

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

LARBI TEBESSI UNIVERSITY - TEBESSA



جامعة العربي التبسي - تبسة

UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA

Institut des Mines

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Mines

Option : Mines

***CARACTERISATION ET TRAITEMENT DU MINERAI
BARYTIQUE D'AÏN MIMOUN POUR L'OBTENTION D'UN
CONCENTRE DE HAUTE QUALITE***

Présentée par :

BATOUCHE Toufik

Devant le jury composé de :

Président :	AOULMI Zoubir	MCA	Université Laarbi Tebessi Tébessa
Rapporteur :	BOUZENZANA Abdellali	MCA	Université Laarbi Tebessi Tébessa
Examineur :	KARA Mohammed	Prof	Université Laarbi Tebessi Tébessa
Examineur:	DERFOUF Semch-Eddine	Prof	Université de Batna 02
Examineur:	ZEDAM Rabah	MCA	Université d'Oum-el Bouaghi

Janvier 2021

Au nom du Dieu le clément le miséricordieux

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ✓ *Les plus chers au monde : ma mère et mon père qui m'ont accompagné durant toute ma vie et m'ont notablement encouragé à poursuivre mes études que Dieu les protège et les bénisse.*
- ✓ *Mes chers frères et ma chère sœur, qui me soutiennent toujours.*
- ✓ *Toute la grande famille BATOUCHE.*
- ✓ *Tous mes amis et collègues.*

REMERCIEMENTS

Tout d'abord remerçons Dieu tout puissant qui nous à guidé vers le droit chemin.

*Mes remerciements vont tout droit à mon Directeur de Thèse Docteur **BOUZENZANA Abdellali** (MC/A, Université de Tébessa), pour m'avoir encadré avec patience et compétence et grande générosité tout au long des années de mes travaux de recherche. J'ai beaucoup apprécié ses précieux conseils, son soutien permanent, ses encouragements et surtout ses jugements, qu'il trouve ici le témoignage de ma sincère et grande reconnaissance.*

*Je remercie vivement Docteur **Aoulmi Zoubir** (MC/A, Université de Tébessa) d'avoir accepté d'être président du jury. Aussi, je tiens à exprimer vivement ma gratitude et ma reconnaissance envers les membres du jury de soutenance d'avoir accepté d'examiner ma thèse de doctorat :*

*- **KARA Mohammed** (Professeur, Université de Tébessa)*

*- **DERFOUF Semch-Eddine** (Professeur, Université de Batna2)*

*- **ZEDAM Rabah** (MC/A, Université d'Oum-el Bouaghi).*

*Il m'est agréable d'adresser mes remerciements à l'ensemble du personnel de l'entreprise nationale des produits non-ferreux et substances utiles (ENOF Ain Mimoun). Mes vifs remerciements au personnel du Laboratoire des Mines de l'Université de Tébessa, au personnel de Laboratoire de Technologie des Matériaux et du Génie des Procédés, Université de Bejaia, pour avoir réalisé les analyses DRX et IR. Mes sincères remerciements vont également à Monsieur **Djaafar Alem** pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de géologie, Université d'Annaba, pour la réalisation des lames minces. Je tiens également à remercier le Professeur **Semch-Eddine DERFOUF** qui m'a aidé à la réalisation des analyses EDX et MEB, Laboratoire de Génie Mécanique de l'université de Biskra. Un grand remerciement sera adressé à l'ensemble de l'unité de recherche EMRU (Elegant Materials Reserch Unity) de l'université de Farhat Abbas –Setif 1 et je remercie également le personnel du département de génie des mines, l'école nationale polytechnique (ENP Alger), en particulier Monsieur **OULD HAMOU** et tous les membres du Laboratoire de Génie des mines, pour m'avoir accueilli dans leur laboratoire ce qui m'a permis de réaliser des essais de flottation sur mes échantillons de baryte.*

Enfin, je remercie tous mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

- **Résumé**

Ce travail présente les résultats d'une étude menée sur la caractérisation et l'enrichissement du minerai barytique du gisement d'Ain Mimoun (W.KHENCHELA) en appliquant la méthode de flottation ; dans le but d'améliorer leur qualité en réduisant le taux des impuretés tels que le calcaire et l'argile.

Une recherche bibliographique a été réalisée sur ce type de minerai, la géologie du gisement, la méthode d'exploitation et de traitement appliqué actuellement, ainsi que les travaux scientifiques réalisés sur la barytine, sa caractérisation et son enrichissement dans le monde entier.

Une étude de caractérisation physico-chimique et minéralogique est menée sur des échantillons représentatifs prélevés sur le site. Les analyses sont portées sur la Fluorescence X (FRX), Diffraction à Rayons X (DRX), Infrarouge (IR) et Microscopie Electronique à Balayage (MEB), ainsi que l'analyse microscopique des lames minces.

L'application de plusieurs essais de flottation suivant un plan d'expérience factorielle en utilisant certain réactifs et en agissant sur certains paramètres de flottation nous ont permis de valoriser la barytine d'Ain Mimoun.

Mots clés: Barytine – Caractérisation - Flottation – Ain Mimoun – Valorisation – Teneur en BaSO₄.

- **Abstract**

This work presents the results of a study carried out on the characterization and enrichment of barite ore issue of the Ain Mimoun deposit (State of Khenchela) through applying flotation method; aiming to improve their quality by reducing the level of impurities such as limestone and clay. A bibliographical search was aimed on this type of ore, in addition to the geology of the deposit, the method of exploitation and treatment currently applied as well as the scientific work carried out on barite, its characterization and its enrichment over the world. Physio-chemical and mineralogical characterization were carried out on representative samples taken from the site including techniques of X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Infrared (IR) and Scanning Electron Microscopy (SEM), as well as the microscopic analysis of thin sections. The application of several flotation tests allowed us to enrich barite of Ain Mimoun by using some chemical solutions and work on studying some of the factors affecting flotation using factorial plane.

Key words: Barite; Characterization; Flotation; Ain Mimoun; Valorization; grade from BaSO₄.

- **ملخص:**

يقدم هذا العمل نتائج دراسة أجريت على توصيف وإثراء خام البارييت من منجم عين ميمون (ولاية خنشلة) من خلال تطبيق طريقة التعويم؛ بهدف تحسين جودتها عن طريق تقليل مستوى الشوائب مثل الحجر الجيري والطين. استهدف البحث الببليوغرافي التعريف بهذا النوع من الخام، بالإضافة إلى جيولوجيا المنجم، وطريقة الاستغلال والمعالجة المطبقة حالياً، والعمل العلمي المنفذ على البارييت وتوصيفه وإثرائه في جميع أنحاء العالم. تم استعمال العديد من التقنيات المخبرية على العينات المأخوذة من الموقع وهي الأشعة السينية (FRX)، حيود الأشعة السينية (XRD)، الأشعة تحت الحمراء (IR) والمسح المجهر الإلكتروني (SEM)، بالإضافة إلى التحليل المجهرى للقطع الملساء. سمح لنا تطبيق العديد من اختبارات التعويم باستخدام بعض المحاليل الكيميائية والعمل على دراسة بعض العوامل المؤثرة في التعويم بتثمين باريت عين ميمون.

الكلمات المفتاحية: البارييت-التعويم -منجم عين ميمون – التثمين-سلفات الباريوم.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des photos	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des acronymes	X
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la Barytine	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Origine de la Barytine	6
I.3 Les propriétés fondamentales de la Barytine	7
I.4 Les réserves de la Barytine	8
I.4.1 Les réserves nationales de la Barytine	8
I.4.2 Les réserves mondiales de la Barytine	8
I.5 Le marché mondial de la Barytine	9
I.5.1 La production de la Barytine	9
I.5.2 La consommation de la Barytine	9
I.5.3 Les prix sur le marché international	10
I.6 Les domaines d'utilisations de la Barytine	11
I.6.1 La Barytine dans l'industrie pétrolière	11
I.6.2 La Barytine dans l'industrie chimique	11
I.6.3 La Barytine comme charge minérale	13
I.7 Conclusion	14
Chapitre II : Mise au point sur la valorisation de la Barytine	
II.1 Introduction	16
II.2 Vue d'ensemble des processus d'enrichissement de la Barytine.....	17
II.3 La recherche actuelle sur la valorisation de la Barytine.....	18
II.4 La séparation gravimétrique	19
II.4.1 Le principe de la séparation gravimétrique	19
II.4.2 La méthode de la nappe pelliculaire fluant	20
II.4.3 La méthode de l'accélération différentielle	21
II.4.4 La méthode des milieux denses	22
II.4.5 Travaux antérieurs sur la séparation gravimétrique de la Barytine.....	23
II.5 La flottation	23

II.5.1 Le principe de la flottation	24
II.5.2 Les réactifs de la flottation	25
II.5.2.1 Les réactifs collecteurs	25
II.5.2.2 Les réactifs activant et déprimants.....	26
II.5.2.3 Les agents moussants.....	26
II.5.2.4 Les régulateurs du milieu	27
II.5.3 L'efficacité de la flottation	28
II.5.3.1 Les grosseurs des minerais à flottés	28
II.5.3.2 La densité de la pulpe de la flottation	29
II.5.3.3 Le régime des réactifs de la flottation	29
II.5.3.4 L'intensité de l'aération et de l'agitation de la pulpe	29
II.5.3.5 La température de la pulpe	29
II.5.3.6 L'influence du pH	29
II.5.3.7 La durée de la flottation, le schéma de la flottation et le débit de la pulpe	30
II.5.4 Travaux antérieurs sur la flottation de la Barytine	30
II.6 La séparation magnétique	33
II.6.1 La définition et le principe	33
II.6.2 Travaux antérieurs sur la séparation magnétique de la Barytine	34
II.7 La séparation électrostatique	35
II.7.1 La définition et le principe	35
II.7.2 Travaux antérieurs sur la séparation électrostatique de la Barytine	36
II.8 Le futur de l'enrichissement de la Barytine	36
II.9 Conclusion	37
Chapitre III : La Barytine de Ain Mimoun -Wilaya de Khenchela-	
III.1 Préambule	39
III.2 Historique	40
III.3 Le cadre géologique local	41
III.3.1 Le Barrémien	42
III.3.2 L'Aptien	42
III.3.3 L'Albien	43
III.3.4 Le Cénomaniens	43
III.3.5 Le Miocène	44
III.4 Le cadre tectonique locale	44

III.5 La minéralisation	45
III.6 La minéralogie et la pétrographie	46
III.6.1 La Barytine	46
III.6.2 La Silice	47
III.6.3 La Dolomite	48
III.6.4 La Calcite	48
III.7 Les réserves de la Barytine	49
III.8 Les méthodes d'exploitation	49
III.9 Les méthodes de traitement et d'enrichissement	50
III.9.1 La préparation mécanique	51
III.9.2 Les procédés de traitement	54
III.10 Conclusion	56
Chapitre IV : Techniques expérimentales	
IV.I Introduction	59
IV.2 L'intérêt de la caractérisation physico-chimique et minéralogique	59
IV.2 L'échantillonnage	60
IV.2.1 Echantillonnage	60
IV.2.2 Le prélèvement des échantillons	60
IV.3 La préparations des échantillons pour l'analyse	62
IV.3.1 Le concassage	62
IV.3.2 L'homogénéisation	63
IV.3.3 Le quartage	63
IV.4 L'analyse minéralogique pétrographique	65
IV.4.1 La méthodologie de préparation des lames minces	65
IV.4.2 Les observations microscopique	68
IV.5 L'analyse granulométrique	69
IV.6 La caractérisation physico-chimique	70
IV.6.1 Le broyage	70
IV.6.2 Les méthodes d'analyse	70
IV.6.2.1 L'analyse densimétrique	71
IV.6.2.2 La Fluorescence X (FX)	72
IV.6.2.3 La Diffraction par Rayons X (DRX)	74
IV.6.2.4 La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	76
IV.6.2.5 L'Infra Rouge (IR)	76

IV.7 Conclusion	77
Chapitre V : Résultats et discussions	
V.1 Introduction	79
V.2 Les observations au microscope optique	79
V.3 Les résultats de l'analyse granulométrique	80
V.4 Les résultats de l'auscultation à la loupe binoculaire	82
V.5 Les résultats des caractérisations physico-chimiques	84
V.5.1 Les résultats de l'analyse densimétrique	84
V.5.2 Les résultats de la Fluorescence X (FX)	85
V.5.3 Les résultats de la Diffraction par Rayons X (DRX)	87
V.5.4 Les résultats de la Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	88
V.5.5 Les résultats de l'Infra Rouge (IR)	90
V.6 Conclusion	94
Chapitre VI : Les essais d'enrichissement par la flottation	
VI.1 Introduction	97
VI.2 Les réactifs de la flottation	97
VI.2.1 Les types de réactifs utilisés	97
VI.2.2 La préparation des réactifs	98
VI.3 Le mode opératoire	98
VI.4 Les expériences factorielles	100
VI.4.1 Les données de départ	100
VI.4.2 Le choix des facteurs	101
VI.5 Résultats et discussions	101
VI.6 Le schéma de la flottation proposé	104
VI.7 Conclusion	105
Conclusion générale et perspectives	107
Références bibliographiques	109

LISTE DES FIGURES

Figures du chapitre I

Figure I.1 Tableau périodique des éléments	4
Figure I.2 Localisation des principaux types de gisements de Barytine dans le monde.....	6

Figures du chapitre II

Figure II.1 Les méthodes d'enrichissement de la Barytine	18
Figure II.2 Le principe de la concentration par la nappe pelliculaire fluante	21
Figure II.3 Le comportement des particules sur une table à secousse selon leurs poids.....	21
Figure II.4 Le cycle de jiggage et le comportement des particules pendant le jiggage.	22
Figure II.5 La séparation par milieu dense.....	23
Figure II.6 Le principe du procédé de la flottation	24
Figure II.7 Une bulle d'air transportant les minerais sélectionnés	25
Figure II.8 L'action du moussant	27
Figure II.9 L'effet du pH sur la flottation de la barytine du minerai siliceux à l'aide d'acide oléique.....	30
Figure II.10 La séparation magnétique entre billes de fer et de céramique.....	34

Figures du chapitre III

Figure III.1 a) La situation Géographique map ALGERIE, b) MNT Modèle numérique de terrain Ain Mimoun	39
Figure III.2 Une vue satellitaire montrant la position du massif de Khenchela.....	40
Figure III.3 La carte géologique d'Ain Mimoun	41
Figure III.4 Le schéma de la méthode des sous niveaux abattus.....	50
Figure III.5 Le schéma technologique de traitement de la Barytine de Ain Mimoun..	51
Figure III.6 Un concasseur à percussion (mono rotor à marteau articulé)	53
Figure III.7 Le Broyeur à pendules (pendulaire)	55

Figures du chapitre IV

Figure IV.1 Le protocole de la préparation des échantillons.....	62
Figure IV.2 Le quartage.....	64
Figure IV.3 L'imprégnation des échantillons au vernis incolore.....	66
Figure IV.4 Le principe de fonctionnement de diffraction par FX.....	73
Figure IV.5 Le principe de fonctionnement de la diffraction par rayons X.....	75

Figures du chapitre V

Figure V.1 La Courbe granulométrique du minerai brut.....	81
Figure V.2 La Courbe granulométrique de stérile.....	82
Figure V.3 Le Spectre de Diffraction par rayons X du minerai brut d'Ain Mimoun...	87
Figure V.4 Le Spectre de Diffraction par rayons X du stérile d'Ain Mimoun.....	87
Figure V.5 Diffractogramme de l'analyse par EDX du minerai brut d'Ain Mimoun	89
Figure V.6 Le Diffractogramme de l'analyse par EDX du stérile d'Ain Mimoun.....	89
Figure V.7 Le Spectre de l'analyse par infrarouge du minerai brut.....	92
Figure V.8 Le Spectre de l'analyse par infrarouge de stérile.....	93

Figures du chapitre VI

Figure VI.1 Organigramme de protocole expérimentale de la flottation au laboratoire.....	99
Figure VI.2 Le schéma de la flottation proposé.....	104

LISTE DES PHOTOS

Photos du chapitre I

Photo I.1 Cristal de Baryte extrait au Maroc.....	5
---	---

Photos du chapitre III

Photo III.1 La Barytine lamellaire	47
Photo III.2 La Barytine Prismatique (Ba) corrodée par la Silice palissadique	47
Photo III.3 Des grains de Quartz Automorphes en remplissage dans une cavité de dissolution	47
Photo III.4 La Dolomite grisâtre de l'Aptien moyen.....	48
Photo III.5 Saddle Dolomite occupant les bords de cavités de dissolution.....	48
Photo III.6 Un concasseur à mâchoires à mouvement simple.....	52
Photo III.7 Le Jig WEMCO d'Ain Mimoun.....	54
Photo III.8 La station de séchage.....	55

Photos du chapitre IV

Photo IV.1 Les différents points de prélèvement des échantillons pour chaque zone..	61
Photo IV.2 Les échantillons étiquetés et stockés dans des sacs en plastiques.....	61
Photo IV.3 Un Concasseur à mâchoire au laboratoire d'Ain Mimoun.....	63
Photo IV.4 Un diviseur mécanique pour l'homogénéisation.....	63
Photo IV.5 La réalisation des tranches (sucres)	65
Photo IV.6 Le séchage des sucres.....	65
Photo IV.7 Une cuve à ultrason.....	67
Photo IV.8 Le collage du verre sur le sucre.....	67
Photo IV.9 Le Le disque de la rectifieuse	68
Photo IV.10 Un Microscope optique de la marque MT9930L.....	69
Photo IV.11 Une Tamiseuse automatique de marque D407.....	69
Photo IV.12 Un Broyeur à disque au laboratoire d'Ain Mimoun.....	70
Photo IV.13 Les équipements nécessaires pour la méthode de LECHATELIER.....	71
Photo IV.14 Mesure de la densité par la méthode de LECHATELIER.....	72
Photo IV.15 Spectromètre à fluorescence X (WDXRF) Rigaku ZSX Primus.....	74
Photo IV.16 Un Diffractomètre PANALYTICAL.....	75
Photo IV.17 Le Microscope électronique à balayage (MEB)	76
Photo IV.18 Le Spectrophotomètre SHIMADZUE FTRI 8400S.....	77

Photos du chapitre V

Photo V.1 Association barytine calcite quartz.....	79
Photo V.2 Grain de quartz bipyramidé dans une masse de barytine.....	79
Photo V.3 Phénomène d'extinction roulante dans barytine en lattes prismatiques.....	79
Photo V.4 Plage de calcite tardive sur fond barytique.....	79
Photo V.5 Association de grains de quartz avec barytine prismatique.....	80
Photo V.6 Phénomène de silicification de la barytine.....	80
Photo V.7 Fragments de dolomite associés à la Barytine et à la Silice	80
Photo V.8 Tranche granulométrique [-1+0.5 mm] montrant des grains minéraux de barytine associés au quartz, à la calcite et à d'autres fragments rocheux.....	83
Photo V.9 Tranche granulométrique [-0.5 +0.250 mm] montrant des grains de barytine associés au quartz et à d'autres fragments rocheux.....	83
Photo V.10 Tranche granulométrique [-0.250 +0.125 mm] montrant également des grains de barytine associés au quartz et à d'autres fragments rocheux.....	83
Photo V.11 Tranche granulométrique [-0.125+0.053 mm] montrant toujours des grains de barytine associés au quartz et à d'autres fragments rocheux.....	84
Photo V.12 L'observation du minerai brut d'Ain Mimoun par le MEB.....	88
Photo V.13 L'observation du stérile d'Ain Mimoun par le MEB.....	89

Photos du chapitre VI

Photo VI.1 La cellule de flottation utilisée (Denver 12)	97
Photo VI.2 Les réactifs de flottation utilisés.....	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux du chapitre I

Tableau I.1 Les propriétés fondamentales de la Barytine.....	7
Tableau I.2 Les réserves mondiales de la Barytine en 2019	8
Tableau I.3 La production mondiale de la barytine.....	9
Tableau I.4 La consommation mondiale de la barytine	10
Tableau I.5 Evolution des prix de la Barytine selon la qualité sur le marché mondial.	10

Tableaux du chapitre II

Tableau II.1 Les méthodes d'enrichissement de la Barytine, principes et applications..	18
Tableau II.2 Les prévisions des possibilités de traitement par le critère de Taggart.....	20
Tableau II.3 Les collecteurs utilisés en flottation de la Barytine.....	26
Tableau II.4 Les réactifs modificateurs largement utilisés en flottation de la Barytine..	28
Tableau II.5 La composition du concentré barytique obtenue lors de la flottation du minerai brut de Kremikovtzi (Bulgarie)	32

Tableaux du chapitre V

Tableau V.1 Les résultats de l'analyse granulométrique du minerai brut concassé.....	80
Tableau V.2 Les résultats de l'analyse granulométrique de stérile.....	81
Tableau V.3 La densité en fonction des classes granulométriques du minerai brut.....	84
Tableau V.4 Les résultats de l'analyse chimique par XRF de minerai brut.....	85
Tableau V.5 Les résultats de l'analyse chimique par XRF de stérile.....	85
Tableau V.6 Les résultats de l'analyse granulo-chimique par XRF de minerai brut.....	86
Tableau V.7 Les positions et l'identification des bandes observées dans le spectre IR du minerai brut.....	91
Tableau V.8 Les position et l'identification des bandes observées dans le spectre IR de stérile.....	91

Tableaux du chapitre VI

Tableau VI.1 Les Réactifs de flottation utilisés.....	97
Tableau VI.2 La variation des facteurs étudiés.....	101
Tableau VI.3 Les expériences factorielles et les résultats.....	101

LISTE DES ACRONYMES

Abréviation	Signification
API	American Petroleum Institute
AFNOR	Association Française de Normalisation
ARTEP	Association de Recherche sur les Techniques d'Exploitation de Pétrole
CANMET	Canadian Centre for Mineral and Energy Technology
OCMA	Oil Companies Material Association
USGS	United States Geological Survey
UICPA	Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
ENOF	Entreprise National des produits Non-Ferreux et substances utiles
EMRU	Elegant Materials Research Unity
ENP	Ecole Nationale Polytechniques
LGM	Laboratoire de Recherche de Génie Mécanique
MNT	Modèle Numérique de Terrain
LPA	Lumière Polarisée
LM	Lames Minces
DRX	Diffraction des Rayons X
FX	Fluorescence des Rayons X
IR	Infra Rouge
MEB	Microscope Electronique à Balayage
EDX	Energy-Dispersive X-ray
HGMS	High Gradient Magnetique Separation
BP	Broyeur à Pendule
PS	Post-scriptum
BTP	Bâtiment et travaux publics
Ba	Barytine
S	Sulfate
O	Oxygène
Si	Silice
Qz	Quartz
Cal	Calcite
Dol	Dolomite

Mt	Millions tonne
Mm	Millimètre
µm	Micro-mètre
m³	Mètre cube
m	Mètre
Kg	Kilogramme
g	Gramme
ppm	Partie par million
γ	Rendement
ε	Degré d'extraction
β	Teneur

Introduction générale

Introduction générale

Dans le monde de la recherche et actuellement pour ce qui concerne le domaine de la spécialité minière ainsi que l'enrichissement des minéraux utiles le but primordial est de trouver des procédés de traitement aussi fiables qu'efficaces afin de développer le monde industriel dont le vif de cette recherche est plutôt une exploitation rationnelle des minéraux dans un contexte éco-environnementale durable.

Ainsi, les connaissances intimes des différents composants de ces minerais sont nécessaires pour l'orientation du choix des traitements à prévoir, ces traitements sont beaucoup plus des traitements d'exploitation et de valorisation. Le développement des méthodes expérimentales aux seins des laboratoires permet la pratique et la réalisation de nombreuses expérimentations venant justifier les résultats des concepts théoriques et de donner un renforcement et un appui aux travaux antérieurs portant sur l'enrichissement des minerais.

La **Barytine** est l'un des minéraux industriels importants. De par ses diverses applications, de par ses importantes réserves et son intensive exploitation, celle-ci contribue largement au développement économique et industriel du pays. Le domaine d'utilisation de ce minerai est potentiellement polyvalent, du forage pétrolier, à l'hydraulique, à l'industrie des batteries et aux industries chimiques (telle que peinture et recouvrement) et même à la radioscopie. En outre, il peut être aussi utilisé comme capteur de gaz pour les tubes à vide, comme lubrifiant (additif), comme matière de charge et même comme colorant pour les papiers.

A l'échelle économique mondiale, la **Baryte** occupe une place imposante et primordiale parmi les différents minéraux industriels que compose la croûte terrestre et en vue de toute cette large utilisation et suite aux rapports économiques mondiaux la demande de la **Baryte** ne cesse d'augmenter de façon exponentielle.

A cet effet, l'industrie minière dans notre pays s'occupe sincèrement de l'exploitation de ce minerai retrouvé dans plusieurs gisements disposant d'importantes réserves en **Barytine** dont nous citons **Ain Mimoun** (khenchela), **Ichemoul** (Batna), **Boucaid** (Tissemsilt), **Draïssa** (Béchar).

L'objectif de notre recherche doctorale est spécifiquement la caractérisation du minerai **Barytique** de **Ain Mimoun**, suivi par des essais de valorisation. Sur ce et suite à notre estimation la thèse est structurée en six chapitres comportant une partie d'étude bibliographique débutée par une introduction et achevée par une conclusion générale.

- Le premier chapitre est totalement consacré aux généralités sur le minerai Barytine : son domaine d'utilisation, les réserves et la production, les propriétés pétrographiques, minéralogiques et physico-chimiques sont aussi détaillées.
- Le deuxième chapitre, englobe une littérature bibliographique sur les différents procédés d'enrichissement connus et spécialement ceux largement utilisés pour la Barytine.
- Le troisième chapitre porte sur la présentation du gisement d'Ain Mimoun : des aperçus géographiques, géologiques, minéralogiques, des réserves exploitables, des méthodes d'exploitation ainsi que le mode de traitement et de valorisation y figurent.

Juste après l'étude bibliographique, une partie purement expérimentale est engagée et réalisée comportant plusieurs caractérisations de différentes natures au cours desquelles plusieurs techniques et beaucoup d'équipements sont utilisés dans cette thèse, ce qui nous a permis et donner l'occasion d'enrichir nos connaissances dans le domaine de l'échantillonnage, de caractérisation et de l'enrichissement des minéraux, qui est l'intérêt notable de notre thèse.

Parmi ces caractérisations, nous citons :

1. La Microscopie Optique (MO)
2. La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)
3. L'Analyse Granulométrique (AG)
4. La Fluorescence X (FX)
5. La Diffraction des Rayons X (DRX)
6. La Spectrométrie par Infrarouge (IR)

La comparaison et le traitement des différents résultats obtenus confronté à l'étude bibliographique a permis à son tour de faire des essais d'enrichissement par flottation.

- Le quatrième chapitre concerne la description des techniques et du matériel utilisé pour la préparation et la caractérisation du minerai d'Ain Mimoun. Préparation mécanique (concassage, homogénéisation, quartage, tamisage et broyage) ainsi que les analyses quantitatives et qualitatives par les différentes techniques (DRX, FX, IR, MEB, ...).
- Le cinquième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et collectés après finalisation des essais et tests de caractérisations ainsi que leurs interprétations.
- Le sixième et dernier chapitre est consacré aux essais de traitement et d'enrichissement du minerai d'Ain Mimoun par flottation.

Chapitre I

Généralités sur la Barytine

I.1 Introduction

La Barytine désigne le sulfate de Baryum naturel dont la formule chimique est $BaSO_4$, le Baryum est un élément chimique de numéro 56 dans la classification périodique de Mendeleïev (Figure I.1) (IUPAC 2018). Le mot "Baryum" vient du Grec Barys (lourd) d'où en italien et espagnol "Baryta", d'où en français Baryte qui est un oxyde de Baryum, auquel on a ajouté le suffixe "-ium" utilisé pour désigner les métaux. Le Baryum se trouve dans la nature sous forme de minerai souvent, près des sources d'autres métaux comme le Magnésium, le Manganèse ou d'autres filons fluoré. Mais le minéral de Baryum le plus répandu est la Barytine, encore appelée Sulfate de Baryum (Superprof 2020).

La luminescence du Baryum fut découverte en 1630 par le Bolognais Vincenzo Cascariolo lorsqu'il chauffa la Baryte qui se mit à rayonner à l'obscurité. Causant beaucoup d'émoi auprès des savants de cette époque, la baryte, sous forme d'agrégat, fut nommée "boule lumineuse de Bologne".

Le Baryum est un métal alcalino-terreux. De couleur argentée, il est mou et fond à $850^{\circ}C$. C'est le sel le plus insoluble connu. C'est aussi un sel qui cristallise dans le système orthorhombique, il est de plus capable de former des cristaux plats tabulaires qui peuvent parfois, à l'état naturel regroupées sous forme de rosettes de barytine. Lorsqu'il est pur, il est de couleur blanche, puisqu'il est très réactif avec l'oxygène, il est très difficile de trouver le Baryum sous forme d'élément natif. Mais, du fait de cette caractéristique, il est très utilisé pour piéger des gaz dans des dispositifs sous vide comme les capteurs thermiques à tube ou les tubes cathodiques (Superprof 2020, Marteau.P et autres 2014).



Photo I.1 Cristal de Baryte extrait au Maroc (Duflos.G 2014).

