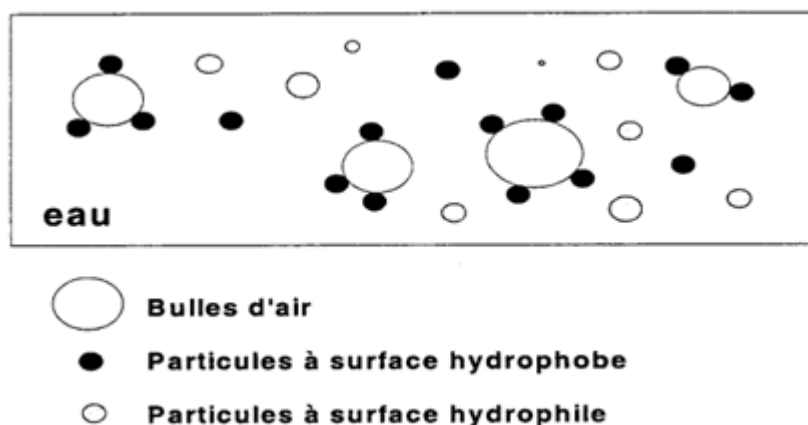


FIGURE 2.2: fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air

### Préparation de la pulpe

Avant de procéder à la flottation, la pulpe doit subir une certaine préparation, de l'eau est habituellement ajoutée au matériau afin d'avoir une pulpe contenant de 5 à 50% de

solides sur une base massique. Puisque la flottation est un phénomène de surface, il faut s'assurer que le matériau soit exempt de toute agglomération. Pour ce faire, la pulpe est introduite dans un réservoir de conditionnement, où une agitation continue et constante est maintenue, afin d'assurer l'homogénéité de la pulpe.

### **Réactifs chimiques**

Les réactifs chimiques sont utilisés afin d'augmenter l'hydrophobie des particules à concentrer sous forme de mousse par ajout du collecteur, et de diminuer la tension superficielle de l'eau par ajout de moussant. L'augmentation de l'hydrophilie des particules qui restent en suspension peut être assurée par ajout de déprimants. D'autres agents de réglage peuvent être ajoutés, notamment les activants et les régulateurs de pH.

#### **Collecteur**

Le collecteur est une substance organique qui agit sur la surface des particules à concentrer et le rend hydrophobe, facilitant ainsi son attachement à une bulle d'air.

#### **Activant**

Généralement employé avant l'ajout du collecteur, un activant est réactif qui contribue à une meilleure fixation de ce dernier sur les surfaces minérales.

#### **Déprimant**

Le rôle d'un déprimant est d'annuler l'effet du collecteur sur certaines surfaces minérales précises, il s'agit des particules qu'on ne désire pas flotter.

#### **Régulateur de milieu**

Ce sont des réactifs servant à la régulation du pH de la pulpe ainsi que l'élimination des ions indésirables.

#### **Moussant**

Un agent moussant est une substance organique hétéropolaire qui favorise la fixation et la minéralisation des bulles d'air sur la surface de la cellule évitant ainsi qu'elles n'éclatent et que les particules minérales qui y sont collées ne retombent en fond de cellule. Le moussant permet ainsi l'obtention d'une mousse stable, solide et facilement abattable à son extraction.

### **Exigences aux réactifs de flottation**

Les réactifs de flottation doivent être :

- Non coûteux
- Non déficitaires
- Stables lors du stockage
- Solubles dans l'eau
- Non toxiques
- Leur action doit être sélective



- Leur qualité doit être standardisée

## Appareils de flottation

### Cellule de flottation

La cellule de flottation est essentiellement constituée d'un réservoir, dans lequel une turbine est entourée de chicanes, dont l'un des rôles est d'assurer l'homogénéité de la pulpe. L'air provient de l'axe de la turbine et l'aération peut se faire de deux façons. Elle peut se faire de façon indépendante par la pression négative générée par la rotation très rapide de la turbine qui aspire l'air ou par l'injection d'air à l'aide d'une soufflante à faible pression. L'air est ainsi introduit dans le système, puis dispersé sous forme de fines bulles grâce à l'action combinée de la turbine et des chicanes. Le concentré, constitué de mousse chargée de particules hydrophobes, est recueilli à la surface de la cellule, généralement à l'aide d'un dispositif appelé écumeur.