Key:

atomic number
Symbol
name
conventional atomic weight
standard atomic weight

1 1 H hydrogen 1.008 [1.0078, 1.0082]																	18 2 He helium 4.0026
3 Li lithium 6.941 [6.938, 6.97]	4 Be beryllium 9.0122											5 B boron 10.81 [10.806, 10.821]	6 C carbon 12.011 [12.009, 12.012]	7 N nitrogen 14.007 [14.006, 14.008]	8 O oxygen 15.999 [15.999, 16.000]	9 F fluorine 18.998	10 Ne neon 20.180
11 Na sodium 22.990	12 Mg magnesium 24.305 [24.304, 24.307]											13 Al aluminium 26.982	14 Si silicon 28.086 [28.084, 28.089]	15 P phosphorus 30.974	16 S sulfur 32.06 [32.059, 32.076]	17 Cl chlorine 35.45 [35.446, 35.457]	18 Ar argon 39.95 [39.942, 39.963]
19 K potassium 39.098	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.956	22 Ti titanium 47.867	23 V vanadium 50.942	24 Cr chromium 51.996	25 Mn manganese 54.938	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933	28 Ni nickel 58.693	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723	32 Ge germanium 72.630(8)	33 As arsenic 74.922	34 Se selenium 78.971(8)	35 Br bromine 79.904 [79.901, 79.907]	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.468	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.906	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.906	42 Mo molybdenum 95.94	43 Tc technetium	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.91	46 Pd palladium 106.42	47 Ag silver 107.87	48 Cd cadmium 112.41	49 In indium 114.82	50 Sn tin 118.71	51 Sb antimony 121.76	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90	54 Xe xenon 131.29
55 Cs caesium 132.91	56 Ba barium 137.33	57-71 lanthanoids	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.95	74 W tungsten 183.84	75 Re rhenium 186.21	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.22	78 Pt platinum 195.08	79 Au gold 196.97	80 Hg mercury 200.59	81 Tl thallium 204.38 [204.38, 204.38]	82 Pb lead 207.2	83 Bi bismuth 208.98	84 Po polonium	85 At astatine	86 Rn radon
87 Fr francium	88 Ra radium	89-103 actinoids	104 Rf rutherfordium	105 Db dubnium	106 Sg seaborgium	107 Bh bohrium	108 Hs hassium	109 Mt meitnerium	110 Ds darmstadtium	111 Rg roentgenium	112 Cn copernicium	113 Nh nihonium	114 Fl flerovium	115 Mc moscovium	116 Lv livermorium	117 Ts tennessine	118 Og oganesson

57 La lanthanum 138.91	58 Ce cerium 140.12	59 Pr praseodymium 140.91	60 Nd neodymium 144.24	61 Pm promethium	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.96	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.93	66 Dy dysprosium 162.50	67 Ho holmium 164.93	68 Er erbium 167.26	69 Tm thulium 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu lutetium 174.97
89 Ac actinium	90 Th thorium 232.04	91 Pa protactinium 231.04	92 U uranium 238.03	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am americium	96 Cm curium	97 Bk berkelium	98 Cf californium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium

Figure I.1 Tableau périodique des éléments. (Robert.G 2019, IUPAC 2018)

I.2 Origine de la Barytine

La Barytine est un minerai assez ubiquiste, présent dans des formations géologiques très vastes, aussi bien dans les socles que dans les bassins sédimentaires (Marteau.P 2014). Les gisements de Barytine peuvent être classés dans les quatre groupes suivants en fonction des caractéristiques physiques, des caractéristiques géochimiques et du cadre géologique : gisements sédimentaires (bedded-sedimentary), gisements volcaniques (bedded-volcanic), gisements filonien (vein, cavity-fill) et les gisements résiduels (bedded-residual) (Johnson.C.A et autres 2017). Cette classification se rapproche des classifications antérieures (Johnson.C.A et autres 2017, Brobst D.A. 1958, Clark S.H.B et autres 1990), mais quelque peu modifiée pour tenir compte des gisements récemment découverts et des résultats d'études géologiques plus récentes. Les emplacements des gisements ou des districts qui sont soit relativement importants soit représentatifs des quatre groupes sont indiqués dans la figure I.2. De nombreux autres gisements, exploités ou non, sont également identifiés (Johnson.C.A et autres 2017, Roskill Information Services 2006).



Figure I.2 Localisation des principaux types de gisements de Barytine dans le monde (Johnson.C.A et autres 2017)

I.3 Les propriétés fondamentales de la Barytine

La Barytine cristallise dans le système orthorhombique. Elle forme généralement des concrétions globulaires, fibreuses ou lamellaires, blanche plus ou moins translucide. Des cristaux bien individualisés. Ces minéralisations parfois colorées selon la nature des impuretés (oxydes de fer, sulfures, matières organiques...) (Marteau.P 2014). Les propriétés minéralogiques, chimiques et texturales de la Barytine sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I.1 Les propriétés fondamentales de la Barytine (ENOF 2015, Moussaoui E.2015).

Identification	
Masse formulaire	Ba 58,84 %, O 27,42 %, S 13,74 %,
Couleur	incolore, parfois blanc, jaune et rarement d'autres couleurs (violée, verdâtre, , bleuâtre)
Classe cristalline et groupe d'espace	Dipyramidale Pnma
Système cristallin	Orthorhombique
Réseau de Bravais	Primitif P
Clivage	La barytine grossière constitue divers agrégats, en général clivables.
Cassure	Irrégulière, conchoïdale
Habitus	Cristaux aplatis selon, parfois lamellaires
Dureté	3 à 3,5 sur l'échelle de Mohs
Trace	Blanche
Éclat	vitreux à résineux
Propriétés optiques	
Indice de réfraction	$\alpha=1,634-1,637$ $\beta=1,636-1,638$ $\gamma=1,646-1,648$
Pléochroïsme	Incolore
Biréfringence	$\Delta=0,012$; biaxe positif
Dispersion	$2v_z \sim 36 - 38^\circ$
Fluorescence ultraviolet	La baryte n'est pas ou très peu fluorescente, par contre, chauffée, elle devient luminescente
Transparence	transparent, translucide à opaque
Propriétés chimiques	
Densité	4,48
Température de fusion	Décomposition : 1 600 °C
Fusibilité	Fond à la flamme et donne une boule blanche
Solubilité	Soluble dans HI. dans H ₂ SO ₄ concentré chaud
Comportement chimique	Colore la flamme en rouge carmin
Propriétés physiques	
Magnétisme	Aucun
Radioactivité	Aucune

I.4 Les réserves de la Barytine

I.4.1 Les réserves nationales de la Barytine

Les gisements Barytique présentant un intérêt économique sont localisés au Nord du pays à Aïn Mimoun (W.Khenchela), Boucaïd (W.Tissemsilt), Mellal (W.Tlemcen), Mesloula (W.Tébessa) et Koudiat Safia (W.Médéa). Par ailleurs, des travaux de recherche minière ont permis de mettre en évidence plusieurs gisements dans le Sud-Ouest algérien près de Béchar. Il s'agit des gisements de Draïssa Sud-Ouest, Djebel Draïssa, Draïssa Nord-Est et Draïssa Guelb El Tahtani. Cet ensemble de gisement totalise des réserves près de 07 Mln de tonnes de baryte (MEM 2017).

Le gisement d'Ichmoul (W.Batna Nord-Est d'ALGERIE) : le site minier est localisé au versant nord du djebel Ichmoul, à 12 Km au nord du chef-lieu d'Arris. La structure est considérée favorable. Des études effectuées en 1971 avaient conclu l'existence d'un corps Barytique dont le taux varie entre 30% et 50% en BaSO₄ et avec des réserves qui peuvent atteindre 1.548.280 tonnes (Moussaoui E.2015).

I.4.2 Les réserves mondiales de la Barytine

Un système développé aux Etats-Unis (US Bureau of Mines & US Geological Survey, 1981 ; US Geological Survey, 1982) définit les réserves en tant que «ressources identifiées en minerai qui peut être extrait de manière profitable au moyen de la technologie existante et dans les conditions économiques actuelles». Le tableau suivant montre les réserves mondiales de la Barytine en 2019.

Tableau I.2 Les réserves mondiales de la Barytine en 2019.

Pays	Les reserves (x10 ³ tonnes)
chine	36.000
Inde	51.000
Iran	24.000
Kazakhstan	85.000
Pakistan	30.000
Russie	12.000
Thaïlande	18.000
Turquie	35.000
Les Autres pays	29.000
Total du monde	320,000

I.5 Le marché mondial de la Barytine

I.5.1 La production de la Barytine

Le potentiel de production n'est pas important il est représenté par les mines de Bou caïd et Aïn Mimoun actuellement en exploitation et qui fournissent 40 000 tonnes de Barytine utilisée principalement dans le secteur des forages pétroliers (MEM 2017).

La production mondiale a atteint 9,5 Mt en 2018 (*Tableau I.3*). La Chine domine le marché en fournissant 3.2 Mt. Viennent ensuite l'Inde 2 Mt, le Maroc 1 Mt, Kazakhstan 0.62 Mt, Iran 0,55 Mt et les États-Unis 0,48 Mt. (Moussaoui E.2015, Sally.J et Suzette M. 2017, USGS 2019)

Tableau I.3 La production mondiale de la Barytine (Sally.J et Suzette M. 2017, USGS 2019)

Pays	La production mondiale (x10 ³ tonne)			
	En 2015	En 2016	En 2017	En 2018
Etats Unis	425	316	334	480
chine	3.000	2.800	3.200	3.200
Inde	700	1.000	1.560	2.000
Iran	300	400	550	550
Kazakhstan	300	300	620	620
Mexique	266	250	360	400
Maroc	1.000	700	950	1.000
Pakistan	122	120	106	110
Russie	210	210	221	220
Tailanda	171	170	148	150
Turquie	300	250	200	290
Vitname	100	100	-	-
Les Autres pays	520	520	418	460
Total du monde	7.410	7.140	8.670	9.500

I.5.2 La consommation de la Barytine

Au niveau mondial, 80% de la barytine est utilisée pour les forages pétroliers (boues lourdes), 10% comme charge minéral (peintures, plaquettes de freins) et dans le BTP (briques barytés et bétons lourds, et 10 % dans la chimie du baryum (verres spéciaux surtout) et la métallurgie. Le tableau suivant présente les grands pays consommateurs de la Barytine en 2017.

Tableau I.4 La consommation mondiale de la barytine (Jean-Louis V et autres 2016).

Pays	La consommation ($\times 10^3$ tonnes)
Chine	1450
États-Unis	1910
Pays de golf	1650
Amérique du sud	470
Inde	350
Russie	380
Afrique	340
Iran	250
Union européen	780
Total du Monde	8000

I.5.3 Les prix sur le marché international

Les prix pratiques sont très variables et dépendent de la qualité du matériau et des procédés de traitement plus au moins sophistiqués qui sont utilisés pour répondre aux besoins des consommateurs (Duflos.G 2014).

- Pour la Barytine utilisée dans les boues de forage, la fourchette des prix de base à la tonne se situe entre (130 à 170) \$/t.
- La Barytine utilisée dans les diverses industries (charges plastiques, bétons lourds) se négocie entre (160 à 180) \$/t.
- La Barytine blanche utilisée comme charge dans les peintures (granulométrie 350 μm , teneurs de 96-98 % BaSO_4), ainsi que pour l'industrie chimique, est vendue entre (315 à 400) \$/t.

Tableau I.5 Evolution des prix de la Barytine selon la qualité sur le marché mondiale
(Duflos.G 2014, Moussaoui E.2015).

BARYTINE	QUALITE FORAGE \$/t	QUALITE CHIMIQUE \$/t	QUALITE CHARGE \$/t
Prix en 2000	40 à 50	75 à 85	220
Prix en 2014	109 à 158	160 à 180	235 à 400
Prix en 2019	145 à 168	180 à 200	270 à 400

PS : L'unité est prise en \$/t parce que c'est un produit du marché mondiale

I.6 Les domaines d'utilisation de la Barytine

I.6.1 La Barytine dans l'industrie pétrolière

Les boues de forage sont des milieux fluides complexes constitués d'eau ou d'huile, de produits chimiques et des minéraux en suspension, la boue injectée dans les forages, doit être capable de faire remonter correctement à la surface les débris de roche produits au fond du trou. Elle assure le refroidissement et la lubrification des outils dans le forage. Elle assure aussi l'imperméabilisation et la stabilité des parois du trou.

La densité de la boue permet d'équilibrer le poids important des tiges de sonde et les éventuelles venues de gaz sous pression, pour prévenir les risques d'explosion. Par addition de barytine on peut porter la densité des boues de bentonite qui est d'environ 1.05 à la valeur voulue qui peut atteindre 2.5.

La Barytine représente jusqu'à 40 % des constituants des boues de forage pétrolier, la consommation de cette matière dans un forage pétrolier varie suivant le type du terrain traversé, la pression des gaz rencontrés et la profondeur du forage.

La Barytine vendue pour boue de forage doit avoir une densité au moins égale à 4.2 et contenir une très faible proportion (250 ppm maximum) de sels solubles, tels que le calcium soluble. De 90 à 95 % du produit doit avoir une granulométrie inférieure à 45 μ , la couleur grise ou marron et la présence d'oxyde de fer ne sont pas rédhibitoires. L'humidité du produit livré varie entre (3 à 5)%. Les spécifications précises de la barytine pour boue de forage sont fournies par "American Petroleum Institute" (API), ainsi que "Oil Companies Material Association" (OCMA) et même l'Association de Recherche sur les Techniques d'Exploitation de Pétrole (ARTEP) (Duflos.G 2014).

I.6.2 La Barytine dans l'industrie chimique

L'industrie chimique absorbe près de 16 % de la consommation mondiale. La barytine est la principale matière pour la fabrication des dérivés du baryum : Carbonates, Chlorures, Oxydes, Hydroxydes, Nitrates, Peroxydes et Sulfates de Baryum.

- **Le Carbonate de Baryum** est le plus important car il est à l'origine de la production de nombreux autres dérivés. Il est utilisé dans la fabrication de produits en terre cuite, telle que les tuiles et les briques, pour contrôler les effets dus à la présence de Gypse ou de Sulfate de Magnésium ; pour diminuer la porosité et prévenir la décoloration. le Carbonate de Baryum entre dans la composition d'une grande variété de produits : verre spéciaux pour

écrans cathodiques, téléviseurs, écrans d'ordinateurs, barrières contre les rayonnements, vernis céramiques, électrocéramiques, porcelaines, émaux, ferrites, etc.

- **Le Sulfate de Baryum précipité**, chimiquement pur, est appelé "blanc fixe". Il est obtenu par traitement d'une solution de sulfure de baryum par une solution de Sulfate de Sodium. Il est utilisé comme charge blanche dans les peintures, caoutchouc, encres et autres produits qui exigent un degré de pureté supérieur à celui que l'on peut obtenir par adjonction de barytine. Le sulfate de baryum extrêmement pur, ou "blanc-baryte", est donné pour 99% de blancheur, (100%=blanc idéal), il sert d'étalon pour l'évaluation de la blancheur d'un produit.
- **Le Lithopone**, est le résultat d'une double précipitation d'une solution de Sulfate de Zinc par une solution de Sulfate de Baryum. Le produit final contient du Sulfate de Baryum et de 30% à 60% de Sulfure de Zinc. La fabrication de Lithopone requiert en général une tonne de Barytine par tonne de produit. Ce pigment blanc a été longtemps apprécié pour la peinture grâce à ses propriétés : blancheur, résistance aux intempéries, pouvoir couvrant, affinité pour l'huile. Dans le passé il a été fabriqué en gros tonnage, mais actuellement il est largement remplacé par des Oxydes de Titane.
- **Le Chlorure de Baryum**, est utilisé dans le traitement de surface comme durcisseur de l'acier, dans la purification des eaux, dans le traitement du cuir et des tissus et dans la fabrication du Magnésium métal. Par électrolyse du Chlorure de Baryum on obtient le Baryum métal.
- **Le Nitrate de Baryum**, est utilisé en très faibles tonnages en pyrotechnie (couleur verte de la flamme), dans la fabrication de balles traçantes, de détonateurs et d'émaux.
- **L'Oxyde de Baryum**, permet dans la métallurgie du fer d'améliorer le rendement du four électrique.
- **L'Hydroxyde de Baryum**, permet d'obtenir des stéarates de Baryum. Les graisses à Baryum sont appréciées pour leur résistance au lessivage, il sert d'additif de stabilisation à la chaleur des PVC.
- **Le Titanate de Baryum**, entre dans la fabrication de composés électroniques et d'équipements de communication.
- **Le Baryum métal**, est aussi produit par réduction de l'Oxyde de baryum. Le métal est utilisé comme capteur de gaz dans les tubes sous-vide, dans les alliages pour bougies et dans les tubes électroniques d'émission d'éléments.

La production de Carbonate de Baryum exige une teneur en BaSO_4 varie entre (97 à 98) %. Les impuretés restantes représentent des frais pour le chimiste et des pénalités pour le

producteur. Les oxydes de fer ou la silice ne doivent pas dépasser le seuil de 01%, ce qui correspond en prix de revient à une diminution de plusieurs pourcents de BaSO_4 . Le ratio $\text{SrSO}_4 / \text{BaSO}_4$ exprimé en % doit être aussi faible que possible, d'environ 01 %. La teneur en CaF_2 doit correspondre à des traces, quelques centaines de ppm. Les chimistes veillent à utiliser des concentrés à faibles contenus en sulfures de Plomb et de Zinc, en Cuivre, en Nickel, terres rares et carbonates (Duflos.G 2014).

I.6.3 La Barytine comme charge minérale

Seulement (05 à 06)% de la consommation mondiale de barytine correspondent à l'emploi comme charge dans une grande variété de produits, avec ces dérivés synthétiques que sont le lithopone et le blanc fixe, la barytine a l'avantage d'être blanche, inerte, dense et non abrasive. Elle est résistante aux intempéries et à la faculté d'absorber les radiations. Ces différentes qualités sont mises à profit dans la fabrication de peintures, papier, caoutchouc, plastiques, barrières de protection contre les rayonnements et matériaux de friction.

- En peinture automobile, la Barytine entre comme charge dans les couches d'apprêt pour contribuer à l'aspect lustré de la dernière couche.
- La Barytine entre dans la composition des plastiques et caoutchouc des dessous de moquettes et de certains tapis et dans les éléments plats insonorisant pour l'industrie automobile.
- Dans l'industrie papetière, la Barytine est utilisée comme support des couches sensibles pour impression photographique.
- Elle entre dans la composition des encres d'imprimeries.
- En verrerie, l'emploi de la Barytine permet d'économiser l'énergie, elle décolore les pates de verre, les rends plus aptes aux manipulations et augmente la brillance. Les fabricants de verre demandent généralement une Barytine avec : $\text{BaSO}_4 > 90\%$, $\text{SiO}_2 < 2.5 \%$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.15 \%$. la granulométrie doit être comprise entre (0.60 et 0.106) mm (Duflos.G 2014).

En général la Barytine pour charge doit être blanche ou blanchissable par traitement à l'acide sulfurique et non abrasif. Dans les charges pour peintures la Barytine peut être substituée par des carbonates et sulfates de strontium et des carbonates de calcium, généralement moins chers.

- La Barytine est employée dans les bétons denses qui occupent 60 % du volume d'un béton standard. Les applications concernent une grande variété d'ouvrages : construction de

ports ou de terminaux pétroliers, contrepoids de ponts, stabilisateurs de conduites sous-marines, ballaste de bateaux.

- Les bétons denses à barytine forment aussi des barrières de protection contre d'éventuelles radiations, ils sont mis en œuvre pour la construction de laboratoire, de centres nucléaires et de bases militaires atomiques.
- La barytine est employée comme charge inerte dans les matériaux de friction tels que plaquettes de freins et disques d'embrayage. Selon le produit, la quantité de barytine varie entre (10 et 40) %. La barytine doit avoir une densité au moins égale à 4.3 et 99% du produit doit avoir une granulométrie inférieure à 40 μ (Duflos.G 2014).

I.7 Conclusion

Le Baryum est un élément chimique qui porte le numéro 56 dans la classification périodique de Mendeleïev des éléments. La première découverte du Baryum en 1774 par Carl Wilhelm Scheele sous forme d'Oxyde de Baryum.

Les gisements de Barytine peuvent être classés dans les quatre groupes suivants en fonction des caractéristiques physiques, des caractéristiques géochimiques et du cadre géologique : gisements sédimentaires (bedded-sedimentary), gisements volcaniques (bedded-volcanic), gisements filonien (vein, cavity-fill) et les gisements résiduels (bedded-residual).

La Barytine est un minéral très important dans le domaine industriel et surtout dans l'industrie pétrolier et chimique à cause de ces différentes propriétés (densité, blancheur, absorbance des rayons ...etc). En fonction de ses usages la Barytine fait l'objet de nombreuses spécifications et normes, souvent spécifié par l'utilisateur. Il est possible d'une part de se référer aux normes éditées par AFNOR, d'autre part de consulter les fiches techniques fournies par les producteurs des produits Barytés. Concernant la barytine pour boue de forage des normes précises sont spécifiées aux USA par l'API (Américan Péterolium Institute).

Les marchés de la barytine sont conditionnés par un usage principal (80 %) lié aux forages d'exploration et d'exploitation pétrolière et gazière. Ce marché fluctue, puisqu'il dépend du volume des travaux de recherche et de production des hydrocarbures dans le monde.

Chapitre II

*Mise au point sur
la valorisation de la Barytine*

II.1 Introduction

La pratique du traitement des minerais est aussi ancienne que la civilisation humaine. Les minerais et les produits dérivés des minerais ont formé nos cultures de développement à partir des silex de l'homme de l'âge de pierre aux minerais d'uranium de l'âge atomique (Basics in mineral processing 2015).

La minéralurgie consiste à séparer les différents minerais contenus dans un minerai pour collecter sa partie utile. Pour ce faire, le minerai subit différents procédés de traitement impliquant des techniques physiques et chimiques. Il sera ensuite prêt à être traité par voie métallurgique (traitements thermiques et chimiques) afin d'obtenir métaux et alliages (MINERALURGIE 2015).

La Barytine est largement utilisée dans les différents secteurs industriels pour ses propriétés particulières. Son usage principal est comme additif de forte densité pour les boues de forage dans l'industrie pétrolière, mais on l'emploie aussi dans l'industrie chimique pour la production de dérivés du baryum et comme charge minérale. Le développement significatif de ces industries les dernières années a entraîné une augmentation rapide de la demande du Barytine en quantité et en qualité. L'état actuel de la production de cette matière à haute teneur ne peut plus répondre aux besoins des consommateurs en Algérie. La solution est l'exploitation et le développement des gisements de Barytine qui génère la nécessité de les valoriser pour améliorer la qualité du concentré obtenu répondant ainsi aux exigences techniques pour les consommateurs.

La plupart des minerais de valeur (métalliques et industriels) sont évalués en fonction de leur pureté. Après libération par réduction et contrôle de taille (concassage, broyage, criblage), tous les minerais peuvent être séparés chacun d'eux à part. En fonction de leurs propriétés, ils peuvent être séparés par différentes méthodes de valorisation (la séparation gravimétrique, la séparation magnétique, la flottation, la séparation électrostatique, les méthodes chimiques et méthodes biologiques), voir figure 1. Ce chapitre comporte les principes et les avancements récents dans le domaine d'enrichissement des minerais de Barytine à travers le monde (Basics in mineral processing 2015, Messai.A 2019).

II.2 Vue d'ensemble des processus d'enrichissement de la Barytine

La géologie, la minéralogie, les caractéristiques des produits, les applications, les marchés, la recherche et le développement, sont des paramètres très importants à prendre en compte lors du processus d'enrichissement du minerai de Barytine (Andrews et Collings, 1989). Au cours de ces dernières années, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur divers types des minerais de barytine en utilisant des méthodes de flottation, concentration gravimétrique, séparations électrostatique et magnétique (Figure II.1). Les méthodes de flottation sont utilisées pour la récupération de la barytine des minerais complexes. Les techniques de traitement dépendent du type de minerai, de la maille de libération et de la composition de la gangue. La méthode de flottation est celle préférée pour la Barytine très fine libérée (44 μm) selon (Bulatovic, 2015, Bhaskar Raju.G et al 2004, Kolawole.F.O et al 2019).

L'enrichissement du minerai de Barytine par des méthodes physiques (par gravité ou flottation sont les plus couramment utilisés) est capable de produire des concentrés de haute qualité avec 97% en BaSO_4 ou plus selon (Ciccu.R et al 1987, Deniz,2000, Kolawole.F.O et al 2019).

Il est important de déterminer si le gisement est à faible ou à haute teneur. L'étude minéralogique fournit des détails sur les minéraux composants et l'association entre eux (Andrews et Collings, 1989). Les méthodes de valorisation servent de guide pour les futures études du minerai avec des caractéristiques similaires des minéraux, qui est résumé dans le Tableau II.1. Il a été constaté que le taux de concentration et de récupération indiquent l'efficacité d'une technique d'enrichissement pour atteindre un produit désiré. La concentration gravimétrique peut être utilisée pour récupérer les grains de barytine de grosses dimensions, tandis que la flottation peut être utilisée pour les grains fins.

La Barytine est généralement fragile relativement aux autres minéraux associés, elle va être valorisé sous forme des particules fines après concassage. Lorsque l'oxyde de fer est trouvé en association avec la barytine, il est facilement séparé par la séparation magnétique (Da Luz et Baltar, 2005). La séparation par milieu dense et jiggage ont été utilisé pour récupérer la barytine à gros grains, tandis que la table à secousses, le classificateur à râteaux et des spirales pour récupérer la barytine à grains fins. Il a été rapporté que pour les minerais du Lake Ainslie étaient les plus fins à 80% -44 μm , indiquant une maille de libération fine. La taille de broyage la plus grossière rapportée était de 420 μm (Andrews et Collings, 1989).

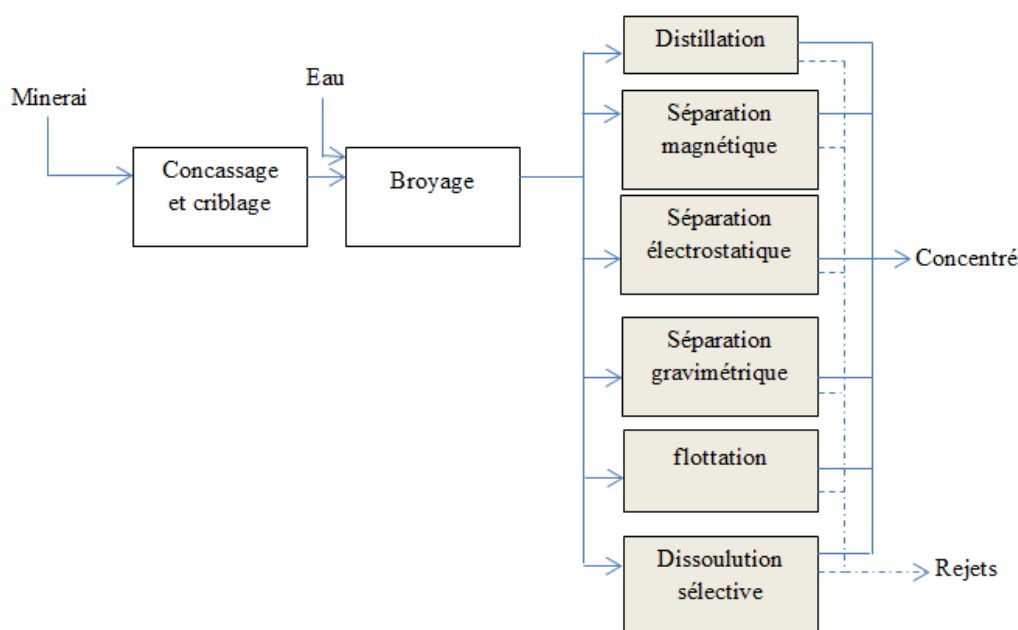


Figure II.1 Les méthodes d'enrichissement de la Barytine
(Ripley.E et al 1996, Lottermoser, B. G. 2007, Kolawole.F.O et al 2019).

Tableau II.1 Les méthodes d'enrichissement de la Barytine, principes et applications
(Bulatovic.2015, Da Luz et Baltar.2005, Kolawole.F.O et al 2019).

Méthode	Principes	Application
Classification	Couleur, densité et autres différence entre Barite et minéraux associés.	Des blocs de Baryte étant sélectionnés
Séparation gravimétrique	Différence de la densité entre la Baryte et minéraux associés qui est appliqué seulement pour les grosses particules.	Elle comprend le lavage, le dischlammage, le criblage, le jiggage, la table à secousses et autres processus pour des minerais résiduels.
Flottation	Différence entre les propriétés physico-chimiques de surface de la Baryte et minéraux associés. Elle est appliquée pour les particules fines.	Utile seulement pour la Baryte d'origine sédimentaire et hydrothermale en plus des sulfures et fluorite.
Séparation magnétique	La différence des propriétés magnétiques entre la Baryte et autres minéraux associés.	Principalement utilisée pour éliminer les minéraux de gangue d'oxyde de fer.

II.3 Recherche actuelle sur la valorisation de la Barytine

Au cours de ces dernières années, des travaux de recherche ont été effectués sur la valorisation de divers types de minerai de barytine, avec une variation de la géologie et des gangues associées (Browning JS, Rampacek C.1964, Bulatovic.1987, Bulatovic.2015). Les méthodes utilisées sont la séparation magnétique, la séparation gravimétrique, la séparation électrostatique et la flottation. Pour la séparation magnétique, les réactifs (stéarate de manganèse

et oléate de manganèse) ont été développés pour rendre sélectivement la surface de certains minéraux magnétique, ce qui facilite la séparation des minéraux magnétiques (ferromagnétiques) des minéraux non magnétiques (diamagnétiques). Dans le cas de la séparation gravimétrique, des recherches ont été menées pour découvrir les milieux organiques denses (tétra bromure d'acétylène ou tétrabrométhane), qui garantirait une séparation efficace des Barytines. La séparation électrostatique, est une méthode récente utilisée pour la Barytine, elle se base sur la différence de conductivité pour séparer les minéraux conducteurs des minéraux non conducteurs. Enfin, en flottation, beaucoup de réactifs non couteux et respectueux de l'environnement, ont été développés ces dernières années pour améliorer l'efficacité de la séparation entre les minéraux utiles et les minéraux de gangue (Molaei et al 2017). Études appropriées de la solubilité, abstraction oléate et mobilité électrophorétique de ces réactifs a été réalisée (Raju et al 2016, Kolawole.F.O et al 2019). Plusieurs études d'optimisation des paramètres de flottation de la barytine en utilisant plusieurs types des réactifs ont été effectuées (Kecir.M,1993, Kecir.M et Botula.J 2015, Kecir.M et Kecir.A, 2015).

II.4 La séparation gravimétrique

Le mode de concentration dans un fluide d'un matériau prend en compte la différence qui existe entre les masses volumiques des minéraux de valeur d'une part et des gangues d'autre part. La concentration gravimétrique s'effectue dans un champ de forces de masse, en général celui de la pesanteur, combiné à l'action d'autres forces telles que la résistance offerte par le fluide (en général de l'eau pour la gravimétrie en voie humide, plus rarement de l'air pour la gravimétrie en voie sèche) au mouvement des grains à séparer ou les forces de frottement entre ces particules et une surface support fixe ou mobile. Lorsque la pesanteur ne suffit pas, on a recours à une force centrifuge (Robert.H et Robert.J 2012).

II.4.1 Le principe de la séparation gravimétrique

La concentration gravimétrique est possible grâce aux différences de mouvement des particules dans un fluide en fonction de l'action simultanée de la gravité (ou d'une force centrifuge) et d'une ou plusieurs autres forces, en général la résistance à la pénétration dans un milieu plus ou moins fluide (gaz, eau, liquide homogène ou mélange composé d'un fluide et de particules solides maintenues en suspension) (Pierre.B, Robert.J 2012a). Le mouvement d'une particule sphérique dans un fluide de faible concentration est régi par l'équation de la sédimentation libre :

$$m \times \frac{dv}{dt} = \frac{\pi D^3}{6} \gamma (\rho_s - \rho_f) - \Phi (Re) \frac{\pi D^2}{4} \rho_f \frac{v^2}{2} \dots \dots \dots (II-1)$$

Avec ; γ : accélération (dans le cas de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

ρ_f : masse volumique du fluide.

ρ_s : masse volumique du solide.

D : diamètre de la particule sphérique.

$\Phi(Re) = C$ coefficient de résistance.

Lorsque $dv/dt = 0$, la vitesse limite est :

- en régime laminaire (où $Re < 1$) et pour $D < 100 \mu\text{m}$: $v_{lim} = D^2 g (\rho_s - \rho_f) / 18 \mu$ avec μ viscosité dynamique.
- en régime turbulent (où $Re > 500$) et pour $D > 2 \text{ mm}$: $v_{lim} = \sqrt{(\rho_s - \rho_f) D g / \rho_f}$.

Il est essentiel pour une séparation efficace qu'il y ait une différence de densité entre le minéral et la gangue. Une idée du type de séparation possible peut être tirée du critère de concentration (critère de Taggart C_T) (Barry.A, Tim.N 2006) :

$$C_T = (\rho_1 - \rho_f) / (\rho_2 - \rho_f) \dots\dots\dots(\text{II-2})$$

Ou ; ρ_f : masse volumique du fluide.

ρ_1 : masse volumique du minéral lourd.

ρ_2 : masse volumique du minéral léger.

Tableau II.2 Les prévisions de possibilités de traitement par le critère de Taggart (Pierre. B, Robert. J, 2012a) (Barry.A, Tim.N 2006)

Valeur de C_T	Difficulté de la séparation
$> 2,5$	Facile pour toutes granulométries
$1,5 < C_T < 2,5$	Possible pour des granulométries $> 200 \text{ mm}$
$1,25 < C_T < 1,5$	Possible pour des granulométries $> 1,7 \text{ mm}$
$< 1,25$	Impossible

II.4.2 La méthode de la nappe pelliculaire fluant

La longueur du parcours effectué par une particule mise en mouvement, sur un plan incliné, par un film liquide qui s'écoule à sa surface, dépend de deux facteurs principaux :

- Le temps mis par la particule pour atteindre la surface du plan incliné en fonction de sa masse volumique, de sa granulométrie, de son coefficient de forme, etc.

- La résistance à l'avancement de la particule.

L'un des phénomènes mis en jeu est l'alluvionnement au cours duquel les grains lourds et gros sont les premiers à rencontrer le support et peuvent se trouver piégés alors que les grains légers et fins sont emportés par le courant. Les grains qui ont atteint le support se meuvent par saltation et la vitesse d'entraînement dépend de leur dimension. Ainsi, les grains ayant la masse volumique la plus élevée se trouveront à la partie basse (ou intérieure s'il y a rotation) et ceux de masse volumique la plus faible, à la partie haute (ou extérieure) (Pierre.B, Robert.J 2012b).

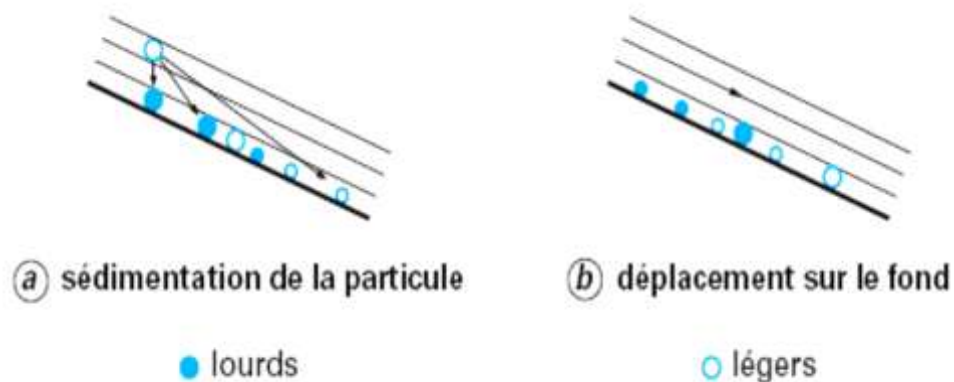


Figure II.2 Le principe de la concentration par la nappe pelliculaire fluante (Pierre. B, Robert.J 2012b)

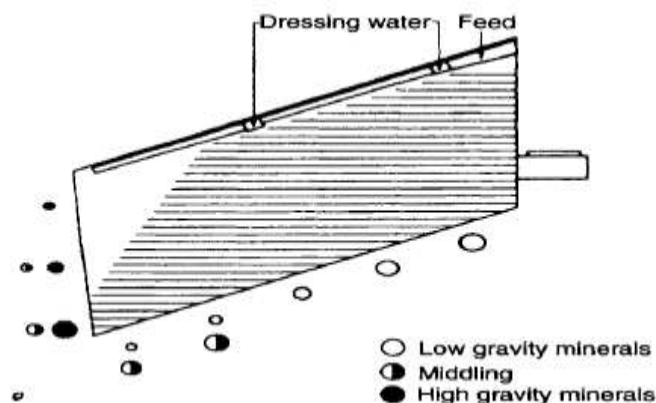


Figure II.3 Le comportement des particules sur une table à secousse selon leurs poids (Barry.A, Tim.N 2006)

II.4.3 La méthode de l'accélération différentielle

Dans cette méthode, les particules à séparer sont soumises à des mouvements périodiques (pulsations-succions) verticaux imposés au liquide qui provoquent une sédimentation différentielle entre phases lourdes et phases légères. En fait, trois composantes entrent en jeu : la sédimentation gênée, l'accélération différentielle et la filtration interstitielle (Pierre.B, Robert.J 2012a).

A leur part, les produits sont soumis à une pulsation verticale périodique au cours de leur écoulement dans un bac. La pulsation est engendrée soit par le mouvement du bac, soit par le mouvement de l'eau, le bac étant fixe. Ces appareils se nomment Jigs ou bacs à piston. Le jiggage est une des plus anciennes méthodes utilisées. Elle consiste ou la séparation réalisée dans un lit de particules fluidisées par les courants ascendants et descendants de l'eau provoquant ainsi une stratification selon la masse volumique des grains (Pierre.B, Robert.J 2012b).

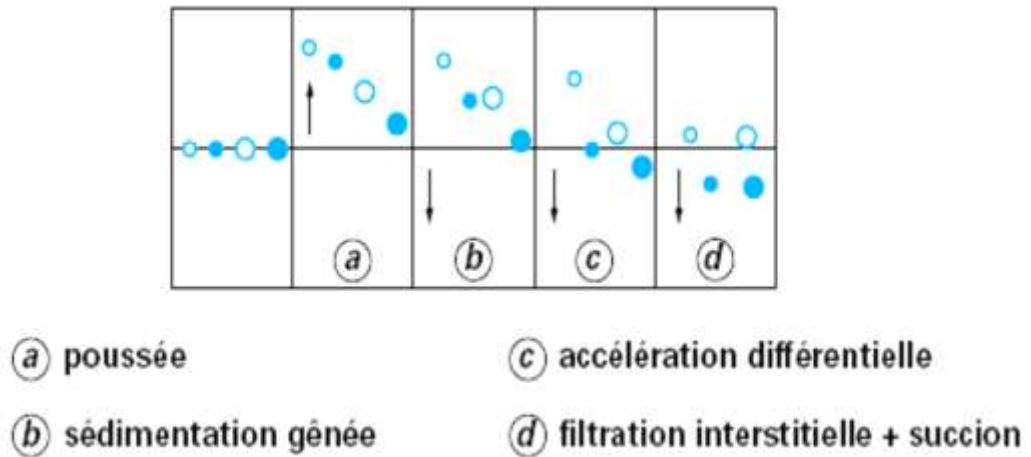


Figure II.4 Le cycle de jiggage et le comportement des particules pendant le jiggage (Pierre. B, Robert.J, 2012b).

II.4.4 La méthode des milieux denses

Dans cette méthode la séparation est réalisée dans un liquide d'une masse volumique déterminée, elle constitue la seule utilisation réelle de la gravité, dans le laboratoire, on emploie des liqueurs organiques, tandis qu'industriellement ce sont des suspensions (pseudo-solutions) d'un matériau fin et dense dans de l'eau (Pierre.B, Robert.J 2012a).

Dans cette méthode, les solides à séparer sont plongés dans un fluide dont la masse volumique est comprise entre celle des produits lourds et celle des produits légers, la séparation se fait suivant la poussée d'Archimède simple ou multipliée par un coefficient de force centrifuge, cette poussée agit de la même façon quelle que soit la dimension des particules et la précision de la séparation dépend essentiellement des qualités de fluide et de degré de libération atteint (Pierre, Robert.J 2012b).

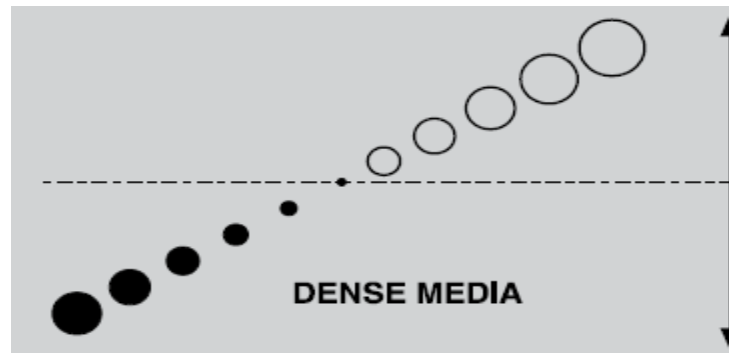


Figure II.5 La séparation par milieu dense (*Basics in Minerals Processing 2010*).

II.4.5 Travaux antérieurs sur la séparation gravimétrique de la Barytine

En considérant les minerais à haute teneur et à la libération grossière, la séparation par milieu dense et le jiggage sont normalement adoptés, tandis que les techniques gravimétriques sont utilisées pour produire et obtenir des concentrés intermédiaires (Raju et al 2016). La méthode de concentration physique pour la récupération de la Barytine peut être utilisée pour les minerais contenant des Silicates, de la Calcite et du Fer comme minéraux de gangue principale (Bulatovic, 2015). Une combinaison de la séparation gravimétrique et des méthodes électromagnétiques sont utilisées pour enrichir la Barytine de Tunga avec une densité moyenne égale à 3.16, (Oladipo et Adeoye-Oladapo, 2011).

Une séparation par milieu dense et par jiggage sont utilisés pour récupérer la Barytine à gros grains, tandis que la table à secousses, la spirale et le classificateur à râteau pour récupérer la Barytine à grains fins. Une comparaison intéressante entre le jiggage humide et sec a été démontrée dans une étude de plusieurs minerais de Barytine de la Nouvelle Scotia (Andrews et Collings 1989). Diverses études de CANMET en utilisant la concentration gravimétrique ont atteint 90% en BaSO_4 , sauf dans les cas où des matières premières à faible teneur étaient utilisées. Andrews et Collings 1989 ont rapporté que quelques études de blanchiment ont été menées sur la Barytine à haute concentration pour éliminer les traces de Fer.

II.5 La flottation

La flottation est un procédé d'enrichissement de plusieurs minéraux utiles. Il existe dans le monde entier des milliers de laveries qui traitent les Sulfates, Sulfures, Feldspaths, Fluorine et pour les minéraux rares et les minerais non ferreux, à signaler qu'il n'existe pas d'autres procédés d'enrichissement plus efficace que la flottation, comme tous les procédés de traitement, la flottation est basée sur la différence de valeurs des propriétés des minéraux à séparer. On utilise pour cela la différence des propriétés physico-chimiques de surfaces des minéraux et plus précisément la différence de leurs énergies superficielles libres.

Le domaine d'application de la flottation est théoriquement illimité, n'importe quel minéral peut être séparé par cette méthode parce qu'il n'existe pas dans la nature des minéraux ayant la même valeur d'énergie spécifique superficielle libre. Dans la pratique l'enrichissement confirme la possibilité d'application de la flottation pour la séparation de tous les minéraux et l'importance de la flottation dans l'industrie s'accroît de jour en jour, son application s'élargit et occupe la première place parmi les autres procédés d'enrichissement en terme de qualité et de variété de la matière première traitée (Ovtcharov. V et Khassiev. T 1986)

II.5.1 Le principe de la flottation

Le principe de la flottation est illustré par la Figure II.6, il repose sur la capture de corps en suspension dans une pulpe à traiter, par des collecteurs flottants, le plus souvent des bulles d'air. Dans ce cas, ce sont des matériaux hydrophobes en suspension, qui viennent se réfugier à l'intérieur des bulles, après cette capture, appelée hétéro coagulation, les collecteurs transportent les corps piégés jusqu'à la surface de la cellule, dans laquelle le procédé de flottation est mis en œuvre, dans la partie supérieure, les agglomérats qui ont été formés sont retenus dans une mousse, d'origine naturelle ou artificielle, qui a piégé ces corps. La mousse chargée est ensuite évacuée par déversement ou raclage, afin de la revaloriser ou d'éliminer définitivement le matériau en suspension. L'effluent et la pulpe sont débarrassés du matériau en suspension, la séparation peut être sélective, dans ce cas, l'effluent reste chargé d'un matériau de nature différente de celui évacué dans la mousse (Vincent Sarrot 2006).

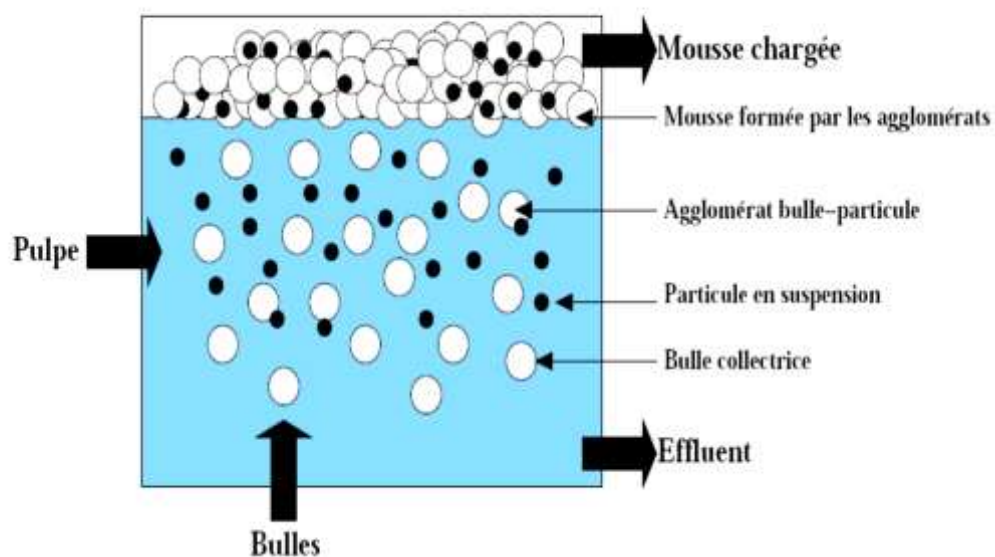


Figure II.6 Le principe du procédé de flottation (Vincent Sarrot 2006)

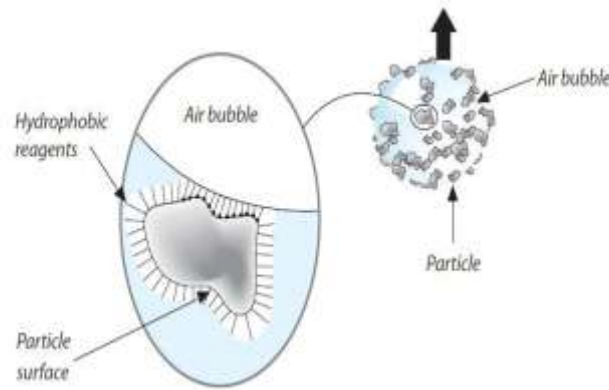


Figure II.7 Une bulle d'air transportant les minerais sélectionnés
(*Basics in Minerals Processing 2010*)

II.5.2 Les réactifs de la flottation

Le terme réactif se définit comme un agent qui produit des réactions chimiques ou une substance qui agit sur une autre dans une réaction chimique. Le mot réactif (Fr : réactif, An : reagent, Al : reagens, Sp:reactivo). On estime qu'environ 2 milliards de tonnes de minerai sont traités par flottation chaque année (Pearse.M.J, 2005). La classification moderne des réactifs est basée sur leurs fonctions. Sur cette base, les réactifs sont divisés en collecteurs, agents moussants, régulateurs et déprimants. Plusieurs milliers de produits chimiques ont été soit testés ou suggérés comme réactifs de flottation. De nos jours, il y a seulement quelques centaines de ces réactifs qui sont largement utilisés dans la flottation (Srdjan M.Bulatovic 2007).

II.5.2.1 Les réactifs collecteurs

Les réactifs collecteurs ont pour objectif de rendre hydrophobes les matériaux en suspension, pour faciliter l'adhésion aux bulles d'air collectrices. Les xanthates, les dithiophosphates, les dithiophosphinates, la famille des thioels, les acides gras et leurs savons, les esters sulfuriques d'alcool et les sulfonâtes sont des exemples. Les xanthates et les dithiophosphates utilisés pour la flottation des sulfures. Les acides gras et leurs savons utilisés pour les minéraux non métalliques (Vincent Sarrot 2006), de nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'utilisation de divers collecteurs lors de la flottation de la barytine de différents types de minerais, de bons résultats en présence de l'acide oléique ont été obtenus sur les minerais contenant de la silice sous forme de minéraux gangue (Albert.B et al 1968, Bulatovic 2015). Les collecteurs largement utilisés pour la flottation de la barytine sont représentés dans le *tableau II.3*. (Kecir.M, 1993, Kecir.M et Botula.J, 2015, Bulatovic.2015).

Tableau II.3 Les collecteurs utilisés en flottation de la Barytine

Réactifs	Composition
Oléat de K	Sel de l'acide oléique $C_{17}H_{33}COOH$
Aero 825	Mélange de sulfonât de Na, mazout et eau
S-7723	Sulfate
Sinclair S-40	Sulfonate de Na
Sulfosuccinate 2875	$ROOC-CH_2-CH_2-COO M^+ SO_3 M^+$
Sulfopon T 35	Alkylsulfate de Na
Dodecylsulfate de Na	$C_{12}H_{25}SO_4 Na$
Flotbel R 171 A	Sel sodique d'un ester phosphaté
Armacflote MFA 18	Collecteur cationique

II.5.2.2 Les réactifs activant et déprimants

Les réactifs activant et déprimants servent à moduler l'action des réactifs collecteurs. En effet, dans le cas d'une flottation sélective, essentiellement en minéralurgie, seule une partie des matériaux en suspension doit être flottée : les minéraux des différents métaux doivent être séparés les uns des autres. Les activants ont alors pour objectif de favoriser la capture d'un type de métal. Au contraire, les déprimants ont pour objectif de défavoriser la capture des autres types de métaux. Ces réactifs sont des sels métalliques, comme le sulfate de cuivre, de zinc ou de fer, des oxydants ou des réducteurs comme les sulfites et le permanganate de potassium, des produits organiques tels l'amidon, cette liste n'est pas exhaustive puisque dépendant de la nature de l'ensemble des matériaux en suspension (Vincent Sarrot 2006).

D'après des travaux de recherche; un certain nombre d'agents inorganiques activant la barytine ont été examinés. On peut citer : $NaCl$, $MgCl_2$, $Pb(NO_3)_2$ et $BaCl_2$. (Bulatovic.2015, Hicyilmaz.C et Ghaemi.M 1996).

II.5.2.3 Les agents moussants

Les moussants sont des agents tensioactifs hétéro polaires de matière organique qui sont absorbé sur l'interface (air-eau-bulles) les particules des moussants comportent une tête polaire orienté vers l'eau et la non polaire vers l'air. Parmi les plus utilisés on a l'huile de pin et alcool aliphatique.

Les agents moussants favorisent d'une part la formation de bulles d'air et, d'autre part, leur stabilité. La stabilité d'une bulle collectrice joue un rôle important dans la stabilité de l'agrégat, notamment à l'arrivée à la surface libre de la cellule de flottation. En effet, l'agrégat

doit résister à la technique de récupération des matériaux en suspension, par débordement ou raclage. Une rupture de l'agrégat formé, avant récupération, risque de remettre le matériau en suspension. Le bénéfice de l'opération est dans ce cas perdu (Vincent Sarrot 2006). Plusieurs chercheurs ont utilisé l'huile de pin comme un moussants lors de la flottation de la Barytine (Bulatovic.2015, Moussaoui.E 2015, Baladha.F 2012 ...etc)

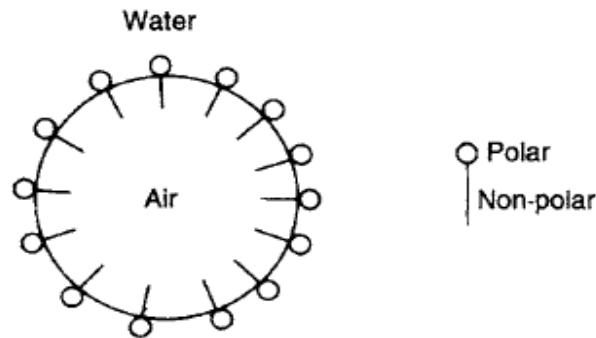


Figure II.8 Action du moussant (Barry.A, Tim.N 2006)

II.5.2.4 Les régulateurs du milieu

Les régulateurs, ou modificateurs, sont largement utilisés en flottation pour modifier l'action du collecteur, soit en intensifiant, soit en réduisant son effet sur la surface minérale. Ils rendent ainsi l'action du collecteur plus sélective vis-à-vis de certains minéraux. Les régulateurs peuvent être classés comme activateurs, dépresseurs ou modificateurs de Ph (Barry.A, Tim.N 2006).

Les réactifs modificateurs largement utilisés lors de la flottation de la Barytine sont représentés dans le Tableau II.4. Les carbonates de soude sont généralement utilisés pendant la flottation de la Barytine pour maintenir le pH à 8–10, ce qui dépend du type de collecteur utilisé. L'Hydroxyde de Sodium est une alternative au carbonate de soude, qui est utilisé lorsqu'il y a peu ou pas de Calcite dans l'alimentation de flottation de Barytine. Le Silicate de Sodium est un réactif important lors de la flottation de la barytine. Il agit comme un dépresseur de Silicate. Les concentrations varient généralement de 500 à 2000 g/t. Des études sur le Chlorure d'Aluminium ont montré qu'en présence de chlorure d'aluminium, la dépression de la Calcite est améliorée à des concentrations d'environ 300 g/t. Des ajouts plus élevés ont un effet négatif sur la flottation de la Barytine.

Tableau II.4 Les réactifs modificateurs largement utilisés en flottation de la Barytine (Bulatovic.2015)

Réactifs	Actions
Carbonate de soude (Na₂CO₃)	Modificateur de pH, déprimant quartz
Silicate de sodium (Na₂SiO₃)	Déprimant Silice
Chlorure d'aluminium (AlCl₃)	Déprimant calcite
Quebracho	Déprimant calcite
Acide citrique (C₆H₈O₇)	Déprimant Fluorite
Acide Tannique	Déprimant calcite
Acide oxalique	Déprimant silice et d'oxydes de fer
Fluorure de sodium (NaF)	Déprimant Barytine
Chlorure de Barium (BaCl₂)	Activant Barytine

II.5.3 L'efficacité de la flottation

Dans la méthode de flottation, il existe des paramètres tels que le pH, le type et la quantité de réactif, la taille des particules et les propriétés de la pulpe (la température, la densité, le débit de la pulpe ...) qui doivent être contrôlés (Güven et al 2015). En plus de ces paramètres, la taille des bulles, le régime des réactifs et les nouvelles machines sont de nouvelles considérations dans les études de flottation (Tülay.T et al 2019). L'efficacité de la flottation dépend de conditions suivantes :

II.5.3.1 Les grosseurs des minerais à flottés

La préparation mécanique d'un minerai avant sa flottation revêt une importance considérable, car le degré ainsi que le mode de broyage ont une influence directe sur le rendement de l'opération. En effet, il faut en premier lieu que la maille de libération du minerai à extraire soit atteinte, de façon à obtenir une récupération optimale du minéral avec un minimum de gangue. Par ailleurs, il est absolument nécessaire d'éviter le sur-broyage du minerai qui aurait pour effet de créer un phénomène d'adagulation (recouvrement par les ultrafines) ; les ultrafines, ou schlamms, recouvrent les particules du minerai, gênant ainsi la fixation du collecteur et diminuant le rendement de l'opération. De même, les grandes particules sont indésirables pour la flottation, vu qu'elles exigent une grande consommation des collecteurs pour augmenter leur hydrophobie (Gilles.B 1981, Moussaoui.E 2015).

II.5.3.2 La densité de la pulpe de la flottation

Il est indésirable d'avoir des pulpes très denses ainsi que les pulpes très diluées. La dilution optimale de la pulpe dépend de la grosseur du minéral à flotter, sa densité et de la qualité voulue du produit de mousse. La densité optimale de la pulpe augmente avec l'augmentation de la grosseur et de la densité du minéral à flotter. Pour diminuer les pertes du minéral utile dans un rejet on utilise les pulpes plus denses. Alors que pour augmenter la qualité du produit de mousse, on utilise les pulpes plus diluées (Gilles.B 1981, Moussaoui.E 2015).

II.5.3.3 Le régime des réactifs de la flottation (Gilles.B 1981, Moussaoui.E 2015)

Il s'agit de :

- La gamme des réactifs de la flottation.
- Le dosage des réactifs de la flottation.
- Les points de chargement.
- La durée de conditionnement de ces produits.

II.5.3.4 L'intensité de l'aération et de l'agitation de la pulpe

Dans les machines de flottation mécaniques, l'aéragé dépend de l'agitation de la pulpe ou bien de la vitesse de rotation des agitateurs. Plus grande est l'agitation, plus grand est l'aéragé, mais il faut rappeler que l'agitation forte contribue à l'augmentation des fines détachants des bulles d'air, alors que la faible agitation contribue à la décantation des grosses particules au fond de la cellule de flottation. En résumé, l'agitation doit être optimale pour assurer un bon aéragé et une meilleure distribution des particules des bulles d'air dans tout le volume de la cellule (Gilles.B 1981, Moussaoui.E 2015).

II.5.3.5 La température de la pulpe

La flottation est un procédé physico-chimique dont la vitesse dépend de la température du milieu à savoir que l'augmentation de la température de la pulpe implique une amélioration en termes de dispersion du collecteur dans la cellule et donc, une augmentation de la vitesse de flottation (Gilles.B 1981, Moussaoui.E 2015).

II.5.3.6 L'influence du Ph

Le Ph possède une influence certaine et non-négligeable sur le rendement d'une opération de flottation. Du fait que le pH du milieu agit directement sur le potentiel surfacique des particules. Ainsi, on définit le Point de Charge Nul PCN, pour lequel le potentiel zêta d'une particule minérale est nul, et qui est atteint suite à un pH bien déterminé. On comprendra aisément l'intérêt présenté par le PCN lors de la flottation, car il facilite l'action du collecteur, ce

qui conduit à une réduction de sa consommation ; dans certains cas, on peut même se passer de l'utilisation du collecteur (Moussaoui.E 2015). La Figure II.9 montre l'efficacité du pH lors de la flottation de la barytine à l'aide d'acide oléique (Bulatovic, 2015).

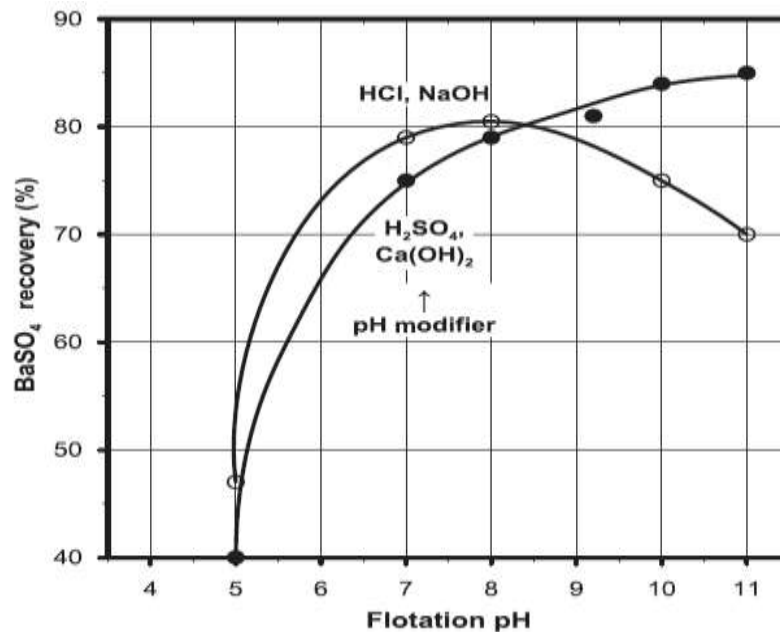


Figure II.10 L'effet du pH sur la flottation de la barytine du minerai siliceux à l'aide de l'acide oléique (Bulatovic, 2015).

II.5.3.7 La durée de la flottation, le schéma de la flottation et le débit de la pulpe

Toutes ces conditions ont une approche beaucoup plus pratique et sont déterminées à partir de plusieurs essais. Au départ il faut identifier les variables afin de les ajuster tel que la vitesse d'agitation, le débit de l'air et les durées de conditionnement, ensuite nous préparons les solutions des réactifs à base des solutions principales ou des produits solides en respectant les dosages et les quantités à utiliser (Gilles.B 1981, Moussaoui.E 2015).

II.5.4 Travaux antérieurs sur la flottation de la Barytine

Nombre d'auteurs très connus dans cette spécialité ont mené des recherches sur la flottation de la Barytine tels que : Marinakis, Shergold et al.1985, Teke et al.2002, Ozkan et al.2005, Deniz et al.2012, Widanagamage et al. 2015, Wang et al. 2016, Sokic et al.2016. Bulatovic 2015 a mentionné que la flottation de la barytine peut être effectuée par type inverse ou directe. L'élimination des sulfures ou de la Pyrite laissant une perte de Barytine avec les rejets, elle peut être récupérée par la flottation inverse, tandis que la flottation de Barytine des minerais qui contiennent du Feldspath, des Silicates et les oxydes de terre rares est fait de type directe (Bulatovic, 2015). La meilleure sélectivité entre les minéraux flottants et non flottants a été obtenue à un pH de 10 à partir de la flottation de minerais synthétiques de Barytine et de

Célestine (Estefan 1974). Dans une étude récente de (Sonmez et Cebeci 2003) une agglomération huilière a été utilisée pour récupérer les particules de la Barytine.