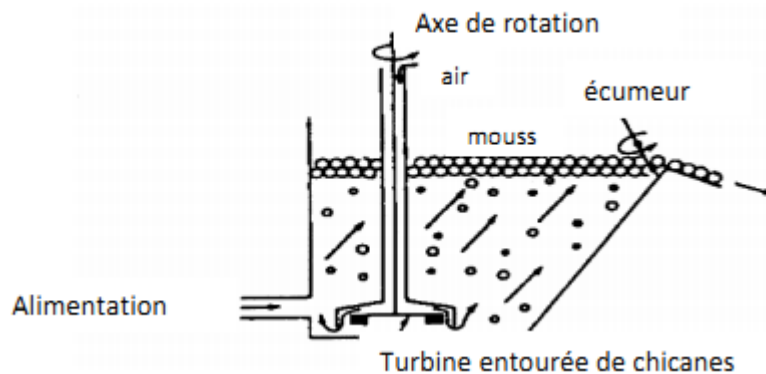
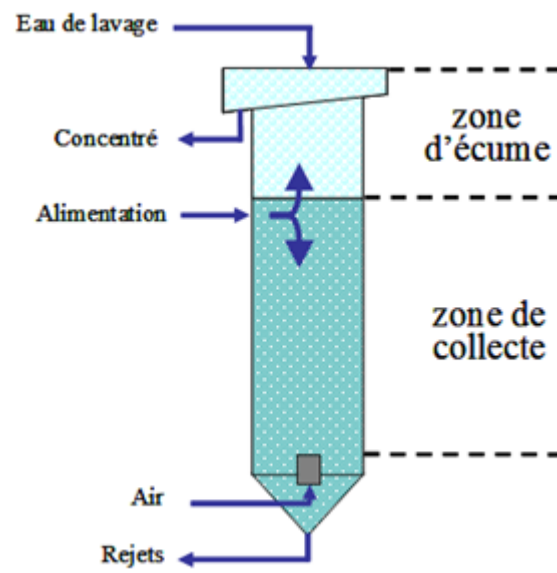


FIGURE 2.3: Cellule de flottation[7]

### Colonne de flottation

La colonne de flottation se constitue d'un tube avec une hauteur plus grande que l'aire de sa surface transversale. Il n'y a pas de partie mobile à l'intérieur de la colonne. On distingue deux zones différentes : la zone d'écume et la zone de collection. Ces deux zones sont séparées par une interface pulpe-écume qui détermine la longueur de chacune d'elles. Cet appareil travaille à contre-courant : la pulpe est introduite aux deux tiers environ de la hauteur de l'appareil. L'air est injecté au bas de la colonne est injecté par le générateur de bulles, celles-ci cheminent à contre-courant de la pulpe. A la partie supérieure, une aspersion d'eau assure le lavage des mousses recueillies[8].

La colonne de flottation industrielle est généralement de forme cylindrique (diamètre de 0.5 à 3m) ou rectangulaire (jusqu'à 4 x 20cm) ayant une hauteur variant entre 9 et 15 mètres. Son contenu d'air varie de 10 à 25% pour la zone de collection et supérieur à 60% pour la zone d'écume.



# Chapitre 3

## Partie expérimentale

### 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les procédés de traitement utilisés lors de notre étude ainsi que les résultats obtenus à chaque étape.

### 3.2 Enrichissement par nappe pelliculaire fluente (couloir alluvionnaire)

#### 3.2.1 Déroulement de l'expérience

L'étude de procédé de séparation gravimétrique, des rejets de la mine de Kherzet Youcef, a été réalisée au laboratoire du département de Génie Minier à l'école nationale polytechnique, à l'aide d'un couloir alluvionnaire dont l'inclinaison est réglable.

La procédure opératoire de la séparation par le couloir alluvionnaire est conditionnée par :

- Une alimentation constante et suffisante, de l'aire du couloir, en eau de manière à ce qu'elle puisse s'écouler régulièrement.
- Le plateau doit être réglé avec une inclinaison de  $3^\circ$ , cette inclinaison a été choisie après plusieurs essais afin que la récupération soit optimale.
- La pulpe est préparée avec une prise d'échantillon composite de 200g qui est trempée à l'eau avant d'être introduite au procédé de séparation.

Le passage de la pulpe sur le couloir alluvionnaire donnera deux produits à savoir un concentré et un rejet. Le concentré étant constitué de particules denses, devra être riche en sulfures et de métaux, le rejet, quant à lui est pauvre en métaux.

Le concentré récupéré est séché à l'étuve à  $105\text{ C}^\circ$ , afin qu'il soit prêt à l'étape de flottation.