Des nombreuses recherches ont porté sur la flottation directe avec l'usage de l'acide oléique/oléate en tant que collecteurs anioniques. Généralement, l'oléate produit des concentrés de haute qualité, mais généralement inacceptable pour l'application de forage, en raison de l'oléate adsorbé sur la surface de barytine et la perturbation des caractéristiques de sédimentation dans les épaisseurs, ce qui conduit à l'entraînement de l'air et par conséquent, abaisse la densité spécifique de la boue de forage. L'élimination de l'oléate absorbé peut être effectuée par la chaleur. Cependant, il est techniquement difficile et coûteux. D'où la technique de flottation inverse, dans laquelle la Silice, les minéraux silicatés et d'autres minéraux ont flotté en utilisant des amines grasses comme collecteurs cationiques. En outre, il est avantageux de séparer la silice avec environ de 11% de la barytine, car la silice est négativement accusé, les réactifs cationiques sont les plus appropriés en tant que collecteurs (Raju et al.2016).

La flottation inverse a été utilisée dans la valorisation des décharges de la barytine de faible teneur imbriquées avec des minéraux de gangue utilisant de l'amine comme collecteur pour éviter le revêtement du collecteur sur la surface de la barytine. La colonne de flottation a été utilisée contre les cellules de flottation conventionnelles (Raju et al. 2016). Un prétraitement par ultrasons a été utilisé pour augmenter la sélectivité de la barytine en augmentant le taux de flottation de barytine et de diminuer la sélectivité de la fluorite en diminuant son taux de flottation, les propriétés d'adsorption et la topographie de surface ont également été étudiées (Slaczke.1987).

Pradip et Rai 2003, lors d'un essai de flottation de bastnaésites de calcite et de Barytine, il a été observé que les collecteurs d'hydroxamate avaient une sélectivité plus élevée que l'acide gras conventionnel (oléate). Il a également été observé que la bastnaésite a réagi plus fortement à la flottation de l'hydroxamate par rapport à la barytine et à la calcite. Adsorption à l'équilibre la densité de l'hydroxamate a été mesurée à la bastnaésite, la barytine et les surfaces de calcite, rapportées par Zhang et al 2013 en tant que fonction de la concentration d'équilibre de l'hydroxamate. Une bonne sélectivité a été obtenue en combinant le dodécyl-sulfate de sodium et lignine sulfonate de sodium dans un minerai de calcite-barytine (Sadowski, 1992).

La Barytine de Kremikovtzi (Bulgarie) avec la composition chimique suivante : 12.5% Fe, 30.4 % BaSO₄ , 2.5% Mn, 1.21% Pb, 9.6% SiO₂ et 15.9% CaO, a été enrichie par des essais de flottation dans les conditions suivantes : particules obtenues après le broyage (65-75)% sont de dimension inférieure à 0.074mm, la teneur en solide dans le produit qui alimente la flottation

principale est de 34%, la température de la pulpe 26-30°C, Ph (8 à 9). Les dosages des réactifs de flottation sont comme suit : Le collecteur (OMC199) et Aération avec un rapport de 2:1 et un taux de concentration de l'ordre de 400 à 450 g / t. Les points de chargement sont ; le broyage, la flottation principale, dans le premier et le deuxième stade de flottation de contrôle et dans le premier stade de flottation relaveuse s'il est nécessaire. Les moussants (Oreprep F501 :(10 à 15) g/t) sont chargés dans la flottation principale et s'il est nécessaire dans la flottation de contrôle. La consommation des réactifs dans toutes les opérations est de l'ordre de (4 à 4.5) g/t, le tableau suivant présente une comparaison entre la composition du concentré obtenu et celle du produit exigé par l'industrie chimique (Hadjiev.A et al 2000).

Tableau II.5 La composition du concentré barytique obtenu lors de la flottation du minerai brut de Kremikovtzi (Bulgarie) (Hadjiev A. et al 2000).

Le composant	Les teneurs en %	
	Obtenues	Exigés
BaSO₄	97.08	> 95.00
SiO₂	0.44	< 2.50
Fe₂O₃	0.60	< 0.15
CaO	0.05	...
MnO	0.90	...
Pb	0.07	...
CaF₂	...	< 1.00

Udenko.A et al 2011, utilisent l'acide palmatique comme un collecteur pendant la flottation de la Barytine de la région d'AZARA (NIGERIA) afin de réduire le cout d'utilisation des réactifs chimiques et de l'acide oléique, la composition chimique du minerai barytique d'AZARA est: [75.40% BaSO₄, 7.98% SiO₂, 6.48% Fe₂O₃, 1.39% SrO, 1.10% TiO₂, 0.20% MgO, 0.14% CaO, 0.09% CuO, 0.08% ZrO₂, 0.07% SO₄, 0.05% Na₂O et 0.05% Ga₂O₃]. La teneur en BaSO₄ est amélioré par la flottation jusqu'à l'ordre de 91.9%.

La flottation du Plomb et de la Barytine des stériles de la mine de Ichemoul (W. BATNA. ALGERIE) a été étudiée relativement aux différents types de réactifs à des dosages par Larachi.N et al. 2019. Pendant la flottation du Plomb, la récupération moyenne obtenue est de 70% de Sulfure de Plomb et 40% de concentré d'oxyde de plomb obtenu par sulfuration du réactif. La désulfuration des stériles miniers réussi en présence d'une combinaison de xanthate et d'Aero 407. Quant à la Barytine, une récupération moyenne de 50% et des concentrés allant de (80 à 90)% en BaSO₄ de Barytine ont été atteinte.

Selon Ibisi.M.I. 1991, un concentré de Barytine (96.8% en $BaSO_4$) est obtenu suite à plusieurs stades de flottation et qui sont : une flottation principale, une flottation de contrôle et quatre flottations releveuses plus le procédé de séparation magnétique du minerai brut provenant de Nigeria ($BaSO_4$: 89.3%, $SrSO_4$: 1.8%, CaF_2 : 0.25%, SiO_2 : 5.0%, Al_2O_3 :0.2%, Fe_2O_3 :3.1%, $CaCO_3$: 0.30%, $MgCO_3$: 0.007%, PbO : 0.0015%). Les conditions de flottation sont les suivants : grosseur du minerai à flotter : - 200 μm , ph : 10.8, NaOH comme régulateur du milieu, Na-Cetylsulfate comme un collecteur, sulfate de sodium comme un déprimant et le moussant est un hexamétophosphate de sodium.

L'enrichissement de Barytine du gisement de Mangampet (Inde) par flottation a été étudié en utilisant des collecteurs cationiques et anioniques. Le minerai brut contenant 80% de barytine avec SiO_2 et $CaCO_3$ comme principaux minéraux de gangue. Le matériau a été broyé à une taille inférieure à 45 microns (80%) pour libérer la Barytine des autres minéraux de gangue. Des amines grasses telles que l'Armoflote 17 et le Liquide B50 ont été essayées comme collecteurs cationiques pour faire flotter les minéraux de gangue (flottation inverse) tandis que l'acide oléique (collecteurs anioniques) était utilisé pour la flottation directe de la barytine. Un concentré de Barytine avec 96% en $BaSO_4$ et moins de 1% en SiO_2 été obtenu par flottation inverse en utilisant des collecteurs cationiques. Tandis qu'un concentré de Barytine avec 95% en $BaSO_4$ et moins de 2.5% en SiO_2 été obtenue par flottation directe avec l'usage de l'acide oléique (Bhaskar Raju.G et al 2004).

II.6 La séparation magnétique

II.6.1 La définition et le principe

La séparation magnétique est un procédé technique utilisant la force engendrée par un système magnétique pour séparer des particules présentant des propriétés magnétiques différentes (Gérard G.1991).

Les matériaux possèdent une différence des propriétés magnétiques ce qui facilite leur séparation. La figure (a) présente quand des boules en acier et en céramique traversent un aimant permanent, on remarque que les boules d'acier sont attirées par l'aimant. La figure (b) montre que lorsqu'un aimant placé à proximité des particules de fer et boules en céramique ; la plupart des boules de fer sont attirés, tandis que la plupart des boules en céramique ne seront pas attirées. Les boules qui ne sont pas attirées tomberont en raison de la gravité. Si la force magnétique agissante sur une particule est plus forte que la force gravitationnelle, la particule va se déplacer vers l'aimant. La plupart des techniques de séparation magnétique des minéraux sont humide ou à sec, donc les forces d'entraînement dans un fluide et la tension inter faciale de surface sont

également des forces concurrentes. Seulement si la force magnétique agissant sur une particule est plus forte que la somme de toutes les forces concurrentes, la particule va déplacer vers l'aimant (Xiong.D et al 2015).

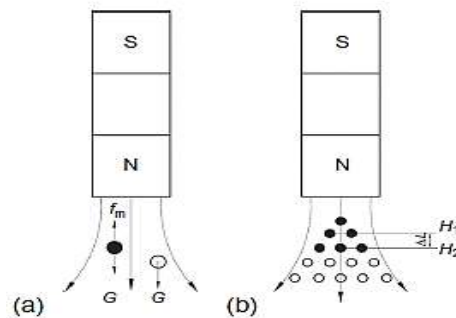


Figure II.11 La séparation magnétique entre billes de fer et de céramique. ● : boule de fer, ○ : boule en céramique, S : pôle sud de l'aimant, N : pôle nord de l'aimant, f_m : force magnétique, G : force de gravité, H : l'intensité du champ magnétique (Xiong.D et al 2015).

II.6.2 Travaux antérieurs sur la séparation magnétique de la Barytine

Parsonage 1988 a publié une revue littérature sur les techniques d'amélioration des propriétés magnétiques des minéraux avant la séparation magnétique. Leur étude a conclu que les facteurs affectant la sélectivité du processus magnétique varient de celles des autres techniques de séparation des minéraux. Pendant un essai de séparation magnétique, il a été noté que pour un minerai de calcite/barytine, la barytine a une récupération magnétique de 8,6%, alors qu'il avait une récupération des particules non magnétique de 91,4% à une dimension de (-150 +75 microns), en utilisant de l'oléate de Na, Na_2SO_4 , $\text{pH}=9$ et NaClO_4 (Parsonage 1988)

L'utilisation de la séparation magnétique pour séparer certains minéraux a été impossible en raison de leurs propriétés non magnétiques, par exemple la calcite et la barytine. Shaikh et al 1994 ont mentionné qu'un nouveau concept avait été développé qui convertit les matériaux non magnétiques en matériaux magnétiques par l'utilisation d'un surfactant magnétique tel que le manganèse stéarate et oléate de manganèse C'était à noter à partir de leur expérience qu'une augmentation de la concentration de stéarate de manganèse et d'oléate de manganèse augmentait les propriétés magnétiques de la calcite et de la barytine permettant de récupérer la calcite et la barytine par séparation magnétique (Shaikh et al 1994).

Ozbas et Hicyilmaz, 1994 ont signalé une concentration de Barytine et fluorite du gisement d'Eskisehir-Beylikahir en utilisant concentration gravimétrique, flottation et séparation magnétique à haute intensité. Jakabsky et al. (2010) ont utilisé la séparation magnétique pour le concentré de sidérite pour obtenir un produit magnétique, suivi par flottation d'un produit non

magnétique pour obtenir un concentré (Barytine) et résidus (quartz). (95-100)% de Barytine, sidérite, le quartz et les ardoises qui ont été révélés par analyse microscopique ont été libérés à une granulométrie de 0,5 mm. Une récupération de BaSO₄ a été rapportée à 8,68%, 91,32%, 82,34% et 17,66% pour les produits magnétique, non magnétique, le concentré et les résidus respectivement (Jakabsky et al 2010).

Grigorova et al 2014, ont rapporté le minerai issu du gisement de Kremikovtzi comme un minerai complexe, contenant du fer comme minéral utile et de la barytine, le plomb et le manganèse comme minéraux de gangue. Les résultats de la caractérisation indiquent que la barytine pourrait être récupérée des résidus en utilisant la flottation avant la séparation magnétique (Grigorova et al 2014).

Vedat DENIZ et Taki GULER. 2018, un travail a été mené pour étudier l'applicabilité de séparation magnétique à haut gradient (HGMS) et méthodes de blanchiment sur le taux de rejet des impuretés colorantes du minerai de barytine. Des travaux expérimentaux ont été menés sur un concentré d'usine de transformation. Les processus de séparation magnétique par voie humide et sèche ont échoué dans le rejet des impuretés colorantes. Par conséquent, un nettoyage supplémentaire de la barytine a été appliqué sur le produit HGMS humide par lixiviation à l'acide minéral (H₂SO₄, HCl). Les acides ont considérablement amélioré la qualité de la barytine. Cependant, la qualité du produit blanchi ne répondait pas aux spécifications par lixiviation à l'acide sulfurique. D'un autre côté, la barytine vendable pourrait être obtenue par blanchiment au HCl à 15% de concentration de HCl pendant 15 minutes. Les tests de bénéfice ont indiqué que l'indice de brillance de la barytine pouvait être augmenté de 68,05% à 90,12% par HGMS humide suivi d'un blanchiment au HCL.

II.7 La séparation électrostatique

II.7.1 La définition et le principe

La séparation électrique est basée sur le fait que les minéraux et les matériaux peuvent être chargés différemment et, par conséquent, séparés lorsqu'un champ électrique externe est appliqué. Cette méthode utilise les différences inhérentes de la charge de friction, la conductivité électrique et les propriétés diélectriques entre les composants des substances. La force électrostatique est proportionnelle à la charge de la surface des particules et l'intensité du champ électrique, les particules fines et légères peuvent être grandement influencées par la force électrostatique. Par conséquent, une séparation efficace des particules peut être obtenue

(Manouchehri.H.R et al 2000). Il existe deux types de séparateurs électrostatiques: les séparateurs électrostatiques et les séparateurs électrodynamiques (Gosselin.A, 1999).

II.7.2 Travaux antérieurs sur la séparation électrostatique de la Barytine

Bittner et al.2014a ont mentionné que l'utilisation la séparation électrostatique pour la séparation des minéraux conducteurs des minéraux non conducteurs. ST Equipment and Technology, LLC (STET) ont été utilisé pour séparer vitreux aluminosilicates/carbone, calcite/quartz, talc/magnésite et barytine/quartz. Les auteurs ont également signalé que l'utilisation de la séparation turbo-électrostatiques est plus rentable que la flottation conventionnelle pour la séparation baryte/quartz (Bitter et al 2014b).

La séparation électrostatique a été utilisée pour la séparation de barytine et sphalérite à partir de l'eau ordinaire (Conover et Morris 1912). Les auteurs ont signalé l'utilisation des séparateurs à bande pour la séparation des matériaux très fins (<1 µm) à moyennement grossiers (300 µm) avec des débits très élevés. Les minéraux Barytines-Silicates et Fluorite-Barytine-Calcite ont été séparés en utilisant cette méthode considérée comme respectueuse de l'environnement et ne nécessite que peu ou pas de prétraitements (Bittner et al 2014b).

La séparation électrostatique, utilisant une polarité positive a été utilisée pour séparer la barytine du quartz. Un concentré de 84,1% en BaSO₄ a été atteint; dans une autre étude, la fluorite était concentrée, les deux minéraux agissent comme des non-conducteurs. Le tri électronique du minerai a été utilisé sur le minerai de barytine de Yarrow en Ontario (Wyman 1970).

II.8 Le futur de l'enrichissement de la Barytine

Les biomasses ont été utilisées comme des agents de flottation de la Célestine et des minéraux associés, de la Calcite, de la Barytine et du Quartz. La Calcite et la Barytine ont été déprimées en utilisant 10 mg/l des biomasses tandis qu'environ 20% de la Célestine ont été flottés sélectivement. (50 à 75) mg/l des biomasses ont déprimé tous les minéraux associés. Les macromolécules biomasses ont la capacité d'hydrate en solution aqueuse et à être plus sélectivement adsorbé sur les minéraux de la gangue qui les rendent dépresseurs potentiels dans la flottation du minerai non sulfuré (Somasundaran.P et al, F.O.Kolawole et al 2019).

Aujourd'hui, les scientifiques ont été en mesure de fournir les différents mécanismes impliqués dans la biolixiviation, mais il y a toujours des facettes à comprendre vraiment et, plus important encore, sur la façon dont la recherche à l'échelle du laboratoire peut être transformée

en opération à grande échelle en intensifiant la recherche et en optimisant l'aspect technique de la recherche (Gahan. C.S et al 2012, Kolawole.F.O et al 2019). Les futures technologies d'enrichissement de la barytine prennent en considération l'économie, l'environnement et la durabilité, des méthodes telles que la biolixiviation, l'utilisation de la biomasse et la bio-valorisation (micro-organismes)(Kolawole.F.O et al 2019).

II.9 Conclusion

En règle générale, après l'extraction du minerai, une préparation mécanique (concassage et broyage) est nécessaire pour sa réduction granulométrique jusqu'à atteindre la maille de libération. Cette opération est suivie par criblage destiné à obtenir des granulométries nécessaires aux procédés de traitement.

Le choix des méthodes de traitement du minerai dépend de plusieurs facteurs tels que : le type du minerai, sa composition chimique, minéralogique, sa finesse...etc. Les méthodes les plus utilisées sont la séparation gravimétrique (milieu dense, spirales, table à secousses...etc.), la séparation magnétique, la flottation, la séparation électrostatique, le traitement chimique et la bio-minéralisation. Les méthodes les plus couramment utilisées pour l'enrichissement de la Barytine sont la séparation gravimétrique (jiggage) et la flottation.

Les grandes laveries du monde traitent le minerai de Barytine par la méthode de la flottation, qui donne un produit très riche avec peu de perte. Les différents types de réactifs utilisés ainsi que leurs consommations dépendent de la nature du minerai. Le degré de libération des composants utiles pour la fiabilité de la flottation (degré de libération des minéraux ou broyage) sont des éléments indispensables pour le procédé de la flottation.

Plusieurs milliers de produits chimiques ont été soit testés ou suggérés comme réactifs de flottation. De nos jours, il y a seulement quelques centaines de ces réactifs qui sont largement utilisés dans la flottation. De nombreux travaux de recherche ont été consacrés à l'utilisation de divers réactifs en flottation de la Barytine de différents types de minerais de gangues. Raisonnablement, de bons résultats avec l'acide oléique ont été obtenus sur les minerais contenant de la silice sous forme de minéraux de gangue. On peut déprimer cette dernière par les silicates de sodium (Na_2SiO_3) en utilisant l'huile de pin comme un moussant dans un milieu de Ph basique (11 à 11.5).

Parfois, une seule méthode n'est pas suffisante pour obtenir un concentré de haute qualité à cause de la diversification de la composition du minerai, il est donc nécessaire de mettre en œuvre un traitement combiné de deux ou plusieurs procédés d'enrichissement.

Chapitre III

La Barytine de Ain Mimoun

Wilaya de Khenchela

III.1 Préambule

L'Algérie est un pays riche en diverses substances utiles dont la majorité n'est pas encore mise en valeur. Le sous-sol algérien contient des ressources minérales et des substances utiles telles que le fer, le plomb, le zinc, le cuivre, les phosphates et la barytine qui fait l'objet de notre étude.

Situés dans la région de Ain Mimoun à KHENCHELA, le gisement de la Barytine est un complexe filonien de type hydrothermal, il est situé au flanc nord de l'anticlinal de Khenchela de direction Nord-Est Sud-Ouest, à environ 25 km au sud-ouest de la ville de Khenchela. Il a été découvert en 1968 lors d'une exploration systématique de la région. Durant la période 1972-2005, l'exploration et l'extraction dans la région ont permis la découverte de nouvelles réserves estimées à 5,577 millions de tonnes de minerai de barytine (Abdellaoui.K et al 2019).

Cependant, la région d'étude est limitée au Nord par les plaines de Rmila, et de Garaet Et Tarf – prolongement vers l'Est du bassin de Timgad – et à l'Est par la ville de Khenchela et les Djebels Chettaia (1455m), Knif (1224m) et El Krouma (1171m). Au Sud de cette région se trouve la dépression d'Es Sbikha, la plaine de Fid En Nedjil et le Djebel Djahfa (1711m). De l'Ouest, vers le Sud-Ouest, l'anticlinal est limité successivement par les Djebels Chélia (2328m), Feraoun (2099m), et Chentgouma (2113m) (Figure III.2). Le massif de Khenchela offre une forte orographie représentée par plusieurs chaînons tels que Djebel Aidel (2173m), Ras Kodalène (1945m), Kef Tifekressa (1817m), Ras Serdoun (1700m) (Ballais J.L 1981, Zedam.R 1998, Zedam.R et al 2007, Zedam.R 2012).

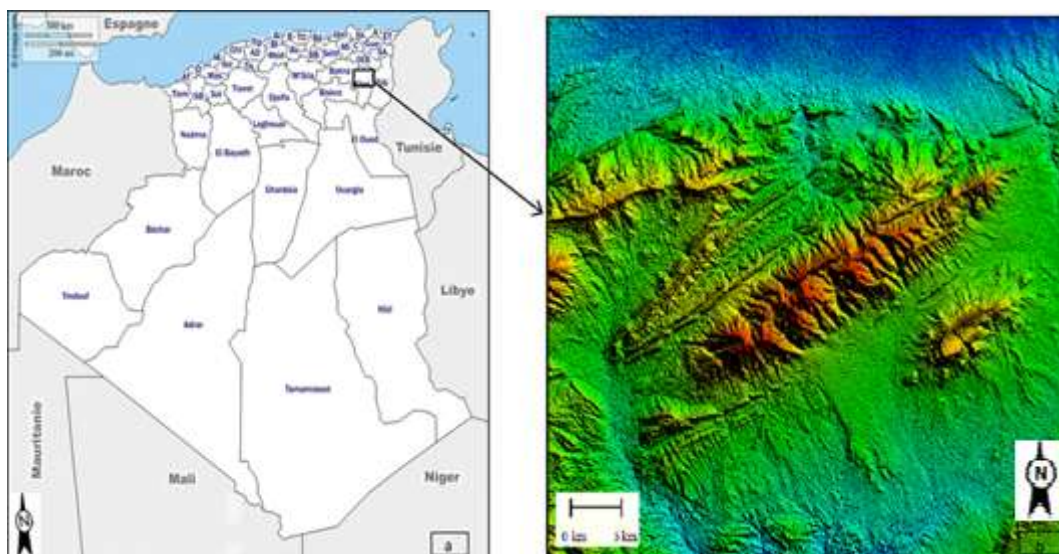


Figure III.1 a) La situation Géographique map ALGERIE, b) MNT Modèle numérique de terrain Ain Mimoun.



Figure III.2 Une vue satellitaire montrant la position du massif de Khenchela (Zedam.R 2012)

III.2 Historique

- Les toutes premières explorations dans les monts Aurésiens datent de 1840, où Bablaye (officier de l'état-major français) signala l'existence de calcaires à nummulites.
- En 1859 furent découverts les premiers indices de blende, galène cinabre à Taghit par Bacrie.
- En 1860 Coquand parcourut le Sud de la province constantinoise et le massif de l'Aurès. Tissot en tant qu'ingénieur des mines établit les levés géologiques au 1/800.000^e.
- En 1939, R.Laffite publia sa thèse sur le massif de l'Aurès.
- Les travaux spéciaux de recherche suivant les filons barytines avec évaluation des réserves ont été réalisés de 1968 à 1970 (ENOF 2018).
- La prospection des filons de barytes par la catégorie C-1 a été effectuée par tranchées en surface et par sondage carotté en profondeur. Pour la catégorie B, la prospection en surface et par sondage carotté en profondeur. Les réserves dans la catégorie C2 sont évaluées par extrapolation de 20 à 30 m (Baladha.F 2012).
- Avant le début de l'exploitation, les réserves étaient de l'ordre (Baladha.F 2012) :
 - Total : 2147500 tonnes avec 86% en BaSO₄.
 - Cat. B : 276500 tonnes avec 90% en BaSO₄.
 - Cat. C1 : 1372600 tonnes avec 85.9% en BaSO₄.
 - Cat. C2 : 499400 tonnes avec 84.0% en BaSO₄.

- En 1972, commença les premiers travaux d'exploitation de barytine à ciel ouvert avec une production en tout venant de 35 356 tonnes à partir du filon n°3 qui offrait des conditions favorables à ce type d'exploitation (pendage moyen de 30°).
- En 1974 commencèrent les premiers travaux d'exploitation souterraine au niveau du filon n°1 (5 023 tonnes) accompagnés toujours d'une exploitation à ciel ouvert au niveau des filons : 3, 4 et 9 (28 686 tonnes) (ENOF 2018).

III.3 Le cadre géologique local

La masse sédimentaire de l'anticlinal de Khenchela est caractérisée par une série plus ou moins concordante du Barrémien au Cénomaniens et des alternances de roches cohérentes : grès du Barrémien, Dolomites et Calcaires Dolomitiques de l'Aptien, grès et argilites de l'Albien, marnes et marno – calcaires du Cénomaniens. Ces alternances favorisent le développement d'un relief structural par érosion différentielle.

Les formations géologiques de la localité d'Ain Mimoun ayant un âge Crétacé sont représentées par le (Barrémien, Aptien, Albien, Cénomaniens), elles sont coiffées par un Miocène (Zedam.R et al 2007).

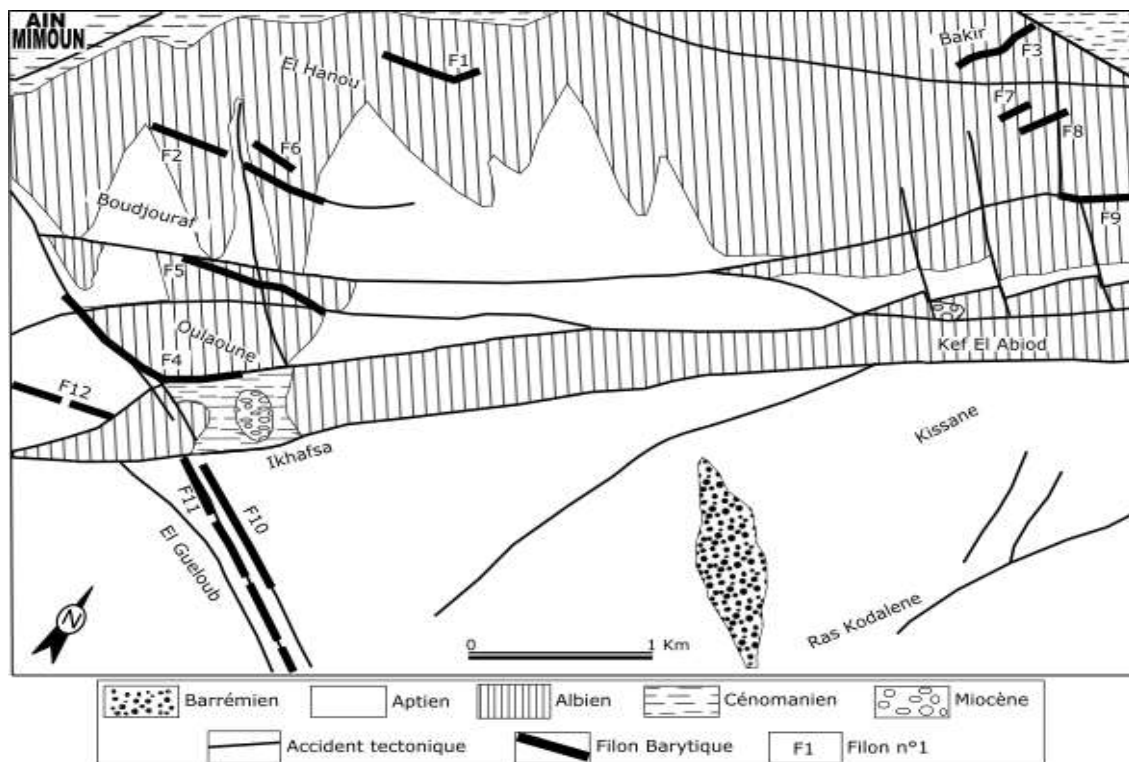


Figure III.3 La carte géologique d'Ain Mimoun (Zedam.R 1998).

III.3.1 Le Barrémien

Il s'agit de la plus ancienne formation observée dans la zone d'étude, elle n'affleure que sur le flanc sud de l'anticlinal (Djebels Aidel – Faraoun). Le Barrémien se traduit par des grès non fossilifères à grains grossiers caractérisés par une structure massive à pores fins et composés de grains en fragments de quartz dont la taille est de l'ordre de 0.1mm (Laffitte.R 1939, Guiraud.R 1990, Zedam.R 1998, Zedam.R et al 2007).

Ce faciès ne semble pas monter dans l'Aptien puisqu'il est recouvert par les marnes grises à intercalations de biomicrites de l'Aptien basal. Il diminue d'épaisseur en allant du sud vers le nord de l'anticlinal et exprime une régression par rapport à l'Hauterivien qui accentue la tendance à la diminution de la profondeur de la mer (Vila.J.M 1977).

III.3.2 L'Aptien

Il débute par des marnes grises plus ou moins sableuses à intercalations décimétriques de bio micrites ; ce qui lui donne une limite nette par rapport aux grès barrémiens. Ces marnes sont à ostracées, brachiopodes et céphalopodes dont *Ostrea latissima* D'ORB. , *Nennea* sp., *Epiaster* cf. *restrictus* GAUTHIER, *Rhynchonella parvirostris* SOW., *Terebratula moutoniana* D'ORB., *Tamarindus* D'ORB., et *Parahoplites Consobrinus* D'ORB.

Toutes ces espèces indiquent en effet l'Aptien inférieur, (Laffitte.R 1939, Vila.J.M 1977, Abed.S 1986, Ghennai.D et Elaich.N 1993). Le faciès devient ensuite sub-récifal formé de calcaires à orbitolines et de dolomies massives à petits lits de calcaires et de marnes.

Dans ces calcaires à orbitolines, de couleur grise – bleutée, s'observent parfois quelques rares rudistes autour desquels se trouvent des accumulations de calcaires oolithiques (Zedam.R 1998, Zedam.R et al 2007, Zedam.R et al 2007). Ces derniers indiquent un milieu peu profond et plus ou moins énergétique. Au sommet se développent des bancs massifs de dolomies à intercalations décimétriques de calcaires et de marno-calcaires (Laffitte.R 1939, Lessard.L 1955).

La limite supérieure de l'Aptien est marquée par un niveau marneux d'une épaisseur de 20 m à intercalations de marno – calcaires à *Heteraster tissoti* COQ., et une microfaune de *Ticinella roberti* et *Ticinella* sp., correspondant à la base du Clansayésien (Laffitte.R 1939, Guiraud.R 1990, Ghennai.D et Elaich.N 1993).

III.3.3 L'Albien

Les formations albiennes peuvent être décrites de bas en haut comme suit (Vila.J.M 1977):

- Alternance de grès blancs fins à ciment carbonaté et de biointramicrites à toit noduleux.
- Alternance de marnes grises – beige à biomicrites lumachelliques, de grès blancs fins ferrugineux et azoïques en bancs décimétriques et de biointramicrites gréseuses.
- Argiles grises – verdâtre silteuses et grès fins à ciment argilo – carbonaté en bancs décimétriques.

Les calcaires massifs surmontant les marnes sombres et les grès azoïques ont fourni *Knemiceras* sp. Caractérisant le sommet de l'Albien moyen ou la base de l'Albien supérieur (Laffitte.R 1939, Guiraud.R 1990). Les niveaux argileux renferment des figures de sédimentation : Ripple-marks, Flute – casts et Lingoides.

Les pistes de vers lithophages sont abondantes ; témoignant de lacunes dans la sédimentation qui a subi de profonds changements durant le Vraconien où elle devient beaucoup plus carbonatée annonçant ainsi les conditions qui domineront au Crétacé supérieur (Laffitte.R 1939, Bureau.D 1986, Zedam.R 1998 , Zedam.R et al 2007, Zedam.R 2012).

III.3.4 Le Cénomaniien

Il débute par des marnes gris – bleuté à Rotalipores dans lesquelles alternent quelques bancs isolés de biomicrites argileuses à niveaux glauconieux et à empreintes d'ammonites mal conservées surtout de l'espèce caractéristique *Acanthoceras* et d'échinodermes, en particulier les *Hemiasters* (Laffitte.R 1939).

Ces marnes grises sont surmontées par une autre série de marnes noires accompagnées sporadiquement de micrites gris – blanchâtre à rares tests de lamellibranches et de gastéropodes. La microfaune recèle *Thalmaninella brotzeni* SIGAL et *Anomalina aumalensis* SIGAL (Ghennai.D et Elaich.N 1993). La raréfaction des fossiles observée dans le Cénomaniien est due probablement à l'augmentation de la tranche d'eau ; une transgression a dû s'effectuer d'une manière progressive (Yahiaoui.A 1990).

Cette sédimentation ne contient pas le moindre niveau gréseux, chose qui traduit un changement radical dans sa nature lithologique et marque le Cénomaniien comme un niveau repère opposant le Crétacé inférieur au Sénonien.

III.3.5 Le Miocène

Il est représenté par les formations rouges Aquitano–burdigaliennes d'origine continentale, discordantes sur le Crétacé et dont l'épaisseur peut atteindre 80 m. Ce sont des argiles silteuses rouges, des poudingues à gros éléments arrondis de calcaires et des grès quartzeux à ciment ferrugineux.

Au microscope ces calcaires sont à éléments micritiques anguleux à subanguleux, ce qui traduit la proximité de leur provenance (Zedam.R 1998, Zedam.R 2012). Dans l'anticlinal de Khenchela, le Miocène marin ne représente pas un cycle sédimentaire largement développé, mais simplement des dépôts côtiers formés durant l'avancée extrême de la mer au Burdigalien (Camoin.G et al 1990)

III.4 Le cadre tectonique locale

L'anticlinal de Khenchela est un pli coffré limitant la chaîne des Aurès vers l'est. Il s'agit d'une structure atlasique de direction Nord-Est Sud-Ouest qui s'étend sur une superficie de 250 Km². Dans les grès barrémiens du Djebel Aidel (flanc sud), s'observe un repli synclinal contrastant avec l'allure de l'ensemble de l'anticlinal. Vers le Nord-Est l'effondrement de la voûte de l'anticlinal par des failles directionnelles précipite la disparition des formations du Crétacé inférieur sur son flanc nord (Vila. J.M 1977, Camoin.G et al 1990)

L'anticlinal de Khenchela présente un style tectonique "Auresien", la présence d'un réseau dense et désorganisé de fractures traduit l'existence d'indices d'un couloir de décrochement (Guiraud.R 1990, Bureau.D 1986).

Plusieurs structures disjonctives de différentes orientations se sont développées en les systèmes d'accidents suivants :

- Les failles Nord Est – Sud Ouest : Elles jalonnent la voûte de l'anticlinal et délimitent des blocs d'effondrement, elles sont vraisemblablement liées à la phase de plissement majeur de la fin de l'Eocène moyen (Lutétien supérieur) (Herkat.M, 1992). Elles ont joué en décrochements dextres (Herkat.M 1992, Herkat.M 2005).
- Les accidents Est – Ouest : Ce sont de profondes failles qui traduisent probablement l'influence des accidents de socle sur Figure-1 la couverture jouant en décrochements senestres. Elles ne peuvent affecter une couverture épaisse de 4100 m sans l'influence du socle (Guiraud.R, 1990). La conséquence de la déformation du socle résiderait dans la

déformation de la couverture en blocs basculés et coins sédimentaires prismatiques associés quand l'ensemble est soumis à une compression tectonique ultérieure (Bureau.D 1986).

- Les accidents Nord Ouest – Sud Est : Ce sont des accidents orthogonaux à l'axe du pli le coupant en blocs transversaux; il s'agit d'une famille de cassures plus tardives qui recouper les autres structures indifféremment. A grande échelle ils sont à relier avec les coulissages postérieurs à la phase principale de plissement atlasique (Khomsis.S et al 2006, Yelles-Chaouche.A et al 2006).

III.5 La minéralisation

La minéralisation filonienne du gisement "Mizab" est liée à un environnement sédimentaire carbonaté d'âge Albo – aptien, favorable au développement d'un phénomène de dolomitisation de type régional. Elle est encaissée dans les formations de l'Aptien moyen à l'Albien supérieur représentées par une série d'alternance monotone de calcaires, calcaires dolomitiques, dolomies, grès et argilites (Zedam et al., 2007).

Tous les corps minéralisés sont abrités dans des accidents tectoniques de différentes directions : NordEst–Sud-Ouest, Nord-Ouest–Sud-Est, Nord–Sud, Nord-Ouest–Sud-Est et Est–Ouest. Par conséquent la minéralisation est post-fracturation, elle est sécante par rapport aux structures plissées de la phase atlasique (fini-lutétienne à bartonienne), donc elle est plus jeune que cette phase. L'âge de cette minéralisation peut être considéré comme étant post-éocène, probablement Mio-pliocène (Zedam, 1998).

La Barytine d'Ain Mimoun est liée à un cortège minéralogique épigénétique de type hydrothermal. D'après les données citées précédemment, les Sulfates de Baryum peuvent se déposer dans un environnement sédimentaire sous l'effet des solutions hydrothermales et de plusieurs mécanismes tels les processus diagénétiques. La Barytine peut être formée sous l'effet d'une précipitation directe quand un fluide hydrothermal riche en Baryum réagit avec des solutions minéralisatrices astreintes à un environnement de masses diapiriques ; comme celui de la région de Khenchela. L'origine de ces solutions minéralisatrices n'est probablement que les saumures issues des bassins sédimentaires subsidents, lors d'une phase tectonique compressive, où les fluides chauds et salés sont expulsés puis dilués par d'autres moins chauds et moins salés (eaux de surface) (Zedam, 2012).

III.6 La minéralogie et la pétrographie

Le gisement de la Barytine d'Ain Mimoun est abrité dans des accidents tectoniques de multiples directions, représenté par un champ filonien et exploité soit à ciel ouvert, soit en système de galeries souterraines. Les filons sont sécants par rapport aux roches encaissantes exclusivement d'âge Apto – Albien, elles sont variées du point de vue pétrographique.

Le cortège minéralogique est riche et diversifié, il inclut deux catégories de minéraux : les minéraux de gangue et les minéraux polymétalliques. Dans cette ébauche, nous passons en revue les minéraux de gangue représentés par quatre phases principales : la barytine, la calcite, la silice et la dolomite (Zedam.R 2012, Batouche.T et al 2019a)

III.6.1. La Barytine

Selon l'ordre de prépondérance, la barytine se présente sous trois aspects (Zedam.R 2012) :

a. La Barytine Lamellaire en lattes multidimensionnelles (2 à 8 cm de longueur et 1 à 6 mm d'épaisseur), généralement transparente à translucide, elle s'effrite facilement suivant les plans de clivage. Cette barytine est concentrée beaucoup plus au milieu des filons et renferme trois types de faciès : lamellaire, lamellaire allongé et aciculaire.

b. La Barytine Fibro - radiée ou en "plumes de coq" plus dure que le premier type, parfois en fines plaquettes entrecoupées, de teint blanc laiteux, plus abondante surtout sur les épontes des filons. Ce type de barytine est associé aux brèches hydrauliques et quelques rares brèches de friction sur les veines les plus verticalisées.

c. La Barytine Massive Grenue plus ou moins chaotique dans laquelle se trouvent parsemés de nombreux grains de quartz millimétriques témoignant d'une intense phase de silicification. Il s'agit d'un faciès de remobilisation assiégé dans les microfractures et les poches sécantes sur les filons principaux. C'est une barytine de couleur beigeâtre à blanc opaque.

L'observation microscopique a montré que la barytine s'individualise en deux catégories :

- **La Barytine Prismatique** exprimée sous forme de gros cristaux en prismes allongés de dimensions variables (0,2 x 2 mm à 7 x 20 mm). Cette barytine à extinction "Onduleuse" est marquée par la présence de craquelures investies le plus souvent partiellement ou totalement par des grains de quartz ou de calcite

• **La Barytine Granulaire Xénomorphe** en grains plus menus, de taille variable (0,03 à 0,2) mm. Parfois, elle se trouve parsemée dans la barytine prismatique, avec laquelle elle diffère par son extinction "non onduleuse". Il faut bien noter le développement d'agrégats de grains de quartz bipyramidés microscopiques dans l'environnement de cette barytine (Zedam.R 2012).



Photo III.1 La Barytine lamellaire (Zedam.R, 2012)

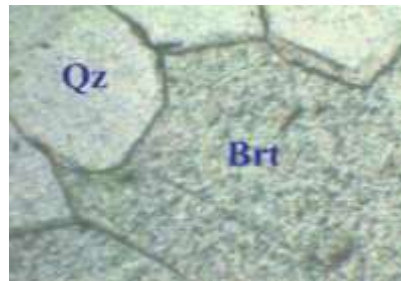


Photo III.2 La Barytine Prismatique (Ba) corrodée par la Silice palissadique (Zedam.R, 2012)

III.6.2 LA SILICE

Elle peut être authigène ou néoformée et se présente en deux aspects

- **La Silice en grains fins xénomorphes** de dimensions variables (0,1 à 0,5) mm. Elle se développe surtout dans les zones de contact des filons.
- **La Silice en cristaux automorphes prismatiques** de (0,2 à 1,2) mm de taille. Elle est palissadique, associée à la barytine, aux carbonates de fer, aux oxydes de fer et rarement à la calcite (Zedam.R, 2012).



Photo III.3 Des grains de Quartz Automorphes en remplissage d'une cavité de dissolution (Zedam.R, 2012)

III.6.3 La Dolomite

Macroscopiquement, deux formes de dolomites sont mises en évidence :

- La Dolomite grisâtre à grains fins, de taille millimétrique.
- La Dolomite fortement grenue de couleur plus ou moins brunâtre.

Au microscope, deux types de dolomite sont identifiés :

- **La Dolomite finement à moyennement grenue** : Cristaux brunâtres de taille variable (80μ à 240μ), à contours planaires et à jonctions intercrystallines recoupées par des stylolithes passant à de vagues linéaments irréguliers marqués par la présence d'oxydes de fer.
- **La Dolomite liée aux ports et aux fractures** : Cristaux de taille variable (250μ à 600μ), se développant dans les vides de pores et de fractures, à contours courbés et à extinction ondulante. Les pores millimétriques à centimétriques remplis de cristaux de dolomite Baroque (saddle dolomite) et localisés à proximités des stylolithes ont des extrémités marquées surtout par la présence des carbonates de fer (ankérite + sidérite) et oxydes de fer (Zedam.R 2012).



Photo III.4 La Dolomite grisâtre de l'Aptien moyen (Zedam.R 2012)

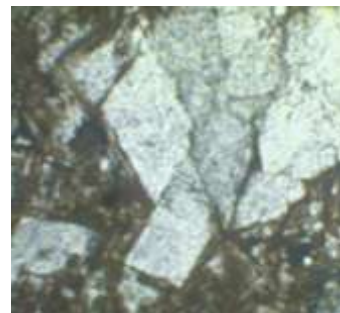


Photo III.5 Saddle Dolomite occupant les bords de cavités de dissolution (Zedam.R 2012)

III.6.4 La Calcite

Deux générations de calcite peuvent être distinguées :

- **Une calcite Diagénétique formant la matrice**, en grains à contours réguliers dont la taille varie entre 0,02 mm et 0,3 mm créant des veinules occupées par des grains de quartz authigènes en association aux oxydes de fer ; tous deux interstitiels et postérieurs à ce type de calcite.
- **Une calcite Tardive de type hydrothermal** en remplissage dans les fractures, associée à la barytine, au quartz, aux oxydes de fer et aux carbonates de fer. C'est une calcite à extinction roulante, caractérisée par la présence de liserés fins multicolores. Elle est issue de la phase calcitique post-minéralisation (Zedam.R 2012).

III.7 Les réserves de la Barytine

Le gisement de Ain Mimoun, avec des réserves importantes ; Durant la période 1972-2005, l'exploration et l'extraction dans la région ont permis la découverte de nouvelles réserves estimées à 5,577 millions de tonnes de minerai de barytine (Abdellaoui.K et al 2019). C'est pour cela que ce gisement se classe parmi les plus grands gisements dans notre pays. Sa localisation dans la région de Khenchela a contribué au développement économique et social de la ville, de plus une partie considérable de la population constitue la main d'œuvre du complexe (ENOF 2018).

D'après Chibka.N ; on classe les réserves suivant le degré de leur utilisation dans l'industrie, le degré de prospection et l'étude de gisement.

- Les réserves géologiques sont toutes les réserves des minéraux utiles d'un gisement.
- Les réserves exploitables sont celles qui satisfont des conditions industrielles et peuvent être exploitées avec profit
- Catégorie A, les réserves certaines sont les réserves entièrement prospectées, étudiées et délimitées par des travaux minières.
- Catégorie B, les réserves probables sont les réserves étudiées géologiquement, relativement prospectées et partiellement délimitées par des sondages et ouvrages miniers.
- Catégorie C, les réserves possibles sont celles établies par l'étude géologique, géophysique, géochimique.

III.8 Les méthodes d'exploitation

Vu la morphologie et les conditions géologiques du gisement, l'exploitation souterraine est la mieux appropriée. Vu la diversité des méthodes souterraines qui dépendent directement des caractéristiques géométriques des corps minéralisés, la méthode retenue pour l'exploitation des filons 4 .10 et 11 durant les exercices précédents est celle par sous niveaux abattus qui est basée beaucoup plus sur les travaux préparatoires par rapport aux autres méthodes d'exploitation. Le choix de cette méthode est défini en fonction des paramètres suivants (ENOF 2018):

- Morphologie du corps minéralisé : gisement filonien
- Encaissant : complexe marno-calcaire (bonne tenue des épontes)

- Pendage : 60° à 80°
- Puissance : 1 à 4m

La méthode consiste au creusement des trémies de soutirage au niveau de la voie de roulage, ensuite le creusement des sous niveaux du bas vers le haut et des recoups pour le traçage et le découpage et enfin un tir de masse par bloc pour récupérer le reste du gisement (ENOF2018).

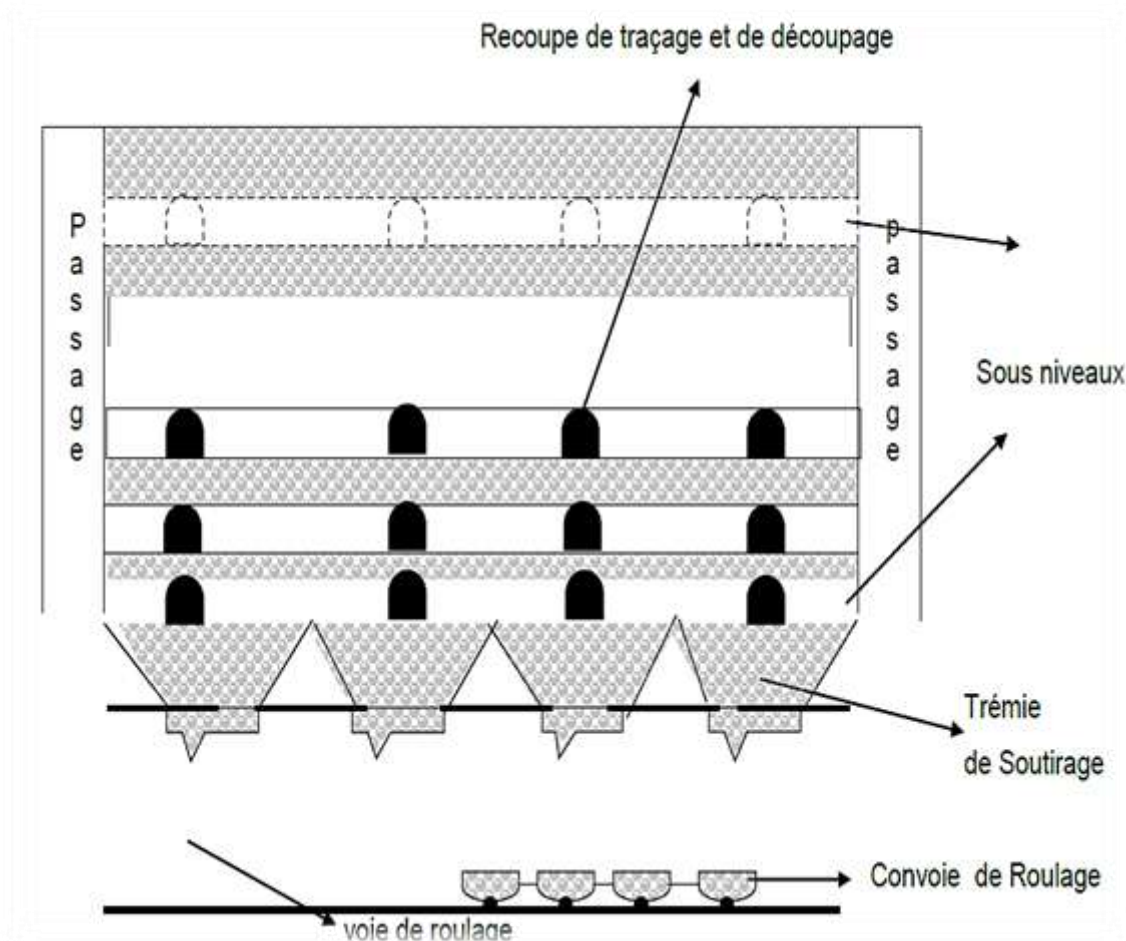


Figure III.4 Le schéma de la méthode des sous niveaux abattus.

III.9 Les méthodes de traitement et d'enrichissement

L'unité de valorisation de barytine d'Ain Mimoun traite le produit venant des différents filons (situés à 11 km de l'usine de traitement) dont le but est d'obtenir un produit marchand conforme aux normes API (American Petroleum Institute). Les traitements consistent en un enrichissement par voie humide (séparation gravimétrique). Une préparation mécanique préalable pour réduire la taille des grains et libérer le minéral utile (barytine) de la gangue stérile (carbonates, silices, argiles, etc...).

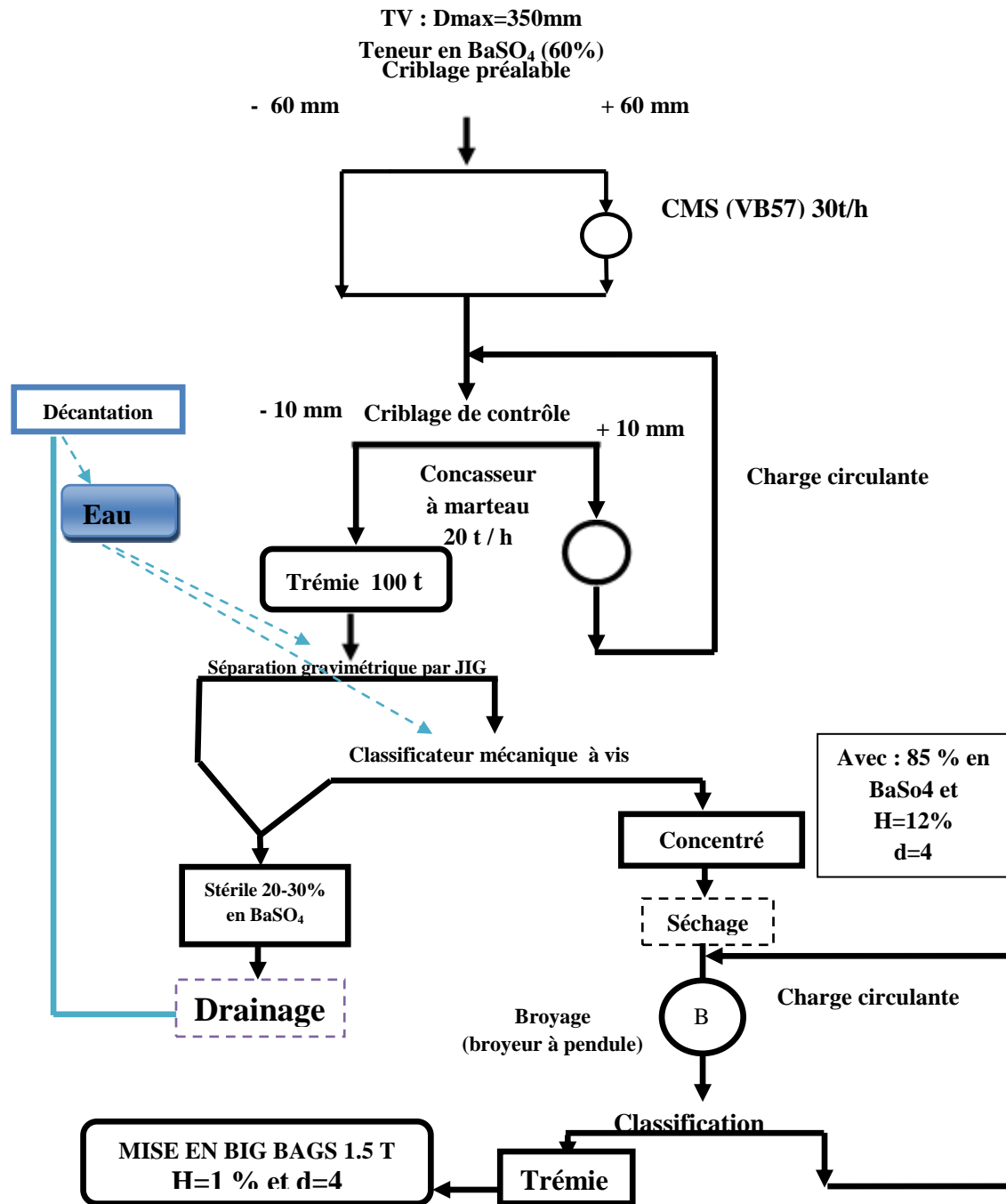


Figure III.5 Schéma technologique de traitement de la Barytine de Ain Mimoun (ENOF 2018)

III.9.1 La préparation mécanique

Cette étape est très importante, ayant pour but de fragmenter le minerai jusqu'à une grosseur nécessaire pour la séparation gravimétrique et en même temps elle assure la libération de la barytine de la gangue. Plusieurs opérations ont lieu dans cette étape à savoir : le concassage, le criblage, le broyage et la classification.

a) **Le concassage** : Le minerai stocké sur une aire de stockage de tout-venant est repris par une pelle chargeuse qui le déverse dans une trémie réceptrice installée au-dessus du concasseur primaire muni d'une grille de protection pour ne laisser passer que les blocs inférieurs à 320 mm, le concasseur primaire à mâchoire de marque BERGEAUT (VB57) est alimenté par un vibro-alimentateur situé au fond de la trémie réceptrice qui permettait d'avoir une alimentation constante et régulière (ENOF 2018)

Les produits obtenus après fragmentation ont une dimension inférieure à 60 mm, la capacité du concasseur primaire est de 20 t/h.



Photo III.6 Un concasseur à mâchoires à mouvement simple (ENOF 2018)

- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 1. mâchoire fixe. | 6. plaques articulées. |
| 2. mâchoire mobile. | 7. ressort. |
| 3. volant. | 8. la tige. |
| 4. arbre excentrique. | 9. les plaques des revêtements. |
| 5. la bielle. | |

Les concasseurs à mâchoires sont des équipements de travail intense, donc leur construction doit être très robuste. Ils sont faits en acier et munis de blindages en acier et au manganèse. Les plaques peuvent être lisses ou cumulées, ces dernières meilleures pour des minerais durs ou abrasifs. L'angle entre les mâchoires est inférieur à 26° , car un angle plus grand produirait du glissement qui réduit la capacité et augmente l'usure.

Il se compose de deux mâchoires. L'une est fixe 1, et l'autre mobile 2, autour d'un axe, La mâchoire mobile est animée d'un mouvement alternatif par un volant 3, excentrique 4, bielle 5, et deux plaques articulées 6. La mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe lorsque la bielle commandée par l'excentrique, monte lors de la rotation de l'arbre excentrique à l'aide de la bielle et les plaques articulées provoquant un mouvement de va-et-vient de la mâchoire mobile. Le retour de la mâchoire mobile est assuré par son propre poids et le ressort 7, avec la tige 8. Le concassage de minerai s'effectue périodiquement au rapprochement des mâchoires,

lors du recul de la mâchoire mobile de celle fixe, s'effectue le déchargement des matériaux concassés (Pierre.B et El-Aïd.J 2012).

b) Le criblage de contrôle : Le minerai de granulométrie inférieure à 60 mm est acheminé à l'aide d'une bande transporteuse sur un crible vibrant de marque BERGEAUT CVB 1020. Le crible muni d'une toile tissée de mailles de 10 mm d'ouverture. Le refus du crible (+10mm) passe dans un concasseur à percussion (à marteau) pour réduire la dimension jusqu'à 10mm. Après fragmentation, la charge retourne avec le minerai sorti du concasseur primaire et déversé sur le même crible pour contrôler la granulométrie (ENOF 2018).

c) Le concassage secondaire : Le refus du crible (+10mm) passe dans un concasseur à percussion (à marteau) de marque LORO PARISINI. Après fragmentation la charge retourne avec le minerai qui sort du concasseur primaire sur crible.

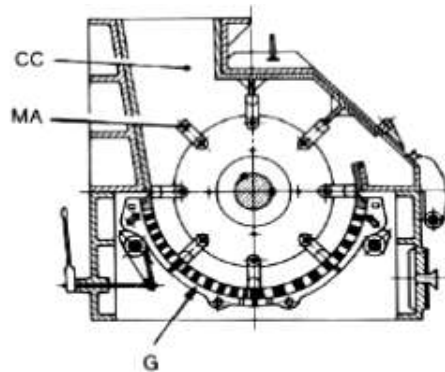


Figure III.6 Un concasseur à percussion (mono rotor à marteau articulé)
(Pierre.B et El-Aïd.J 2012).

CC : Chambre de concassage.

MA : Marteau articulé.

G : Grille de décharge.

Le mode d'action principal de ces concasseurs est la percussion. Celle-ci peut être soit directe sous l'action d'outils métalliques tournant à grande vitesse, soit indirecte par projection des matériaux à très grande vitesse contre des plaques de choc formant des enclumes fixes. Les appareils sont donc munis de rotors équipés d'outils de choc qui tournent à grande vitesse autour d'un axe, généralement horizontal, à l'intérieur d'une chambre de concassage dont la sortie peut être équipée d'une grille. Communément, on différencie les concasseurs à impact (percussion indirecte) des concasseurs à marteaux articulés (percussion directe), bien que tous les deux conjuguent les mêmes modes d'action (Pierre.B et El-Aïd.J 2012).

Le passant du crible dont la granulométrie est inférieure à 10 mm transporté à l'aide d'une bande transporteuse est déversé dans une trémie intermédiaire de 100 t, cette dernière permettait d'une part d'avoir une autonomie de fonctionnement pour le jig de 3 à 4 heures et d'avoir une alimentation contrôlée et constante au niveau de la section de Jigage d'autre part.

III.9.2 Les procédés de traitement

a) **La séparation par jigage et la classification** : Le minerai concassé inférieur à 10 mm stocké dans la trémie qui alimente un jig WEMCO REMER qui consiste à enrichir le produit par la séparation des particules légères par voie humide et dont le rendement dépend de la qualité du minerai concassé, de sa granulométrie et du rapport solide / liquide qui doit être de 0,3 à 0,5.



Photo III.7 Le Jig WEMCO d' Ain Mimoun

Après traitement gravimétrique deux produits sont obtenus

- Une fraction lourde dite : concentré.
- Une fraction légère dite : stérile.

La fraction lourde (concentré de baryte) est par l'intermédiaire d'une goulotte déversé dans un classificateur à vis sans fin. Cette dernière assure la remontée du concentré en continu tout en laissant s'écouler l'eau. Le concentré ainsi évacué par le classificateur avec une humidité avoisinant de 20 à 25 % et à l'aide d'une bande transporteuse est mis sur une aire de stockage, pour lui permettre de s'égoutter naturellement et de réduire l'humidité, la capacité du jig est de 10 à 12 T/heure.

La fraction légère (stérile) s'écoule avec l'eau, à l'aide d'une goulotte et évacuée sur une aire de stockage, après égouttage, il est repris à l'aide d'une pelle chargeuse pour être stocké à l'extérieur du site.

Le concentré après égouttage est repris par une pelle chargeuse pour y être stocké dans une trémie à proximité du four sécheur.

L'usine est alimentée en eau claire par un sondage situé à quelques kilomètres en amont de l'usine, cette eau qui arrive à l'usine par gravité est stockée dans un bassin qui alimente le jig, et l'eau de traitement est recyclée après décantation dans une digue.

b) La station de séchage et de broyage

- **Le séchage :** Un sécheur rotatif (Soudron CHM200) avec une vitesse de rotation de 2.5 tr/minute et une température qui peut atteindre 120 °C. Le sécheur est alimenté en minerai (concentré avec une humidité $H= 12\%$ max) par un distributeur et une bande transporteuse. Le produit se débarrasse de l'humidité (1% Max) et par l'intermédiaire d'un élévateur, il sera stocké dans la trémie du produit brut.



Photo III.8 La station de séchage

- **Le broyage :** Le broyeur pendulaire (Soudron SACRE BP16) est alimenté par la trémie de produit sec ($d < 10\text{ mm}$), ce dernier est broyé jusqu'à une finesse de 3 % max refus de la classe 74 μm , le produit broyé passe une trémie de stockage par voie d'air (aspiration par un ventilateur à grande capacité), les schlamms du broyeur sont aspirés et stockés.