FIGURE 3.1: Séparation gravimétrique par le couloir alluvionnaire

### 3.2.2 Résultats de la séparation gravimétrique

Afin qu'il soit prêt à l'étape de flottation, le concentré récupéré est séché à l'étuve à 105 C° pendant 24 heures.



FIGURE 3.2: Concentré séché de obtenu par la séparation gravimétrique

## 3.3 Enrichissement par flottation

Rappelons que la flottation est un procédé de traitement physico-chimique ayant pour avantage pour la séparation de minéraux qui ont la même densité, chose qui n'est pas possible avec les méthodes gravimétriques.

### 3.3.1 Déroulement de l'expérience

Le procédé de flottation a été réalisé au laboratoire de traitement des minerais à l'école nationale polytechnique, avec une cellule de flottation dont la capacité est de 2.5 litres.

#### Conditionnement de la pulpe

Une masse de 750g de concentré, obtenu auparavant par la séparation gravimétrique, est trempé à l'eau, afin d'obtenir une pulpe à un rapport solide/liquide de 30%. Celle-ci est introduite dans la cellule de flottation, et pour éviter toute agglomération, la pulpe est mise en agitation continue pendant 20 minutes.



FIGURE 3.3: stabilisation de la pulpe

#### Réactifs chimiques

Les réactifs chimiques utilisés dans l'essai de flottation, leur concentration ainsi que le temps de conditionnement de chacun sont cités dans le tableau ci-dessous :

réactif	type	Concentration	Temps de conditionnement
Ethyl-xanthate	Collecteur	100g/t	10 min
Sulfates de cuivre( $CuSO_4$ )	Activant	300g/t	5 min
Chaux( $CaO$ )	Régulateur de pH		3 min
Acide sulfurique ( $H_2SO_4$ )	Régulateur de pH		3 min
L'huile de pin	Moussant	Une goutte	1 min

TABLE 3.1: Réactifs utilisés dans l'essai de flottation

Après l'étape de stabilisation de la pulpe, nous avons d'abord ajouté les sulfates de cuivre (activant) à une concentration de 300 g/t, puis l'ethyl-xanthate à 100g/t, ensuite nous avons conditionné le pH en utilisant la chaux ( $CaO$ ), et enfin nous avons ajouté une goutte d'huile de pin afin de produire la mousse.

### La flottation

Après l'ajout du moussant, nous avons injecté de l'aire dans la cellule de flottation, les bulles d'air formées au tour de l'agitateur vont remonter à la surface chargées de sulfures, elles sont ensuite récupérées par raclage.

La durée de flottation étant fixée à 12 minutes répartie en quatre temps (2', 4', 8', 12'), nous avons récupéré quatre concentrés sulfurés correspondant à chaque durée de raclage.



FIGURE 3.4: concentré sulfuré obtenu par flottation

### Filtration et séchage

En dernier lieu, nous avons laissé les produits obtenus décantés, puis filtré en utilisant une pompe de filtration de type Heidolph et du papier filtre. Ces produits sont pesés après séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Concentré	Masse (g)	Rendement pondéral(%)
Concentré 1	73	9.7
Concentré 2	15	2
Concentré 3	8	1.1
Concentré 4	3	0.4

TABLE 3.2: résultats de l'essai de flottation

Rendement	Sans séparation gravimétrique		Avec séparation gravimétrique	
	Rendement pondéral (%)	Concentré 1	3.4 %	Concentré 1
Concentré 2		1.1%	Concentré 2	2%
Concentré 3		2.1%	Concentré 3	1.1%
Concentré 4		0.8%	Concentré 4	0.4%
<b>Rendement total (%)</b>	7.4%		13.2%	

TABLE.3.3 : : tableau comparatif des résultats de la flottation sans et avec séparation gravimétrique préalable