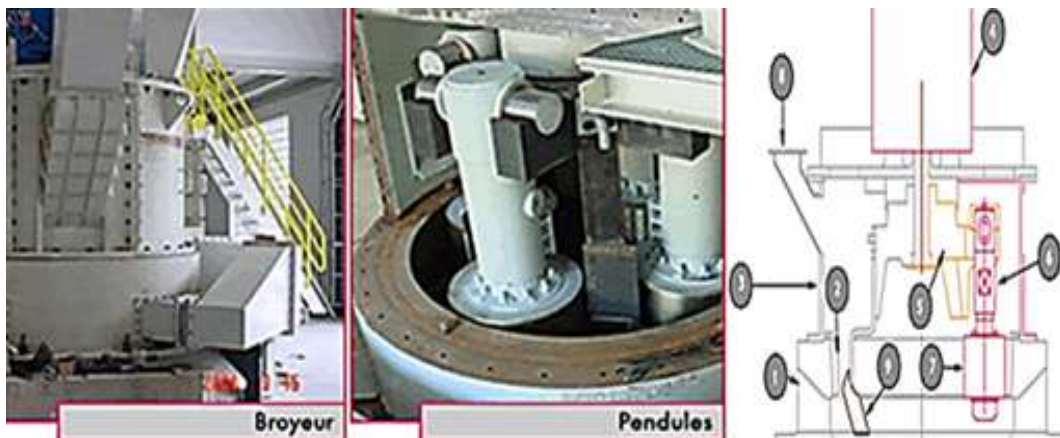


Figure III.7 Le Broyeur à pendules (pendulaire) (Broyeur pendulaire, 2015)

Les granulométries allant de (0 à 30) mm à l'alimentation et de 40 µm à 150 µm à la sortie. Le broyeur pendulaire BP16 est capable de broyer 16 t/h. Ce broyeur avec ses auxiliaires a une puissance installée totale d'environ de 800 KW.

Le broyeur repose sur la base 1 autour de laquelle se trouve une volute de répartition de l'air de transport de la matière pulvérisée. La base est munie d'aubes profilées qui assurent l'entrée tangentielle de l'air dans le broyeur, ce qui provoque une première sélection. La base supporte le chemin de roulement horizontal 2. Au-dessus de la base se trouve la chambre de broyage 3 composée de segments démontables permettant un accès aisé aux pendules pour leur lubrification et leur démontage durant les périodes d'entretien. La commande se compose d'une transmission à poulies et courroies ou d'un réducteur conique 4. Les arbres sont exempts de clavettes. Les calages sont réalisés au moyen d'un dispositif de fretage à froid facile à monter et à démonter. L'extrémité inférieure de l'arbre vertical supporte une étoile 5 à deux, trois ou quatre branches. A chacune des branches est suspendu librement un pendule vertical 6 par l'intermédiaire de deux tourillons. A l'extrémité de chaque pendule se trouve un galet 7 tournant librement. La rotation de l'étoile entraîne les pendules et le broyage s'effectue sous la pression des galets contre le chemin de roulement. La matière à broyer est alimentée par le distributeur alvéolaire 8 et tombe dans la base. La matière à broyer est reprise par les socs 9 pour être projetée entre les galets et le chemin de roulement (Broyeur pendulaire, 2015).

- **L'ensachage et le conditionnement** : Le produit fini est ensaché et conditionné dans des big-bag de 1,5 tonne par des ensacheuses de marque Testut. Un contrôle est effectué par prélèvement sur chaque lot de 20 tonnes, les résultats sont consignés sur le registre journalier de production de produit fini.

III.10 Conclusion

Le gisement Barytique de Ain Mimoun est un complexe filonien de type hydrothermal qui représente un potentiel minier très intéressant sur le plan économique, au vue de la quantité et la qualité du minerai extrait. Il est situé au flanc nord de l'anticlinal de Khenchela dernier maillon de la chaîne des Aurès vers l'Est. Ce gisement est abrité dans des formations géologiques d'âge Crétacé, allant du Barrémien jusqu'au Cénomaniens, coiffées par du Miocène transgressif, présentant ainsi un inventaire pétrographique riche et diversifié.

Le cortège minéralogique est composé de deux catégories de minéraux, à savoir les minéraux métalliques et ceux de gangue cités précédemment (Baryte, Dolomite, Quartz et Calcite). Cette minéralisation a un caractère hydrothermal indéniable, confirmé par les différents

types d'analyses physico-chimiques. Ce gisement peut être considéré comme étant l'un des plus grands gisements barytique à l'échelle nationale avec ces réserves.

La méthode d'exploitation appliquée au niveau de la mine d'Ain Mimoun est celle des sous niveaux abattus. La méthode de traitement gravitationnelle est considérée comme étant la plus économique, cependant certains problèmes demeurent sans solutions.

- Concentré de moyenne qualité
- Granulométrie limitée (difficulté pour les fines)
- Décharge de stériles nocives dans l'environnement.

Le concentré obtenu par la chaîne de traitement actuel ne répond pas en quantité et en qualité aux exigences de certains consommateurs (produits pharmaceutiques et chimiques etc.).

- La Barytine utilisée dans le domaine pharmaceutique exige une teneur égale ou supérieure à 95 % en BaSO₄.
- La Barytine utilisée dans l'industrie chimique exige une teneur supérieure à 95% BaSO₄.

La valorisation interne du produit reste faible et ne pourra pas satisfaire en quantité et qualité la demande nationale vu la structure actuelle des ateliers et le schéma technologique de traitement utilisé. Entraînant ainsi :

- Pertes en minéral utile dans les stériles avec une teneur en BaSO₄ de 20-30%
- Diminution de la capacité de la production projetée
- Envols de poussières

Chapitre IV

Techniques expérimentales

IV.I Introduction

Dans cette partie de ce chapitre, le but est de présenter les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'étude de caractérisation et l'enrichissement de la Barytine d'Ain Mimoun. Il comporte l'ensemble des méthodologies et différentes analyses réalisées sur les échantillons prélevés en vue de définir la composition chimique.

La caractérisation est généralement basée sur l'analyse de plusieurs paramètres chimiques et physiques. Elle repose principalement sur la distribution dans les différentes fractions granulométriques, sur l'identification de leur composition minéralogique, et l'évaluation de leur degré de libération. Ces outils de caractérisation seront détaillés dans le présent chapitre.

IV.2 L'intérêt de la caractérisation physico-chimique et minéralogique

Elle consiste à la détermination de différentes espèces minérales constituantes du minerai Barytique d'Ain Mimoun. D'une manière plus claire, elle va nous permettre de :

- Identifier les minéraux (nature, composition).
- Quantifier les phases minérales.
- Définir la forme et les dimensions des grains.

Cette étude va permettre donc l'orientation de la recherche vers la méthode d'enrichissement à adopter. L'étude des relations mutuelles des minéraux, de la taille des grains, de la façon dont ils sont liés les uns aux autres, permet de prévoir une « maille de libération », c'est de connaître la granulométrie à atteindre pour une séparation optimale des divers constituants. Pour cela, des échantillons de minerais sont soumis à différentes analyses et observations telles que :

- Analyse granulométrique (AG)
- Les Lames Minces (LM)
- La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)
- La Fluorescence X (FX)
- Le Diffractomètre à Rayons X (DRX)
- L'Infrarouge (IR)

IV.2 L'échantillonnage

IV.2.1 L'échantillonnage

L'échantillonnage se définit comme une procédure dans laquelle une portion de substance, de matériau ou de produit est prélevée pour fournir un échantillon représentatif de l'ensemble pour les besoins de l'analyse (Moussaceb K.2007). Elle a été faite à l'aide d'une masse métallique enveloppée par plusieurs couches de papier et de nylon pour éviter toutes contaminations possibles. Les points sélectionnés concernent les affleurements rocheux des unités géologiques principales des régions étudiées (Matías M et Salvarredy A. 2008).

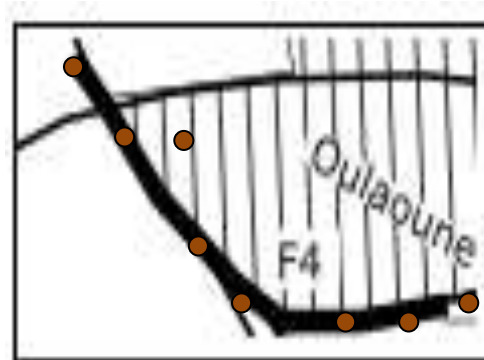
Les principales étapes qui caractérisent une démarche d'échantillonnage sont l'élaboration d'une stratégie de prélèvement, le prélèvement des échantillons sur le site, la conservation des échantillons et leur préparation pour les différentes analyses et méthodes de traitement à appliquer. La valeur des résultats de la caractérisation dépend de la réalisation adéquate de toutes ces étapes. La stratégie de prélèvement repose essentiellement sur le volume et le nombre des échantillons ainsi que sur le choix des points de prélèvement des échantillons (nombre et positionnement). La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont effectués (Gosselin. A, Blackburn et Bergeron.M. 1999).

IV.2.2 Le prélèvement des échantillons

Un échantillonnage est réalisé au niveau du site de la mine d'Ain Mimoun. Le prélèvement des échantillons est effectué en trois zones et dans des points différents de chaque zone, il s'agit de six 08 échantillons de tout-venant de la mine, trois échantillons de concentré et trois échantillons de stérile de laverie, le poids de chaque échantillon reçu est d'environ 20 Kg. Ces échantillons sont étiquetés, stockés dans des sacs en plastiques doublés et envoyés au laboratoire des mines de l'institut des mines de l'université de Tébessa pour leur stockage et préparation.



○ Points de prélèvement pour les stériles



● Points de prélèvement de minerai brut



● Points de prélèvement pour le concentré

Photo IV.1 Les différents points de prélèvement des échantillons pour chaque zone.



Photo IV.2 Les échantillons étiquetés et stockés dans des sacs en plastiques.

IV.3 La préparation des échantillons pour les analyses

Les échantillons prélevés sont préparés au niveau du Laboratoire de l'institut des mines, la Figure IV.3 présente l'organigramme du protocole de préparation des échantillons. Ce dernier se compose de : homogénéisation, quartage, concassages et broyage...etc. Les échantillons sont préparés afin de réaliser des analyses concernant la caractérisation minéralogique, l'analyse physico-chimique (FX, DRX, IR et MEB) ainsi que l'analyse granulométrique et l'essai d'enrichissement.

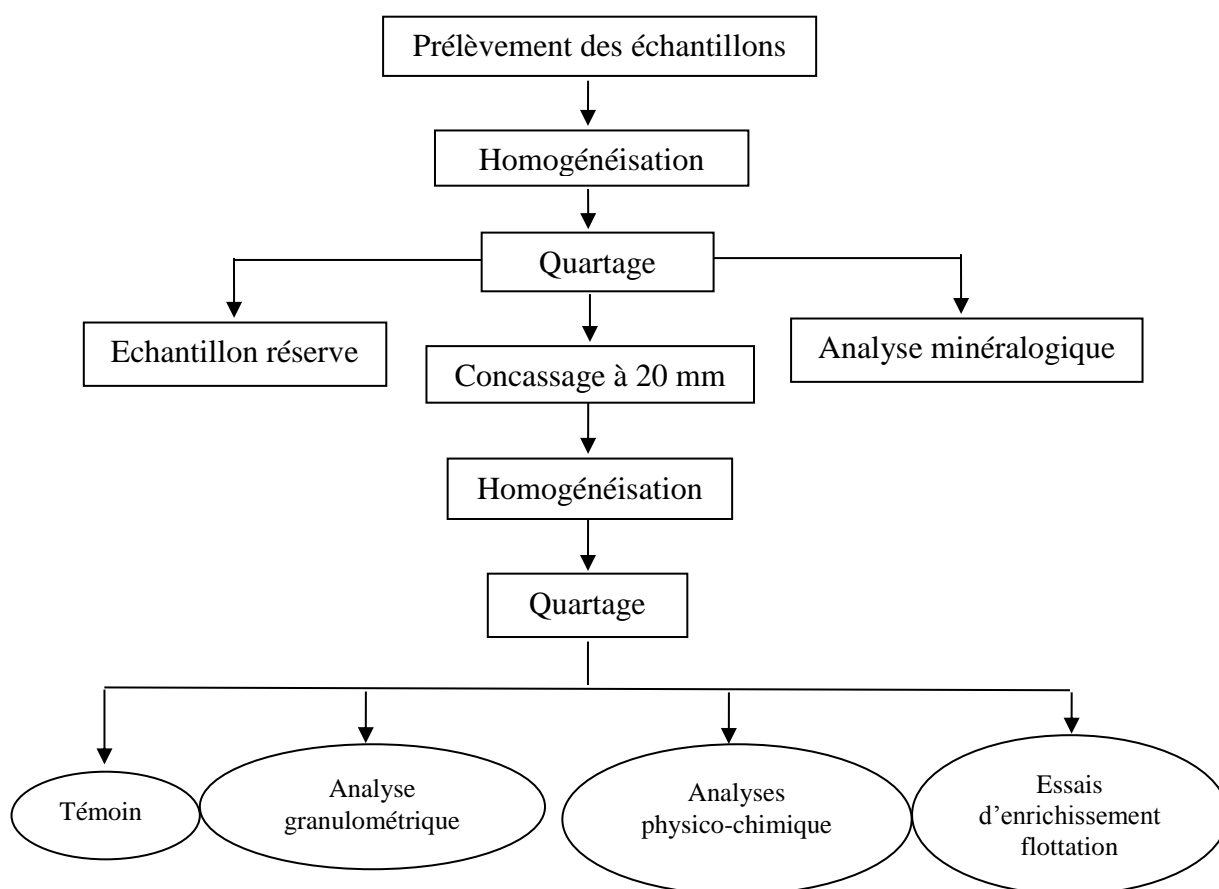


Figure IV.1 Le protocole de la préparation des échantillons

IV.3.1 Le concassage

Le concassage est la première étape du procédé de fragmentation, il est effectué généralement par voie sèche, il consiste à réduire la dimension du minerai. Cette étape de traitement prépare le minerai à subir une autre réduction de granulométrie (broyage) ou à passer directement aux étapes de classification et/ou de concentration. En règle générale, elle ne produit pas de résidus (Bureau européen pour la PRIP. 2004). Cette opération est effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de l'usine d'Ain Mimoun. Le concassage des échantillons étudiés a été

assuré par un concasseur à mâchoire, il permet une réduction des morceaux jusqu'à une dimension inférieure à 20 mm et représenté sur la Photo IV.3.



Photo IV.3 Un concasseur à mâchoire au laboratoire d'Ain Mimoun

IV.3.2 L'homogénéisation

C'est un procédé mécanique qui consiste à mélanger l'échantillon de manière à le rendre homogène. On a effectué cette opération trois fois, afin d'assurer l'homogénéisation de l'échantillon globale, à l'aide d'un diviseur au niveau du laboratoire de l'institut des mines à l'université de Tébessa.



Photo IV.4 Un diviseur mécanique pour l'homogénéisation

IV.3.3 Le quartage

Le quartage est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon, par transformation en quatre quarts, dont on prélève deux quarts opposés, les deux autres quarts seront gardés comme témoin, c'est une opération de réduction de poids de l'échantillon pour l'analyse (Moussaceb K.2007).

Ce procédé obéit à la loi de RICHARDSE exprimé par la relation suivante :

$$Q \geq kd^2 \dots\dots\dots(VI-3)$$

$$m \leq Q/kd^2, m= 2n$$

$$n = \ln(m)/\ln(2)$$

Avec

Q : la masse initial à quarter ;

m : la masse déterminant le nombre de quartage, utilisée comme moyen de vérification ;

d : diamètre de plus gros grain ;

k : coefficient de répartition de la minéralisation (k=0.1 pour matériau homogène, k=0.5 pour matériau hétérogène)

n : le nombre de quartage.

Dans notre cas, nous avons effectué deux opérations de quartage pour obtenir la masse nécessaire afin de réaliser notre essai.

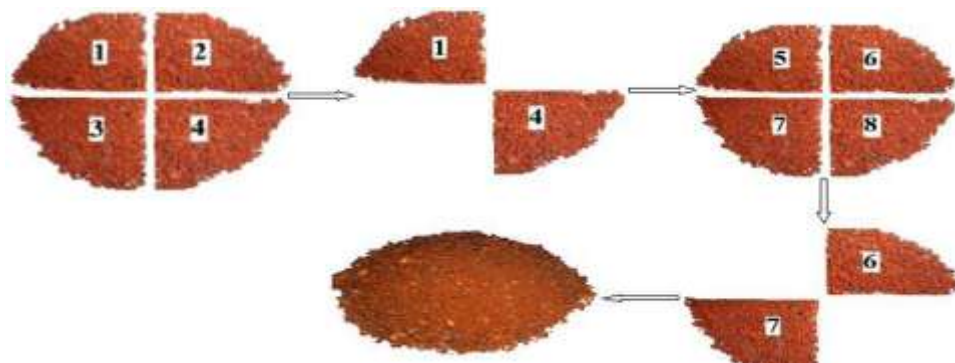


Figure IV.2 Le quartage

L'échantillon concassé subi une série d'opérations d'homogénéisation et de quartage soigneusement effectuée jusqu'à l'obtention d'une quantité suffisante qui va subir une analyse granulométrique d'une part et l'autre partie sera broyée pour les analyses de caractérisation physico-chimique à l'aide de DRX, FX, IR et MEB.

IV.4 L'analyse minéralogique pétrographique

L'étude pétrographique a été effectuée à l'aide de l'examen microscopique sur des lames minces. La réalisation de ces lames sur la Barytine nécessite une préparation particulière à cause de leur friabilité dans la plupart des cas. Une induration de l'échantillon est donc nécessaire, afin de pouvoir procéder au découpage, polissage et collage. Les lames minces sont confectionnées au niveau de l'atelier des lames minces du département de Géologie, Université d'Annaba.

IV.4.1 La méthodologie de préparation des lames minces

a. L'échantillonnage : Les échantillons ont été prélevés du gisement d'Ain Mimoun sont numérotés et étiquetés.

b. Le découpage : Le découpage des échantillons prélevés s'effectue à l'aide d'une lamelle de la manière présentée dans la figure suivante



Photo IV.5 La réalisation des tranches (sucres) (Alem.D 2012)

c. Le séchage : Les échantillons découpés sont numérotés, orientés et placés sur une plaque chauffante pendant 2 à 3 heures sous une température qui ne dépasse pas 100°C. Cette opération permet l'élimination de l'humidité.



Photo IV.6 Le séchage des sucres

d. L'imprégnation : Après le séchage, l'échantillon est imprégné par la résine goutte à goutte sous vide, afin d'éliminer les bulles d'aires (Mackenzie A. F. Et Dawsonz J. E, 1961). Il existe aussi, une autre méthode qui consiste en l'imprégnation de l'échantillon qui doit être immergé dans le vernis incolore au lieu d'une résine jusqu'à la sortie des bulles d'air (Gaine 1973). En générale cette opération s'effectue à l'aire libre pendant 10 minutes ou plus.



Figure IV.3 L'imprégnation des échantillons au vernis incolore.

e. Le durcissement : Le durcissement s'effectue à chaud dans l'étuve utilisé pour le séchage où la température est sous les 100° C pour éviter la carbonisation de l'échantillon. L'induration se fait en une heure. Il est nécessaire de surveiller l'échantillon au cours de l'induration. Si sa surface s'assèche, il faut tremper à nouveau dans le vernis et recommencer l'opération jusqu'à ce que l'échantillon reste enduit de vernis. Après la phase de durcissement, l'échantillon peut subir les opérations de préparation classique des lames minces (sciage, polissage, collage ...).

f. Les opérations de préparation classique des lames minces (Alem.D 2012)

Dressage d'une facette du sucre

- Pré polisseur double poste.
- Utilisation d'abrasif à base de corindon.
- Assurer une planéité totale d'une facette du sucre.

Préparation du porte objet

- Boite de porte objet de 100 lames
- Emplacement des portes objets dans le plateau porte échantillons de la rectifieuse multi plaques.
- Micromètre comparateur à cadran.

Nettoyage à l'ultrason et séchage

- Elimination de toutes matières en suspension dans une cuve à ultrason. L'eau distillée est très recommandée.
- Elimination de toute humidité à l'aide d'une plaque chauffante réglée à 75 -80 °C.

- Diminution de la température jusqu'à 40-45 °C et chauffage des portes objets.
- Mélange des deux solutions de la colle Epoxy tin section (résine + durcisseur selon des proportions de poids connues).
- Etaler la colle sur la facette polie du sucre.
- On applique la face du verre dépoli sur la colle du sucre et on appuie jusqu'à l'élimination totale des bulles d'air.
- On doit gratter le dos du verre avec une lame métallique pour supprimer la colle qui peut exister dessus avant de faire l'arasage.



Photo IV.7 Une cuve à ultrason.



Photo IV.8 Le collage du verre sur les sucres.

Arasage du sucre

Arasage du sucre et ne laisser qu'un mm (1) d'épaisseur de roche, Ne pas oublier de recopier le code de l'échantillon sur le dos de la lame à l'aide d'un stylo à pointe diamant.

Rectification

Réglage du micromètre de telle sorte qu'il ne reste que 30 μ m d'épaisseur de roche sur le porte objet. On a déjà l'épaisseur de la lame après dépolissage 1600 μ m à laquelle on ajoute 30 μ m ça fait 1630 μ m donc on règle le micromètre à 1630 μ m.



Photo IV.9 Le disque de la rectifieuse (Alem.D 2012)

Polissage de finition

- Tissu monté sur le disque tournant de la polisseuse ;
- Polisseuse automatique Brut.

Vérification au microscope optique polarisant

L'opérateur s'assure de la qualité des lames sous le microscope. Au cas où il constate que la lame n'a pas atteint encore les 30 μ m (minéraux indicateurs quartz et calcite), il recommence la rectification en faisant très attention au réglage du micromètre).

IV.4.2 Les observations microscopique

Le microscope fait apercevoir dans les minéraux des détails de structure qui échappent à tout autre procédé de recherche ; il montre les inclusions, permet d'en apprécier la nature, il révèle les altérations secondaires des cristaux, les modifications qu'ils ont subies, soit spontanément, sous l'influence des forces moléculaires intérieures, soit indirectement sous l'action des agents extérieurs. Le procédé qui sert de base aux études actuelles de géologie micrographique consiste en la réduction des minéraux et des roches en lames minces, susceptibles d'être observées par transparence (Fouqué.F 1879).

L'étude pétrographique par microscopie effectuée sur les lames minces a permis de décrire et de recenser les éléments figurés avec leurs ciments (matrices). Ces lames ont été examinées macroscopiquement sous lumière polarisée (POLARIZING MICROSCOPE MT9930L) analysée du laboratoire du département de Science de la terre de l'université d'Oum El Bouaghie.



Photo IV.10 Un Microscope optique de marque MT9930L

IV.5 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but d'observer la distribution granulométrique des particules d'un échantillon et l'identification des différentes tranches granulométriques qui constituent un échantillon, permettant par ailleurs de définir sa texture. Elle permet aussi d'étudier la répartition des espèces minérales dans chaque fraction par l'analyse chimique.

Les échantillons prélevés de minerai brut et de stérile ont été traités mécaniquement au laboratoire (concassage, homogénéisation et quartage), pour réduire leurs dimensions à environ 20 mm. Ensuite les échantillons ont subi un classement dimensionnel par tamisage. Ce dernier a été réalisé par voie sèche avec une tamiseuse automatique de type D407 et une série de tamis de maille en progression géométrique décroissante de : (16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 et 0,053) mm. L'échantillon est tamisé pendant 40 minutes avec une magnitude de 60 mm /g. La masse de refus de chaque tamis est pesée à l'aide d'une balance d'une précision de 0,01 g.



Photo IV.11 Une tamiseuse automatique de marque D407

IV.6 La caractérisation physico-chimique

La caractérisation de la Barytine est réalisée à l'aide de différentes méthodes portées essentiellement sur l'analyse par DRX qui a pour but de déterminer les éléments majeurs présent dans les échantillons, ainsi que l'analyse par FX et MEB faisant l'objet d'une connaissance de la composition chimique dans les différents échantillons analysés. Avant de procéder à une analyse quelconque d'un échantillon solide, nous lui faisons subir un traitement mécanique (broyage).

IV.6.1 Le broyage

Le broyage est un procédé de fragmentation qui s'effectue généralement par voie sèche, il consiste à réduire la dimension du minerai à une dimension plus fine. Cette étape de traitement prépare le minerai à passer directement aux étapes de classification et/ou de concentration. En règle générale, elle ne produit pas de résidus (Bureau européen pour la PRIP. 2004). Cette opération est effectuée dans le laboratoire de contrôle de qualité de l'usine d'Ain Mimoun. Le broyage des échantillons étudiés est réalisé par un broyeur à disque (Photo IV.12). Il permet de réduire les dimensions des grains jusqu'à une dimension très fine.



Photo IV.12 : Un Broyeur à disque au laboratoire d'Ain Mimoun

IV.6.2 Les méthodes d'analyse

Une partie des analyses des différentes fractions granulométriques broyées obtenues lors d'opération de tamisage est réalisée au laboratoire de contrôle de qualité de l'usine d'Ain Mimoun pour Analyse densimétrique. La deuxième partie a été réalisée dans l'unité EMRU (Elegant Materials Reserch Unity) de l'université de Farhat Abbas –Sétif 1 pour l'analyse par fluorescence aux rayons X (XRF). La troisième partie de l'échantillon est analysé au laboratoire département de génie des procédés - Université d'Abderrahmane Mira –Bejaia- pour l'analyse par Infrarouge (IR) et la Diffraction par Rayon X (DRX). L'autre partie de l'échantillon est analysée par Microscope Electronique à Balayage (MEB) au laboratoire de recherche de génie mécanique LGM- Université de Mouhamed Khidher –Biskra- .

IV.6.2.1 L'analyse densimétrique

La densité d'une substance se note d et correspond au rapport de la masse volumique de cette substance par la masse volumique de l'eau pure à une température de 4°C. La densité peut donc être calculée en utilisant la relation suivante:

$$d(\text{substance}) = \rho(\text{substance}) / \rho(\text{eau}) \dots \dots \dots (\text{IV-4})$$

Les deux masses volumiques doivent être exprimées dans la même unité. La densité n'a donc pas d'unité (les deux unités s'annulant). On sait qu'un litre d'eau a une masse d'un kilogramme $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Ainsi, les masses volumiques (de l'eau et de la substance) sont exprimées en kilogramme par décimètre cube ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) (Yann.L 2020).

Durant notre travail on a uniquement utilisé la méthode de LECHATelier (selon la norme API 13A sections 7 & 20) pour la détermination de la densité (Francis.R et Annick.R, 2007). Cette dernière est effectuée au niveau de laboratoire d'analyse et contrôle de qualité de la société des mines de Baryte (ENOF), mine d'Ain Mimoun W.KHENCHELA.

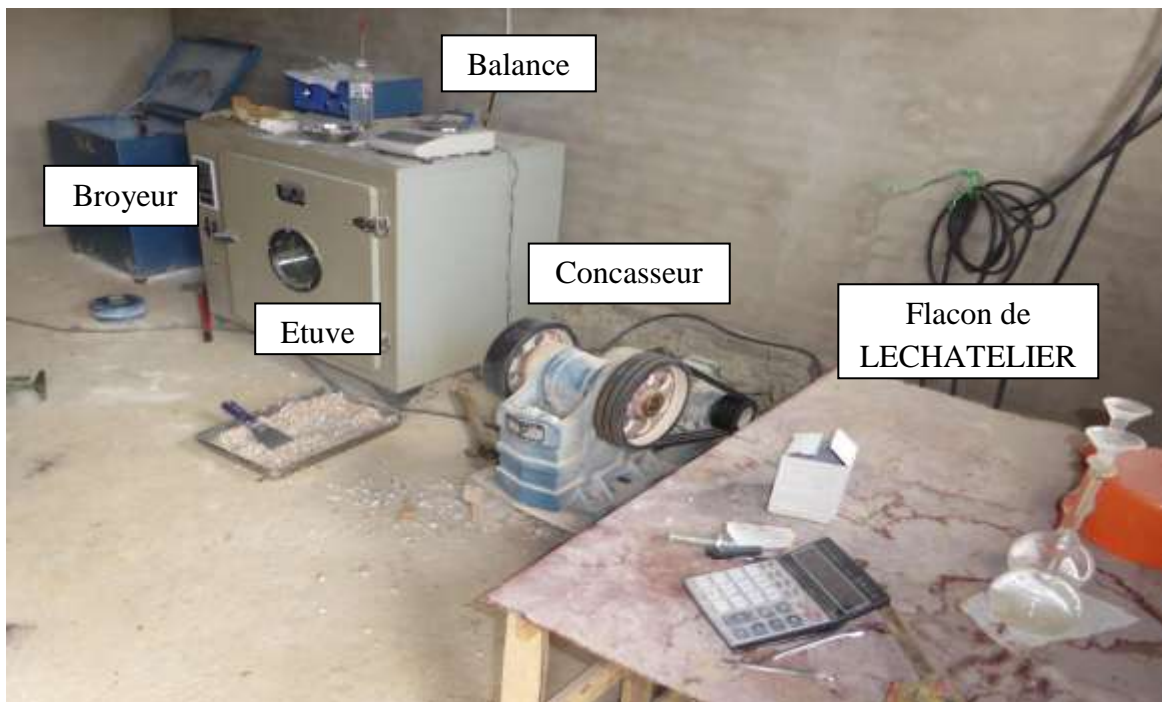


Photo IV.13 Les équipements nécessaires pour la méthode de LECHATelier (Scogings A. 2018)



Photo IV.14 Mesure de la densité par la méthode de LECHATELIER

IV.6.2.2 La Fluorescence X (FX)

La fluorescence X est une propriété spectrale des atomes exploitée en analyse pour obtenir des renseignements qualitatifs sur la composition élémentaire de toutes sortes de mélanges. Cette méthode est non destructive et ne nécessite pas de préparation d'échantillons, (pour les échantillons de petites dimensions seule une adaptation du porte échantillon est nécessaire). La configuration de certains appareils permettant de travailler très près de l'échantillon est un avantage important, particulièrement lorsque celui-ci est de petite taille.

L'analyse qualitative par spectrométrie de fluorescence X à dispersion d'énergie permet d'obtenir de façon rapide et globale la totalité des éléments chimiques contenus dans l'échantillon. L'analyse ne dure que quelques minutes et avec un seul spectre on peut avoir l'ensemble des éléments détectés. L'interprétation des résultats est donc très rapide. Toutefois dans certains cas on peut noter une légère difficulté dans la lecture du spectre due à la superposition de certains pics.

Le principe consiste à irradier l'échantillon soit par faisceaux de rayon X, soit par un bombardement avec des particules, généralement les électrons ayant suffisamment d'énergie, pour que les atomes ainsi ionisés émettent un rayonnement de fluorescence également dans le domaine des rayons X.

Quand on irradie avec des photons ou quand on bombarde avec des particules de grande énergie entre 5 et 100 keV, un matériau servant de cible celui-ci émet une fluorescence située dans le domaine des rayons X. Le spectre de cette photoluminescence comporte des radiations dont les longueurs d'ondes sont caractéristiques des atomes de ce matériau. Le mode d'extraction pour provoquer ce qu'on nomme la fluorescence X des atomes sont nombreux : photon ou particules.

L'application en analyse chimique est évidente, elle consiste à comparer le spectre de fluorescence X émis par l'échantillon inconnu à des spectres de référence dont les compositions sont connues ou à des spectres d'éléments purs allant du bor Br ($Z = 5$) à l'uranium ($Z = 92$). L'échantillon est finement broyé non seulement pour assurer l'homogénéité, mais aussi pour éviter l'effet de grain sur le trajet des rayons X qui perturberait le résultat (Francis.R et Annick.R 2007).

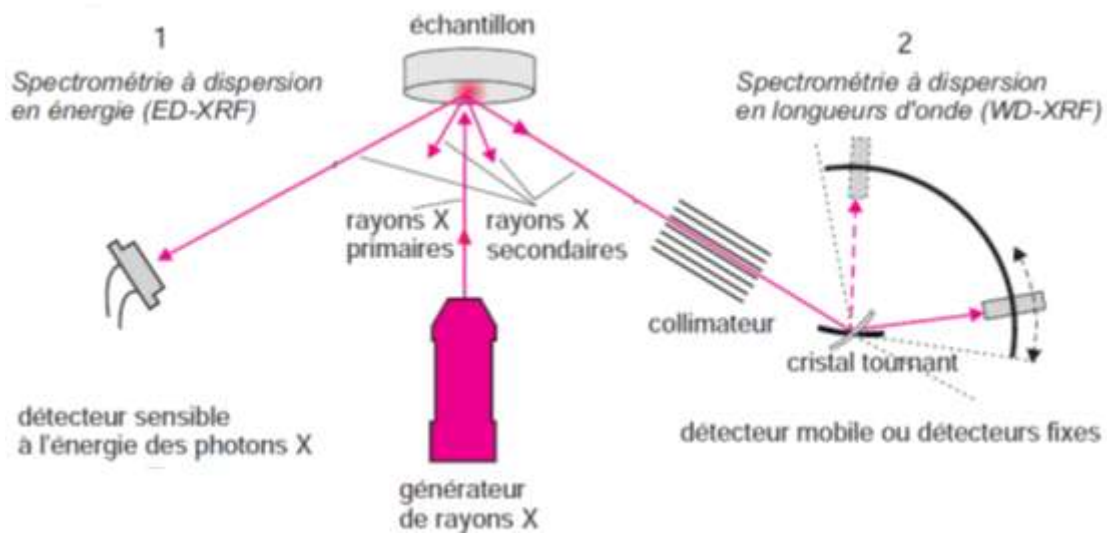


Figure IV.4 Le principe de fonctionnement de diffraction par FX

(Francis.R et Annick.R 2007)

L'analyse de la fluorescence aux rayons X (XRF), a été réalisée dans l'unité EMRU (Elegant Materials Reserch Unity) de l'université de Farhat Abbas –Setif 1 à l'aide d'un spectromètre à fX à dispersion de longueur d'onde (WDXRF) de marque Rigaku ZSX Primus (Photo IV.15).

La méthode utilisée est le pastillage qui permet une mesure directe sur la poudre afin d'avoir les premières informations sur la composition chimique de notre échantillon. Pour notre cas, l'analyse par FX a été effectuée sur 03 échantillons, le tout-venant, le stérile, le concentré et toutes les tranches granulométriques.



Photo IV.15 Un Spectromètre à fluorescence X (WDXRF) Rigaku ZSX Primus.

IV.6.2.3 La Diffraction par Rayons X (DRX)

La méthode de diffractométrie X (diffraction des rayons X) est largement utilisée pour caractériser la structure cristallographique des matériaux cristallins, ainsi que la texture et la microstructure associée grâce à cette technique non destructive, locale, sélective et quantitative (Von.M et Laue.Z 1926, Bragg.WL 1934, BARRETT.CS 1957, HANK.V et Genzel.Ch 1997).

Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatiques (de longueur d'onde λ) tombe sur un matériau métallique, une partie du faisceau est diffusée par les atomes du cristal, c'est-à-dire réémise sous forme d'un rayonnement X de même longueur d'onde, pour que l'intensité du rayonnement X réémis soit observable, il faut que les rayonnements diffusés par les différents atomes du cristal soient en phase et forment ainsi un faisceau diffracté, cette condition de diffraction est illustrée sur la figure suivant et connue sous le nom de loi de Bragg qui s'exprime sous la forme (Derfouf .Ch 2011)

$$2d\sin\theta = n \lambda \dots\dots\dots(IV-5)$$

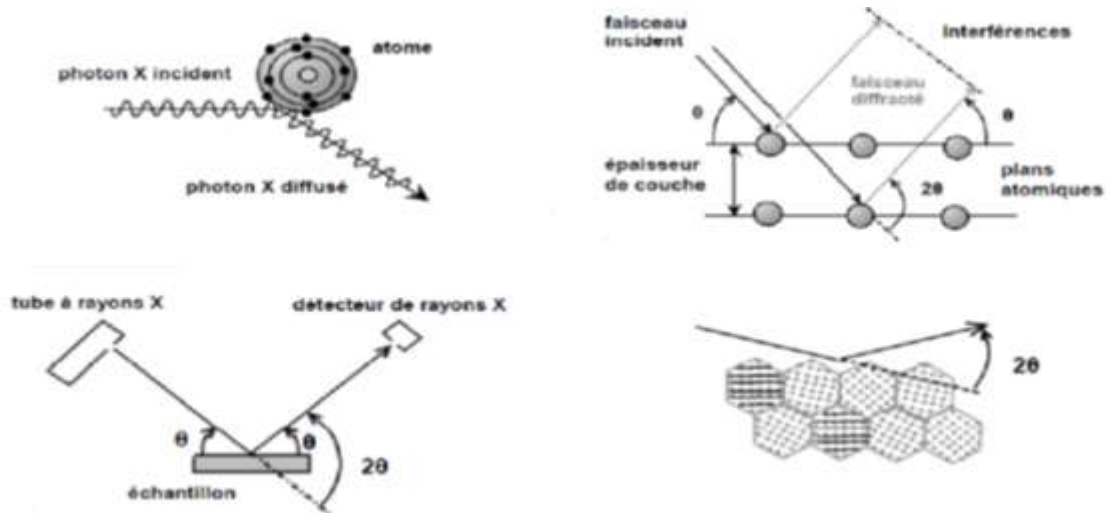
Avec: d : distance entre deux plans réticulaires consécutifs en angströms.

θ : angle des rayons X incidents ou diffractés avec le plan réticulaire.

n : nombre entier appelé ordre de la réflexion.

λ : longueur d'onde en angströms.

Cette loi montre que, pour un matériau donné et un faisceau de rayons X monochromatiques, il n'y aura diffraction des rayons X que pour des angles d'incidence θ bien déterminés, ces angles sont en relation avec les distances entre les plans réticulaires produisant les réflexions (Derfouf.Ch 2011).



L'analyse de la diffractométrie aux rayons X (XRD), a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre de PANALYTICAL caractérisé par un courant et une tension égale à 40 mA respectivement à 45 Kv.



Photo IV.16 Le Diffractomètre PANALYTICAL

IV.6.2.4 Le Microscope Electronique à Balayage (MEB)

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) est une technique d'analyse des minéraux basée sur le principe des interactions électrons-matière. Il consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon analysé, qui réémet différents types de particules. Il permet d'obtenir des images en haute résolution de la surface d'un échantillon et donner un diffractogramme (EDX) qui prouve les éléments chimiques contenant dans la surface scannée (Coussy.S 2011). Dans la pratique les microscopes électronique à balayage actuels les plus conventionnels, c'est-à-dire équipés de détecteurs d'électrons secondaires permettent d'atteindre une résolution de l'ordre de 20 nm et un grossissement qui peut aller jusqu'à 300000 fois (Violaine.Ph 2007).

Pour la caractérisation de l'échantillon initial (avant le tamisage), une pastille de taille (2-4mm) a été préparée puis observée par un microscope électronique à balayage (MEB) de type **JEOL JSM-6390 LV** au laboratoire de recherche de génie mécanique LGM- Université de Mouhamed Khidher –Biskra-. Ce microscope est couplé à une microanalyse chimique EDX globale, qui a permis d'identifier la composition chimique.



Photo IV.17 Le Microscope électronique à balayage (MEB)

IV.6.2.5 L'Infra Rouge (IR)

Mise au point à la fin du siècle dernier, sensiblement en même temps que la diffractométrie des rayons X, la spectrométrie d'absorption des rayons infrarouges lui avait par la suite cédé le pas en tant qu'outil de détermination minéralogique (Alexanian.C, Morel.P et Le Bouffant.L 1966, TARTE.P 1962).

Le spectre infrarouge comme le diffractogramme de rayons X, dépend, mais de façon différente, de la structure du solide. On se contentera de, rappeler ici que les bandes d'absorption infrarouge sont dues aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre. La masse des atomes, les forces de liaison et leur arrangement dans la molécule ou le cristal déterminent la fréquence des vibrations. Comme dans le cas des rayons X, toute substance, définie chimiquement et cristallographiquement possède un spectre infrarouge caractéristique (Maglione.G et Carn.M 1975).

Les spectres infrarouges ont été enregistrés au moyen d'un spectrophotomètre SHIMADZUE FTIR 8400S de laboratoire du département de génie des procédés - Université d'Abderrahmane Mira –Bejaia-.

Les échantillons ont été préparés suivant la méthode des disques de KBr selon la technique préconisée par Carbridge (1956) (Carbridge.D.E 1956). Dans un premier temps, les échantillons sont broyés puis tamisés ; un milligramme d'échantillon est ensuite mélangé avec trois cents milligrammes environ de bromure. Le mélange est homogénéisé à l'aide d'un vibreur électrique puis comprimé avec une presse hydraulique sous une pression de 10 t/cm² pendant trois minutes.

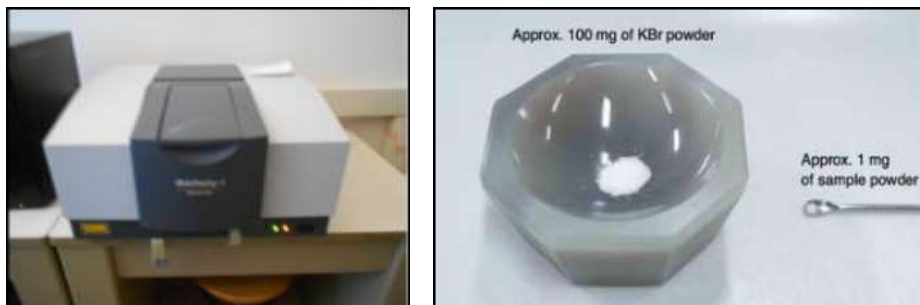


Photo IV.18 Le Spectrophotomètre SHIMADZUE FTIR 8400S

IV.7 Conclusion

Les différentes méthodes employées sont des techniques permettant :

- De définir les mailles optimales de libération et les minéraux de gangue associés.
- L'identification qualitative et quantitative des différentes phases minéralogiques présentes dans la matière première.
- La composition chimique en éléments majeurs et en éléments traces ainsi que leur distribution par tranche granulométrique

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, est présenté les résultats de l'étude de caractérisation de la Barytine d'Ain Mimoun. Pour atteindre notre objectif il faut d'abord interpréter les caractéristiques physicochimiques et minéralogiques de la Barytine d'Ain Mimoun, et ensuite de proposer des procédés de traitement, précédé par une libération complète du minéral de Baryte par la réduction des matériaux solides en morceaux plus petits.

V.2 Les observations au microscope optique

L'observation macroscopique des faciès minéralogiques sur terrain et celle microscopique des lames minces taillées dans plusieurs échantillons ont montré nettement la présence de quatre phases minérales, dont les propriétés physico-chimiques sont bien distinctes, à savoir la Barytine, la Dolomite, la Calcite et le Quartz (minéraux de gangue).

Globalement, La Barytine du gisement "Mizab" présente divers types de textures : bréchique, rubanée, veinulée (en Stockwork) ou en remplissage dans les microfractures et les fissures. Elle se localise indifféremment de la nature lithologique de l'encaissant : calcaires, calcaires dolomitiques, dolomies ou grès (Zedam.R 2012).

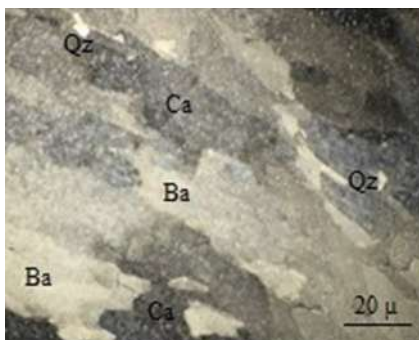


Photo V.1 Association barytine calcite quartz. (LPAX4).

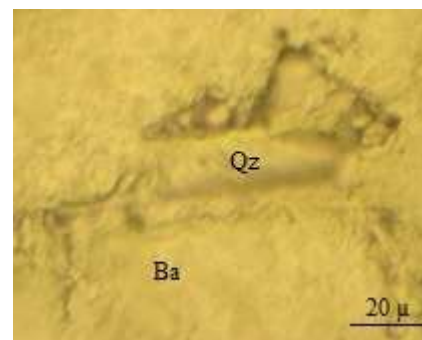


Photo V.2 Grain de quartz bipyramidé dans une masse de barytine. (LPAX4).

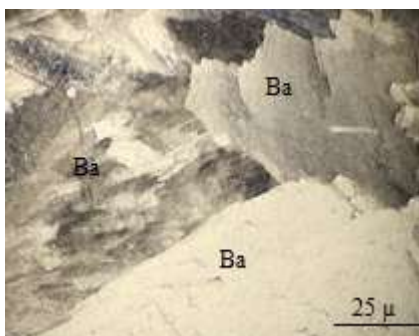


Photo V.3 Phénomène d'extinction roulante dans barytine en lattes prismatiques. (LPAX4).

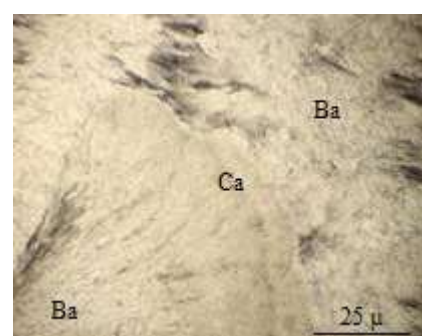


Photo V.4 Plage de calcite tardive sur fond barytique. (LPAX4).

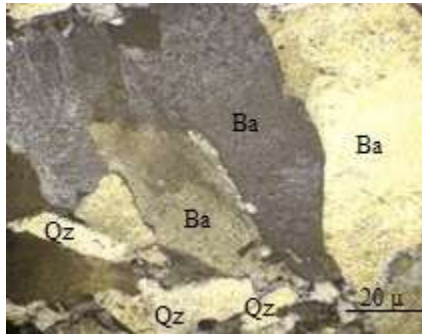


Photo V.5 Association de grains de quartz avec barytine prismatique. (LPAX4).

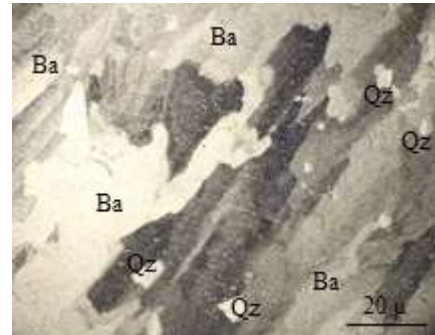


Photo V.6 Phénomène de silicification de la barytine. (LPAX4).

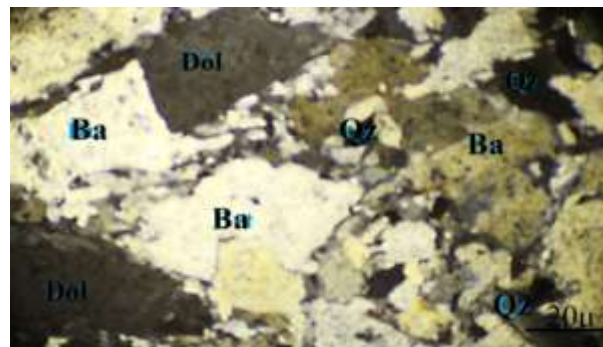


Photo V.6 Fragments de dolomite associés à la Barytine et à la Silice (LPAX4).

V.3 Les résultats de l'analyse granulométrique

Les résultats montrent l'évolution des pourcentages massiques et la teneur en Baryte dans les différentes fractions granulométriques pour le minerai brut et pour le stérile. Les résultats d'analyse granulométrique obtenus de ces échantillons concassés sont présentés dans le Tableau V.1 et la Figure V.1 pour le tout-venant, dans le Tableau V.2 et la Figure V.2 pour le stérile.

Tableau V.1 Les résultats de l'analyse granulométrique du minerai brut concassé

Tranches granulométriques (mm)		Masse pondérale en %	Rendement cumulatif de refus en %
+16		1.71	1.71
-16	+08	21.78	23.49
-08	+04	19.96	43.45
-04	+02	16.68	60.13
-02	+01	12.36	72.49
-01	+0.5	8.07	80.56
-0.5	+0.250	5.47	86.03
-0.250	+0.125	5.12	91.15
-0.125	+0.053	4.54	95.69
-0.053	+0	4.31	100
TOTALE		100	-

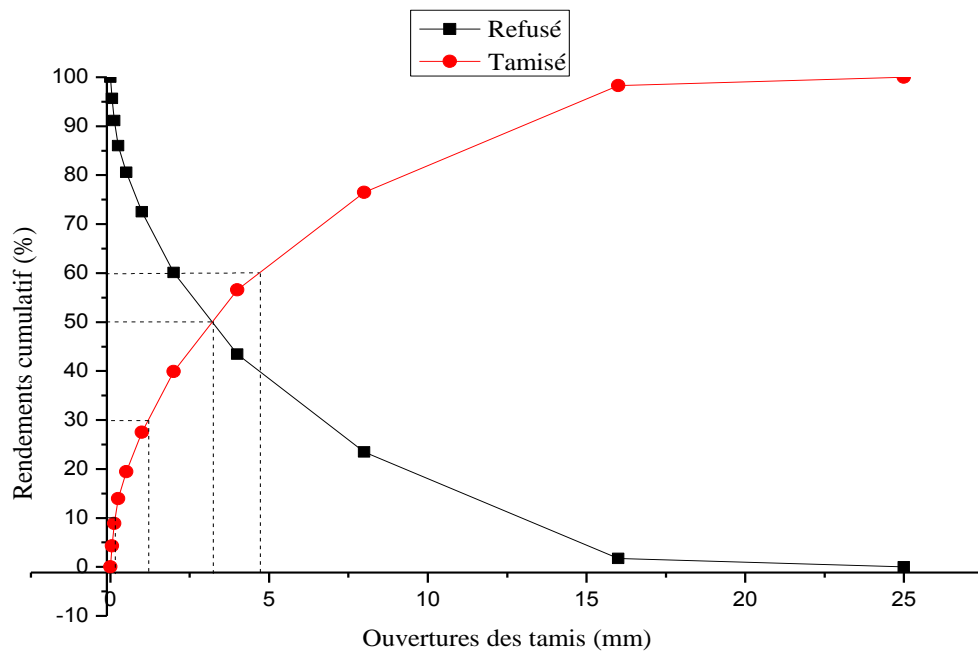


Figure V.1 La courbe granulométriques du minerai brut

Suite à la présentation de la courbe qui montre la variation des rendements en poids en fonction de la maille des tamis obtenu après tamisage, on constate que la distribution en poids des tranches granulométriques est irrégulière. On remarque aussi la prédominance de la classe supérieure (>8mm) qui peut être expliquée par la dureté élevée de certains minéraux, et précisément ceux de constituants, tels que le Quartz associé à avec la Baryte.

La courbe des passants cumulés présente une allure convexe tournée vers le haut, cela s'explique par le fait que la granulométrie est étalée; le minerai présente donc une granulométrie hétérogène, ce qui nous laisse dire que la résistance mécanique des différents composants minéralogiques de l'échantillon est très variable.

Tableau V.2 Les résultats de l'analyse granulométrique de stérile

Tranches granulométriques (mm)	Masse pondérale en %	Rendement cumulé de refus en %
+16	2.11	2.11
-16 +08	19.10	21.21
-08 +04	29.00	50.21
-04 +02	27.00	77.21
-02 +01	12.52	89.73
-01 +0.5	3.00	92.73
-0.5 +0.250	0.87	93.60
-0.250 +0.125	1.01	94.61
-0.125 +0.053	1.96	96.57
-0.053 +0	3.43	100
TOTALE	100	-

La courbe de l'analyse granulométrique des rejets est d'une forme concave donc le matériau contient plus des particules grosses que des particules fines. Elle nous montre que le refus de la tranche (+ 4 mm) constitue 51.21% du volume totale de l'échantillon de départ. Les fillers (-53 μ), ne constituaient que 3.43% de la masse totale tamisée, cela s'explique par la dureté élevée de certains minéraux de gangue tel que le Quartz.

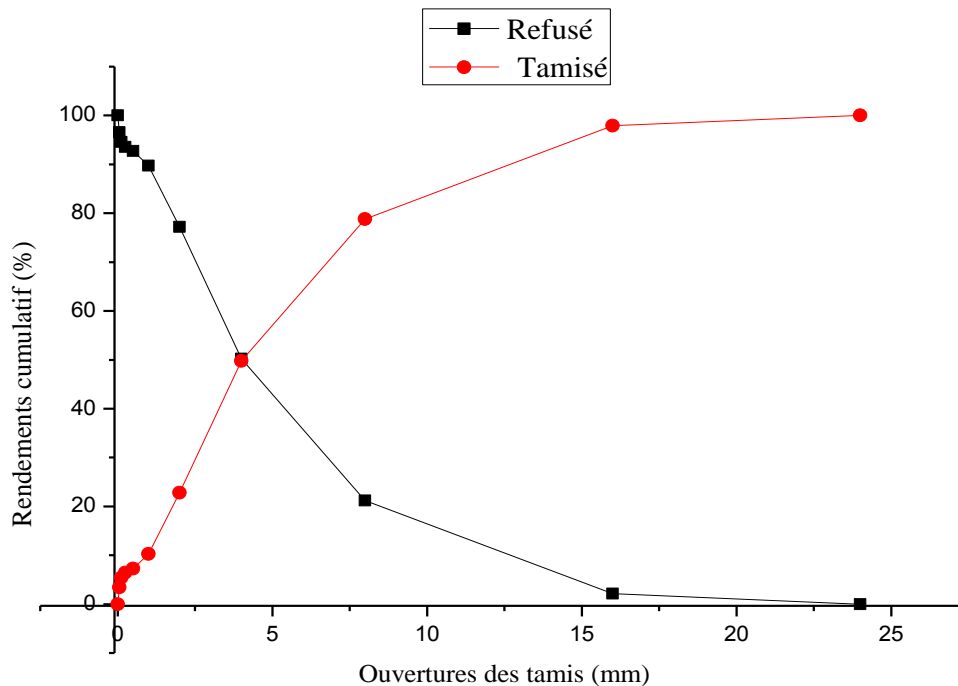


Figure V.2 Courbe granulométriques de stérile

V.4 Les résultats de l'auscultation à la loupe binoculaire

Les classes de grosseur destinées à l'observation sous loupe binoculaire sont : [-1+0.5 mm], [-0.5+0.250mm], [-0.250+0.125mm] et [-0.125+0.053mm]. Elles ont subi préalablement un lavage et séchage au four (étuve) à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

L'observation a été faite à l'aide d'une loupe binoculaire de type (CARL ZEISS, grossissement X10) au laboratoire de géologie de l'université d'Oum El Bouaghi. Cette auscultation a montré que les grains minéraux de Quartz et de Calcite sont partiellement libérés de la Barytine dans la tranche granulométrique (-500 μ m +250 μ m), alors qu'ils sont presque totalement libres dans la tranche (-250 μ m +125 μ m), (Photo V.8, Photo V.9, Photo V.10 et Photo V.11).



Photo V.8 Tranche granulométrique [-1+0.5 mm] montrant des grains minéraux de barytine associés au quartz, à la calcite et à d'autres fragments rocheux. (X10).
(Ba) : barytine, (Qz) : quartz, (Ca) : calcite, (Fr) : fragment rocheux.

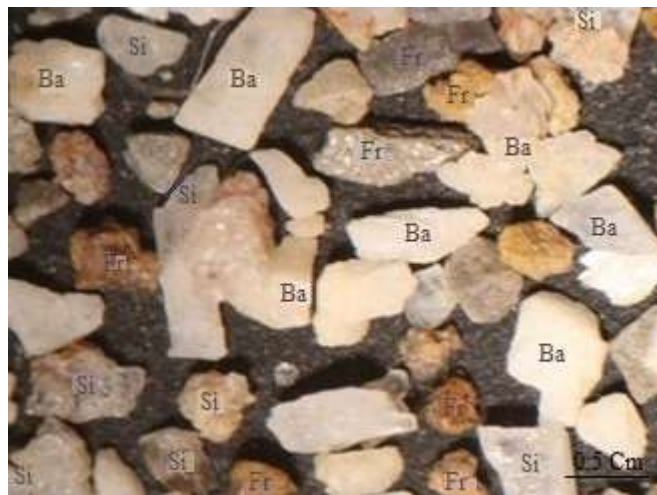


Photo V.9 Tranche granulométrique [-0.5 +0.250 mm] montrant des grains de barytine associés au quartz et à d'autres fragments rocheux. (X10).
(Ba) : barytine, (Si) : silice = quartz, (Fr) : fragment rocheux.



Photo V.10 Tranche granulométrique [-0.250 +0.125 mm] montrant également des grains de barytine associés au quartz et à d'autres fragments rocheux. (X10).
(Ba) : barytine, (Si) : silice = quartz, (Fr) : fragment rocheux.

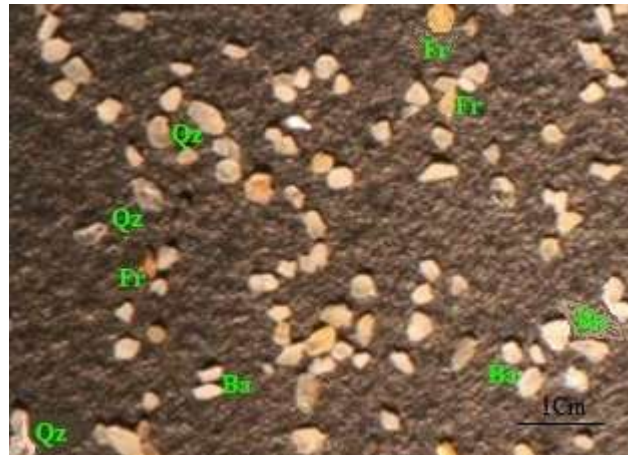


Photo V.11 Tranche granulométrique [-0.125+0.053 mm] montrant toujours des grains de barytine associés au quartz et à d'autres fragments rocheux. (X10).

(Ba) : barytine, (Qz) : quartz, (Fr) : fragment rocheux.

V.5 Les résultats des caractérisations physico-chimiques

V.5.1 Les résultats de l'analyse densimétrique

La densité est l'une des propriétés bien connue de la Barytine et lié directement à son usage dans plusieurs domaines. Cette propriété varie en fonction de la teneur en BaSO_4 . Donc l'analyse densimétrique exprime réellement les teneurs en BaSO_4 . Les résultats de ces mesures de densité sont présentés dans le Tableau V.2. On observe que la densité la plus élevée est celle de [-0.250 +0.125] ce qui montre une teneur élevé en BaSO_4 dans cette tranche

Tableau V.3 La densité en fonction des classes granulométriques du minerai brut

Tranches granulométriques (mm)	Masse pondérale en %	La densité
+16	1.71	3.43
-16 +08	21.78	3.55
-08 +04	19.96	3.60
-04 +02	16.68	3.57
-02 +01	12.36	3.64
-01 +0.5	8.07	3.65
-0.5 +0.250	5.47	3.61
-0.250 +0.125	5.12	3.70
-0.125 +0.053	4.54	3.24
-0.053 +0	4.31	3.13
TOTALE	100	-

V.5.2 Les résultats de la Fluorescence X (FX)

Les analyses chimiques réalisées ont permis de déterminer les teneurs en éléments majeurs et traces de la barytine d'Ain Mimoun. Les résultats de ces analyses sur le minerai brut et le stérile sont présentés dans le Tableau V.4 et le Tableau V.5.

Tableau V.4 Les résultats de l'analyse chimique par XRF de minerai brut

Éléments	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	CuO	ZnO	SrO	BaSO ₄	PbO
Pourcentages (%)	0.97	7.97	32.50	0.04	1.51	3.90	2.20	0.03	-----	1.06	49.86	0.20

Les résultats d'analyses chimiques montrent une teneur assez élevée en baryum (49,86%). Avec la présence d'autres minéraux de gangue tel que : la Silice SiO₂ (32.50%), l'Alumine Al₂O₃ (7.97%), la Calcite (3.90%) et autres composants.

Tableau V.5 Les résultats de l'analyse chimique par XRF de stérile.

Eléments	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	CuO	ZnO	SrO	BaSO ₄	PbO
Pourcentages (%)	2.01	8.32	46.1	0.09	1.83	17.0	4.21	0.067	0.069	0.42	19.74	0.22

On observe que la Silice (SiO₂) et l'oxyde de Baryum (BaSO₄) sont les composés dominants (69.12% les deux) dans l'échantillon en outre l'Alumine (Al₂O₃) et la Calcite (CaO).

Les résultats d'analyse granulo-chimique du minerai Barytique d'Ain Mimoun sont présentés sur le Tableau V.6. Le pourcentage de la Barytine totale est de 49,86% en moyen. Le taux de Barytine est plus élevé dans les différentes grosses tranches où il peut atteindre 54%. Par contre, pour les fractions plus fines, il est moindre sauf pour la tranche de -0.250+0.125 où il est de 55.63%. De même pour la Silice où elle présente un pourcentage plus élevé dans les tranches les plus fines (jusqu'à 44 %).