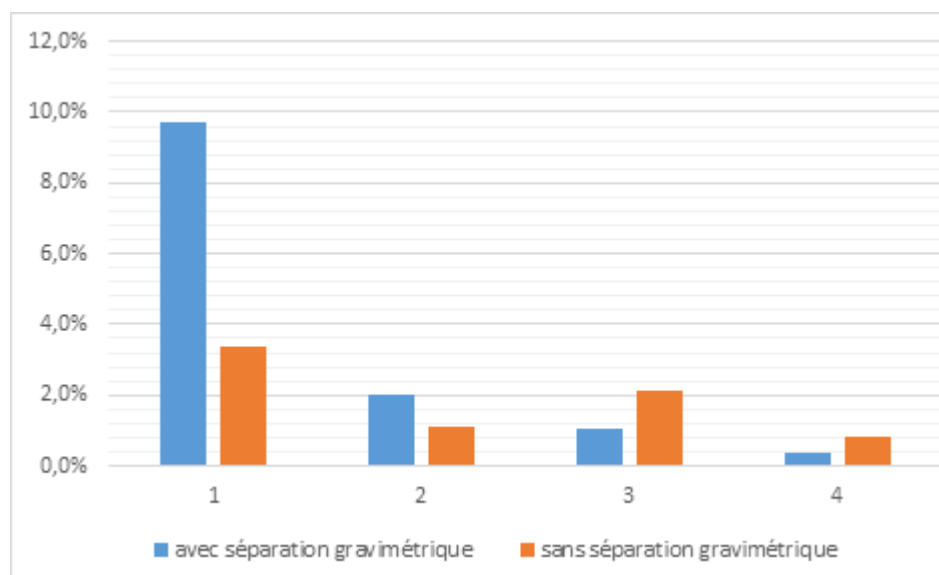


FIGURE 3.5: rendements pondéraux des produits de flottation avec et sans séparation gravimétrique

Nous remarquons que les rendements pondéraux des concentrés de l'essai de flottation sans séparation gravimétrique préalable sont plus faibles que ceux obtenus par flottation avec séparation gravimétrique.

En vue de ces résultats, nous déduisons que l'étape de séparation gravimétrique précédant le procédé de flottation a permis d'enrichir le concentré traité en éliminant une partie des particules indésirables.

### **3.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons commencé par présenter l'étude d'enrichissement par nappe pelliculaire fluente utilisant le couloir alluvionnaire, ensuite nous avons décrit le déroulement du procédé de flottation du concentré obtenu précédemment, tout en précisant les différents réactifs utilisés ainsi que leurs dosages. Et ce dans le but de retirer le maximum de sulfures présents dans les rejets de la mine de Kherzet Youcef. Le schéma global de l'étude est représenté comme suit :



# Conclusion Générale et Perspectives

L'objectif de cette étude ayant pour thématique la désulfuration environnementale des rejets de la mine de Kherzet Youcef était d'établir un schéma de traitement de ces derniers par la méthode de flottation visant à réduire au maximum la quantité de sulfures présente au niveau de la digue de Kherzet Youcef.

Nous avons commencé par présenter la zone d'étude afin de décrire la géologie, l'hydrogéologie ainsi que les caractéristiques climatiques de la région.

Nous avons ensuite expliqué la problématique liée à l'existence des sulfures dans les rejets miniers et qui peut provoquer une génération de drainage minier, puis nous avons expliqué les différentes mesures de prévention proposées, en particulier la méthode de désulfuration par flottation non sélective. La partie expérimentale de cette étude a porté sur les essais réalisés au laboratoire ainsi que les résultats obtenus. Nous avons déduit que les essais de concentration gravimétrique par nappe pelliculaire fluente, utilisant le couloir alluvionnaire et précédant le procédé de flottation, ont permis d'enrichir le concentré traité en élimant une partie des particule indésirables.

En vue de ces résultats, nous pouvons dire que le couloir alluvionnaire utilisé pour la séparation gravimétrique est un appareil dont le principe de fonctionnement est simple, et permet d'aboutir à de bons résultats, néanmoins une automatisation pourrait être bénéfique afin d'améliorer son fonctionnement.

# Bibliographie

- [1] ENOF. *Exploitation de la partie inférieure du gisement de Chaâbet-el-Hamra. Kherzet Youcef*. 2011.
- [2] Belkacem TOUAHRI. « Géochimie et métallogénie des minéralisations à plomb et zinc du nord de l'Algérie ». Thèse de doct. Paris 6, 1987.
- [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) ». Thèse de doct. Ecole nationale supérieure polytechnique, 2009.
- [4] Raphaël MERMILLOD-BLONDIN. « Influence des propriétés superficielles de la pyrite sur la rétention de molécules organiques soufrées: application à la désulfuration des résidus miniers ». Thèse de doct. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2005.
- [5] « Management of tailings and waste-rock in mining activities. In Union européenne. Mining waste ». In : *BAT reference document*. (2009).
- [6] Serge BOUCHARD. *Traitement du minerai: flottation, méthodes physiques*. Sainte-Foy, Québec: Éditions Le Griffon d'argile, 2001.
- [7] E. BOUABDALAH. « Valorisation de minerai sulfuré polymétallique d'El-abed ». Mém.de mast. Ecole Nationale Polytechnique, 2000.
- [8] J FINCH. « Column flotation ». In : *Pergamon Press plc(UK), 1991, (1991), p. 180.*