Tableau V.6 Les résultats de l'analyse granulo-chimique par XRF de minerai brut

Tranches granulométriques (mm)	Na ₂ O %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	K ₂ O %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	CuO %	ZnO %	SrO %	BaSO ₄ %	PbO %	TOTAL
+16	0.23	1.80	2.30	30.58	0.20	0.40	11.9	3.26	0.08	0.03	0.80	47.00	1.42	100
-16 +08	/	0.97	4.51	30.50	0.06	0.85	6.92	2.31	0.06	0.07	1.20	52.42	0.13	100
-08 +04	/	0.66	6.78	30.15	0.04	1.47	2.82	2.09	/	0.04	1.19	54.60	0.16	100
-04 +02	0.17	0.58	7.34	30.14	0.04	1.49	2.82	2.05	/	0.04	1.18	54.00	0.15	100
-02 +01	0.47	0.69	8.14	28.70	0.06	1.59	2.77	1.92	0.05	0.04	1.07	54.31	0.19	100
-01 +0.5	0.36	0.75	8.34	28.87	0.07	1.64	2.93	2.28	/	/	1.03	53.50	0.23	100
-0.5 +0.250	/	0.74	7.80	29.53	0.07	1.53	3.60	2.79	/	0.03	0.98	52.30	0.36	100
-0.250+0.125	/	0.99	5.8	26.00	0.08	2.41	3.71	3.27	0.08	0.04	0.71	55.63	0.28	100
-0.125+0.053	0.20	0.95	12.10	43.20	0.11	2.58	4.09	3.02	0.05	0.04	0.60	32.76	0.30	100
-0.053 +0	0.18	1.00	13.40	44.00	0.10	2.87	4.03	3.50	0.07	0.04	0.59	29.90	0.32	100

V.5.3 Les résultats de la Diffraction par Rayons X (DRX)

Les diffractogrammes obtenus par la DRX pour deux échantillons (tout-venant et stérile) sont présentés dans sur les Figures V.3 et V.4. Les diffractogrammes obtenus montrent clairement une présence de la barytine avec quelques minéraux de gangue (quartz, la calcite, Dolomite... etc.). Ces résultats confirment les résultats d'analyse chimique et les observations microscopiques de nos échantillons.

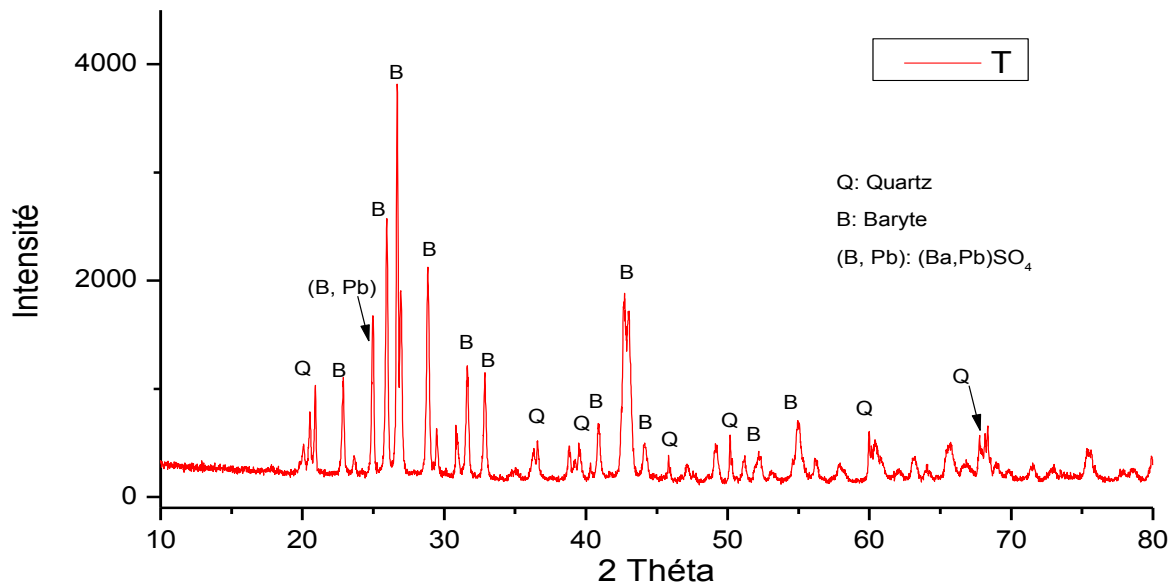


Figure V.3 Le Spectre de Diffraction par rayons X du minerai brut d'Ain Mimoun

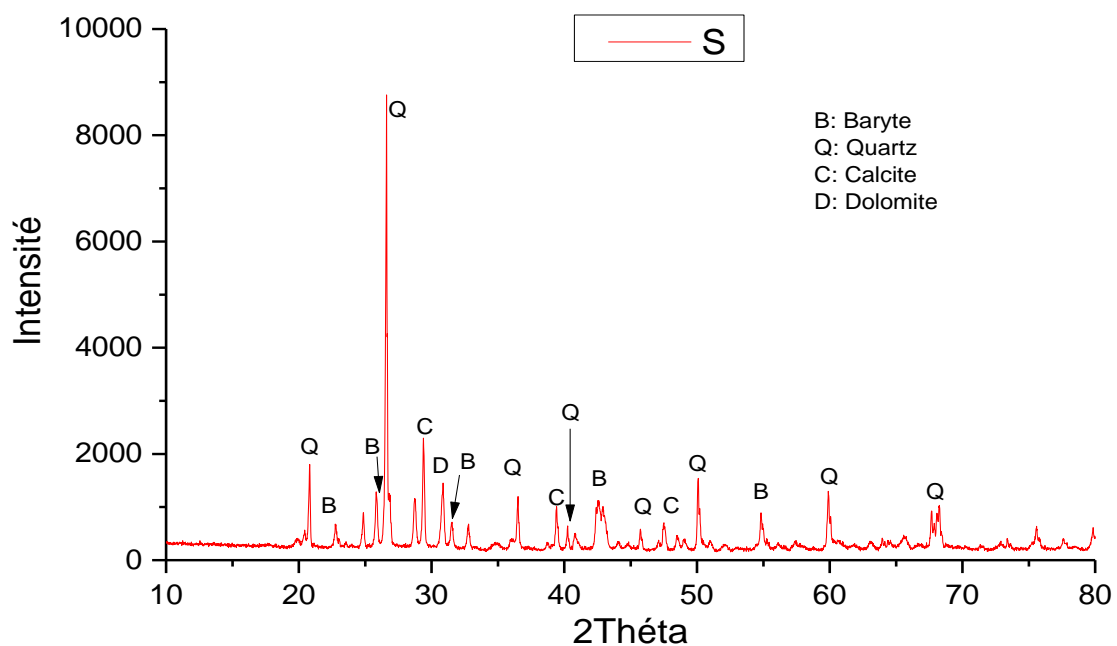


Figure V.4 Le Spectre de Diffraction par rayons X du stérile d'Ain Mimoun

V.5.4 La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Plusieurs observations sont réalisées sur l'échantillon initial d'Ain Mimoun, stérile, les résultats sont illustrés dans les Photos V.12 et V.13. Cette observation, a montré la composition à l'échelle microscopique de différents éléments tels que Ba, O, Si, Ca, Fe, Mg et Al. En ce qui concerne l'oxygène, sa présence pertinente revient au fait qu'il intervient dans la composition du BaSO_4 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et MgO .

Selon les diffractogrammes de l'EDX des deux surfaces scannées par le MEB (Figure V.5 et V.6), on observe une présence dominante de Ba, S et O se trouvant dans la composition des sulfates de Baryum BaSO_4 . La présence de Si et Ca a prouvé la présence de quartz et de calcite parmi les composants essentiels de ce minerai. Les pics de Fe, Mg et Al expliquent la présence minimale des oxydes de fer, des alumines et des oxydes de Magnésium.

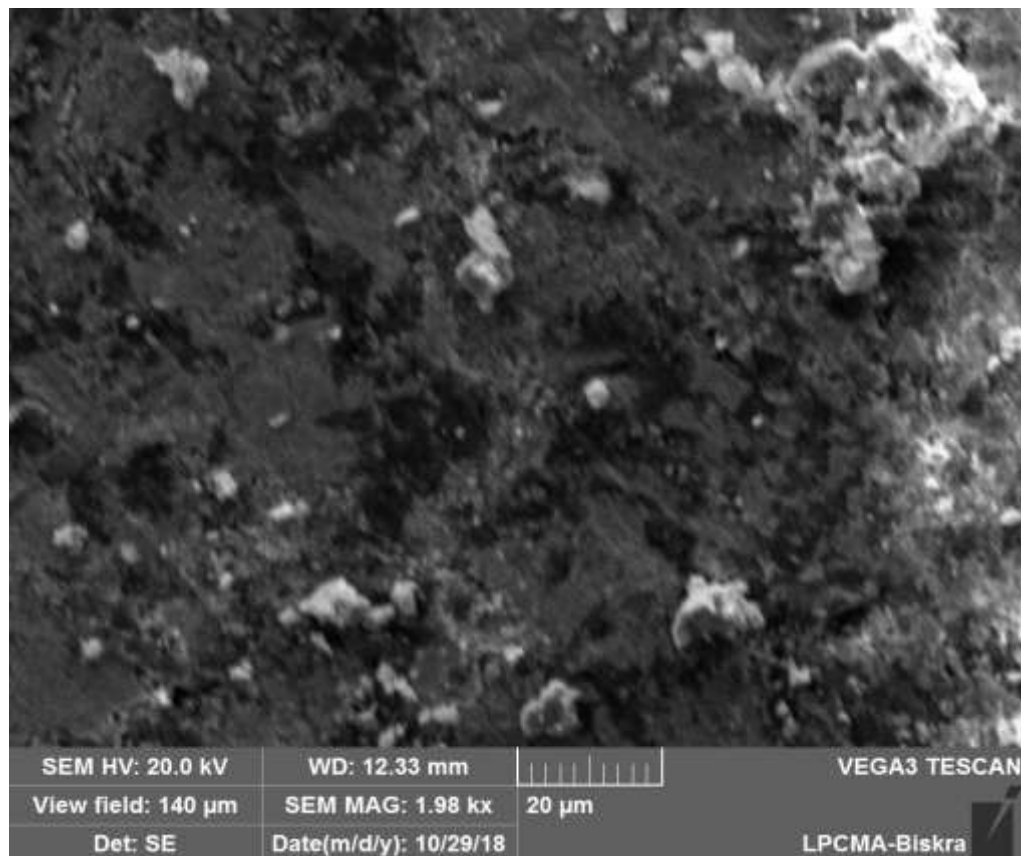


Photo V.12 L'observation du minerai brut d'Ain Mimoun par le MEB

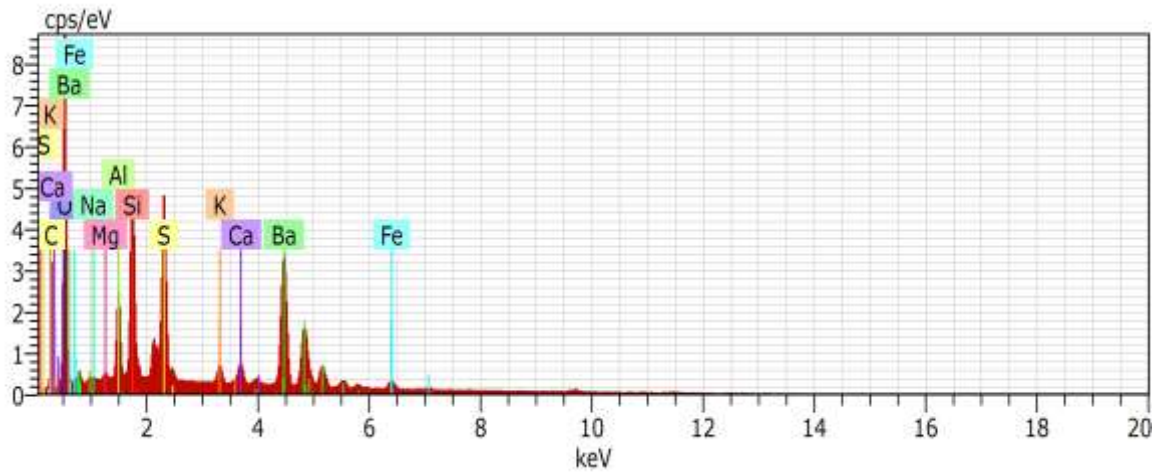


Figure V.5 Le Diffractogramme de l'analyse par EDX du minerai brut d'Ain Mimoun

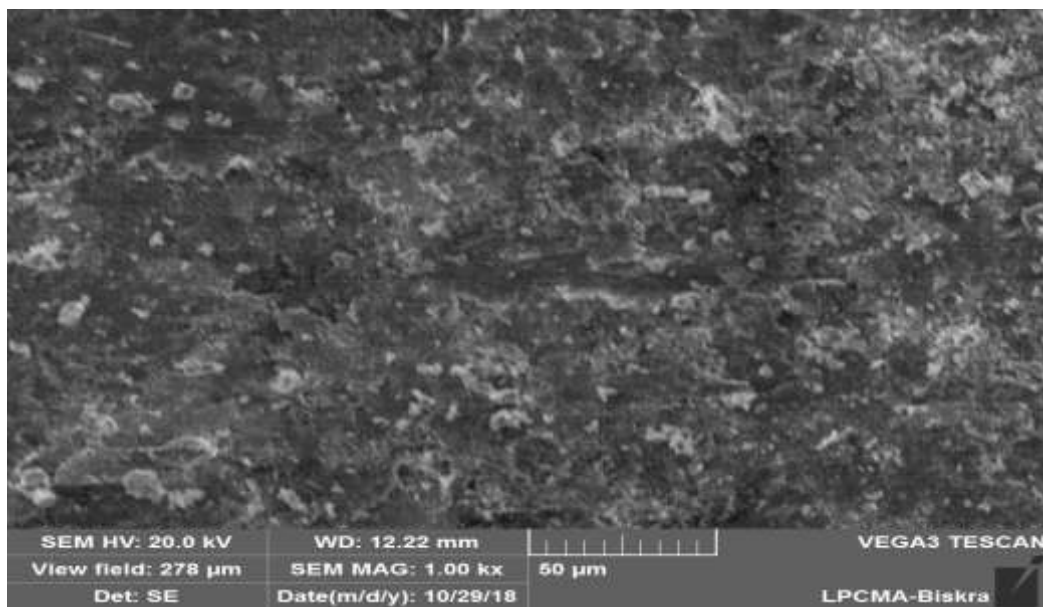


Photo V.13 L'observation du stérile d'Ain Mimoun par le MEB

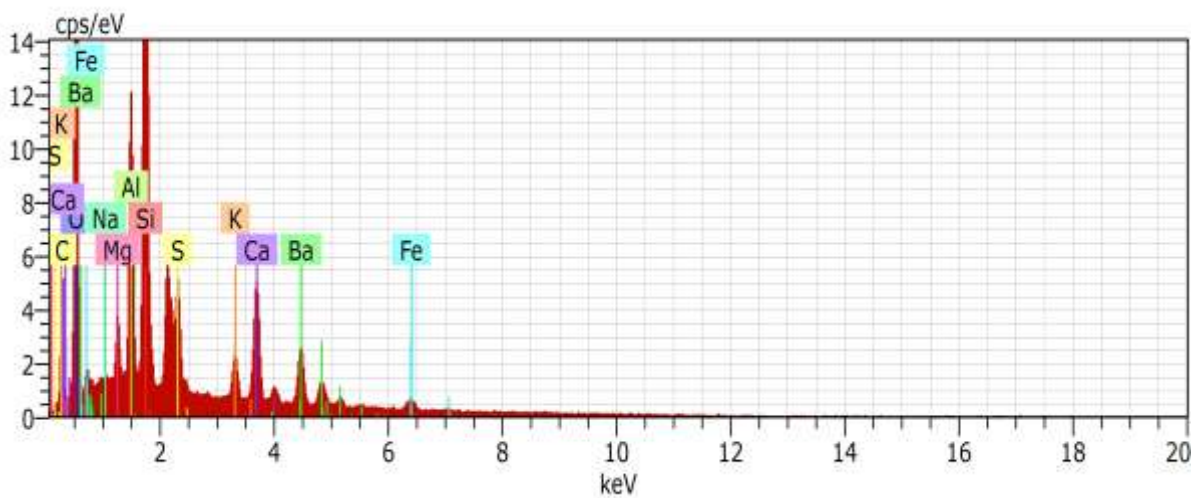


Figure V.6 Le Diffractogramme de l'analyse par EDX du stérile d'Ain Mimoun

V.5.5 Les résultats de l'Infra Rouge (IR)

La figure V.7 et La figure V.8 présentent respectivement les spectres d'absorption d'infrarouge d'un échantillon brut du minerai étudié et un échantillon de stérile. Les fréquences des bandes d'absorption caractéristiques correspondant aux vibrations normales des différents radicaux entrant dans la composition du minerai brut et de stérile étudiés qui sont représentés dans le Tableau V.7 et le Tableau V.8.

Il y a quatre modes vibrationnels fondamentaux pour le groupe des sulfates. Les vibrations caractéristiques de fréquence se produisent à 1180, 1130, 1090 et 990 cm^{-1} . Le pic à 1180 cm^{-1} est attribué à la vibration d'étirement asymétrique du groupe sulfate, 1130 cm^{-1} est attribué au mode d'étirement triple de S-O couramment trouvé dans les groupes de barytine (Janaki et Velraj, 2011), 1090 cm^{-1} est assigné à l'étirement symétrique du groupe SO_4 autant que 990 cm^{-1} est assigné à l'étirement symétrique du SO_4 tétraédrique. Les fréquences vibratoires se situent dans la gamme de 1197 et 1076 cm^{-1} rapportée par Ramaswamy et al. (2010) pour la barytine à l'exception du pic à 990 cm^{-1} qui pourrait être attribué à la différence de granulométrie de l'argile et à l'interaction du SO_4 tétraédrique et des oxydes métalliques (Al-O, Si-O etc.) présents comme impuretés dans l'argile.

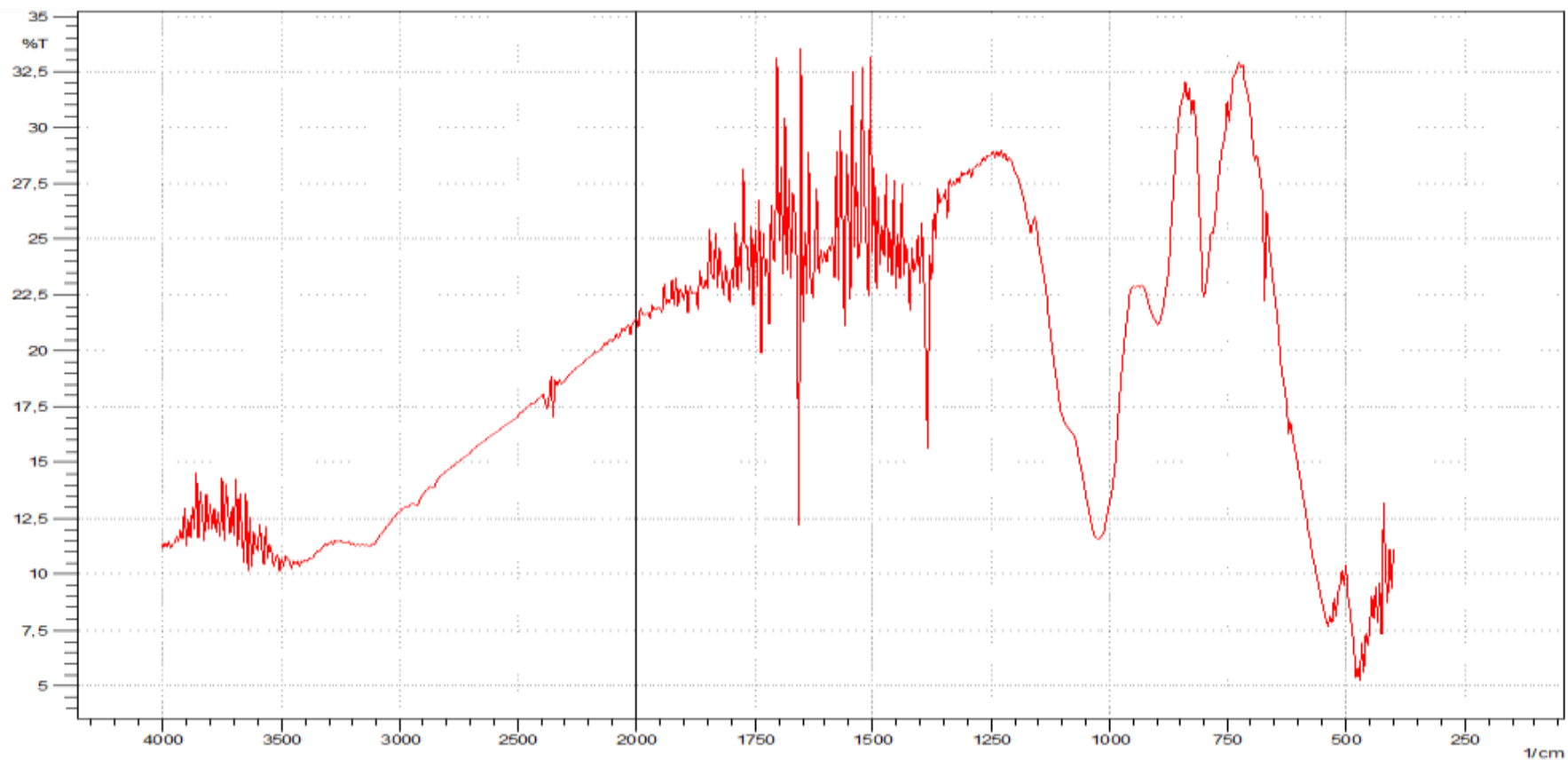
Mayer et al (2006) ont attribués le pic à 644 et 630 cm^{-1} à la vibration d'étirement octaédrique BaO_{12} dans les spectres d'échantillons de barytine exogène et endogène analysés avec un spectromètre IR. Cela correspond étroitement à 640 cm^{-1} pour l'échantillon de cette étude. Le pic à 2030 cm^{-1} est attribué aux vibrations d'étirement et de flexion Ba-S-O, ce qui suggère une «feuille» une structure pour la liaison Ba-S-O, tandis que 2000 cm^{-1} ont été rapportés par Mayer et al. (2006). Le pic à 880 cm^{-1} a été attribué à des modes symétriques d'étirement du CO_3 qui est présent dans la calcite et suggère la présence de calcite dans l'échantillon barytine en tant qu'impureté, ce qui concorde étroitement avec 874 cm^{-1} rapporté par Mayer et al. (2006).

Tableau V.7 Les positions et l'identification des bandes observées dans le spectre IR du minerai brut.

Position en cm^{-1}	Identification des bandes
3400 cm^{-1}	bande OH- (H ₂ O) d'hydratation
3100 cm^{-1}	bande OH- (H ₂ O) de cristallisation
2030 cm^{-1}	bande de vibration de Ba-S-O
1025 cm^{-1}	bande de vibration de Si-O
880 cm^{-1}	bande de construction de Co_4^{2-}
850 cm^{-1}	bande de liaison Fe-O
640 cm^{-1}	bande de vibration et de construction de Ba-S-O ₁₂
490 cm^{-1}	déformation de liaison Fe-O
440 cm^{-1}	déformation de liaison Fe-O

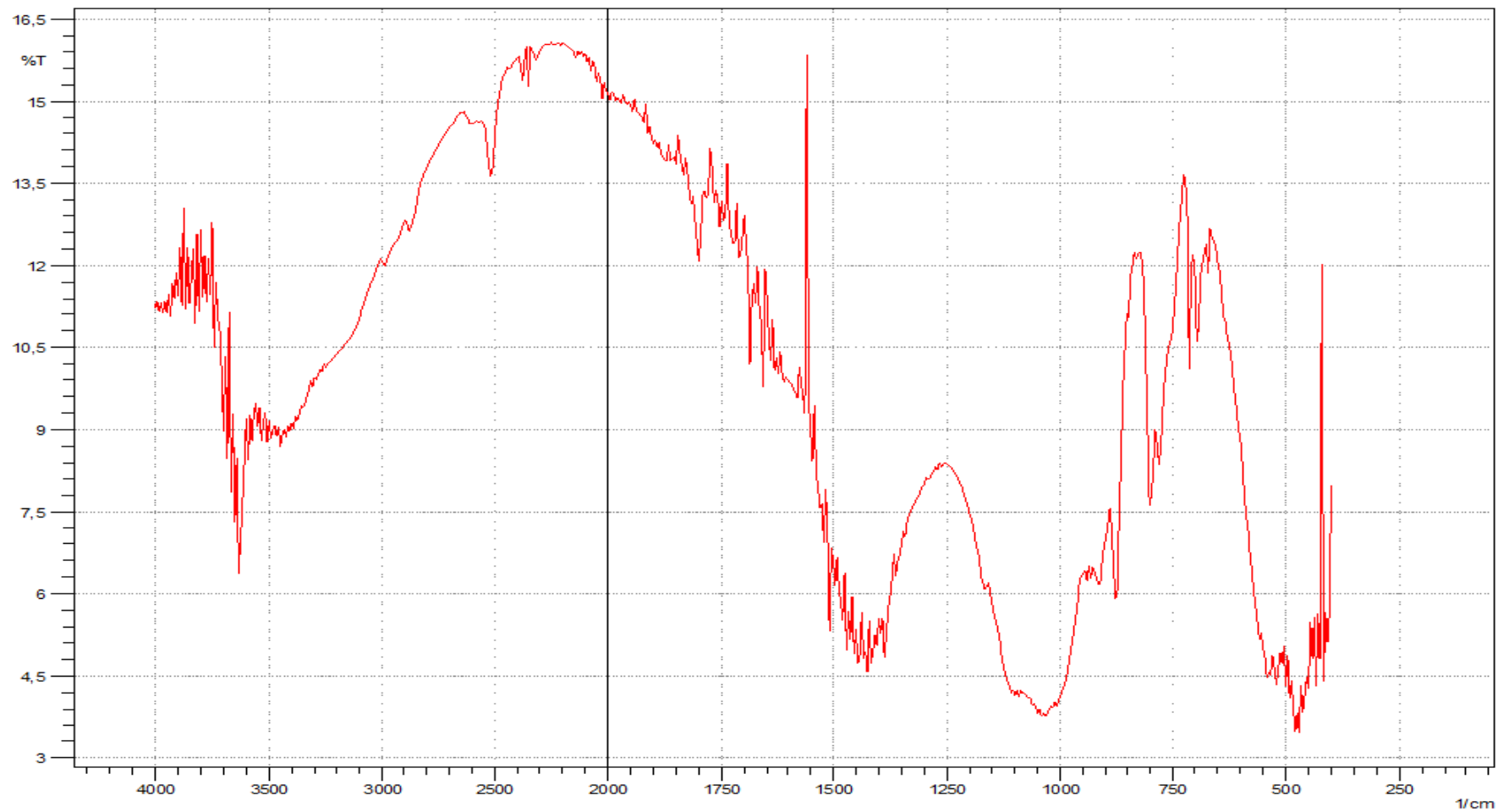
Tableau V.8 Les positions et l'identification des bandes observées dans le spectre IR de stérile.

Position en cm^{-1}	Identification des bandes
3650 cm^{-1}	bande d'eau de construction
3600 cm^{-1}	bande de OH- de construction
2030 cm^{-1}	bande de vibration de Ba-S-O
1100 cm^{-1}	bande de vibration de Si-O
850 cm^{-1}	bande de liaison Fe-O
780 cm^{-1}	bande de liaison Si-O-Al
490 cm^{-1}	déformation de liaison Fe-O



% T : Transmutante (%) 1/cm : Nombre d'onde (cm-1)

Figure V.7 Le Spectre de l'analyse par infrarouge du minerai brut



% T : Transmutante (%) 1/cm : Nombre d'onde (cm-1)

Figure V.8 Le Spectre de l'analyse par infrarouge de stérile

V.6 Conclusion

Les différentes techniques d'analyses appliquées (DRX, MEB, IR, Fx,...) ont mis en évidence une étroite relation entre les phases minéralogiques et pétrographiques d'une part, et entre la répartition granulométrique et l'évolution des teneurs chimiques d'autre part.

L'étude minéralogique des échantillons sur des lames minces avec une observation microscopique révèle l'existence d'associations minérales simples, à savoir de barytine, de la dolomite, de la calcite et du quartz.

Sur le plan granulométrique, le classement dimensionnel effectué par tamisage a révélé que la majeure partie de la masse globale des minerais bruts est représentée par la tranche granulométrique de dimensions + 8 mm : 21 % (minerai brut), et pour le stérile ont un pourcentage de 29 % aussi des fractions grosses +4 mm (stérile) qui peuvent être expliqués par la dureté élevée de certains minéraux de gangue tel que le quartz.

L'auscultation à la loupe binoculaire des tranches granulométriques a montré que les grains minéraux de quartz et de calcite sont partiellement libérés de la barytine dans la tranche granulométrique (-500 μ m +250 μ m), alors qu'ils sont presque totalement libres dans la tranche (-250 μ m +125 μ m).

Sur le plan chimique, l'analyse des échantillons a montré que le bilan matière du minerai Barytique dans l'échantillon brut à une teneur de 49.86% de BaSO₄. Ainsi, on remarque la présence excessive de quartz, d'Alumine et de calcite respectivement 32.50%, 7.97% et 3.90%. Donc, ce type de minerai de Barytine renferme principalement une gangue siliceuse et argileuse.

Les résultats d'analyse chimique du stérile d'Ain Mimoun montre qu'il y a des pertes en minéral utile d'une teneur de 19.74% en BaSO₄.

Les résultats d'analyse granulo-chimique du minerai Barytique d'Ain Mimoun ainsi que les résultats de densité de chaque tranche montre que la fraction la plus riche en BaSO₄ est de [-0.250 +0.125] ce qui confirme les résultats de l'auscultation à la loupe binoculaire alors que les grains de barytine sont bien libérés de leur gangue dans cette tranche.

Les phases minérales identifiées par diffraction des rayons X sont principalement : La Barytine, le quartz, la calcite, la dolomite ainsi que d'autres minéraux en faible quantité tels que les oxydes de fer et d'autres minéraux métalliques.

Deux observations par MEB sont faites sur l'échantillon initial d'Ain Mimoun et un autre de stérile, les résultats ont montrés la composition à l'échelle microscopique des différents éléments dans le minerai brut tels que Ba, O, S, Si, Al et Ca. Selon les diffractogrammes de l'EDX des deux échantillons, on a observé la présence de Ba, S et O ce qui prouve la composition du sulfate de Baryum $BaSO_4$. La présence de Si, Ca et Al prouve la présence de quartz et du calcite et quelques oxydes parmi les composants essentiels de la gangue stérile.

Le spectre d'absorption infrarouge des échantillons étudiés soit du minerai brut ou du stérile confirme les résultats de FX, DRX et MEB obtenu.

Chapitre VI

*Les essais d'enrichissement
par la flottation*

VI.1 Introduction

Ce chapitre comporte les essais d'enrichissement par flottation du minerai Barytique d'Ain Mimoun pour trouver la meilleure combinaison des paramètres de flottation de ce type de minerai ainsi que les réactifs utilisés suivant les résultats obtenus et leur interprétation. Dans notre travail on a utilisé la flottation directe de la barytine avec dépression de la gangue stérile composé essentiellement de la calcite et du quartz.

Suite à notre étude d'enrichissement selon les tranches granulométriques ont adopté pour les essais de flottation sur la fraction broyée $[-250 +0] \mu\text{m}$ et pour cela on a effectué plusieurs essais suivant un plan d'expérience factoriel au niveau du laboratoire des mines à l'École Nationale Polytechnique d'Alger à l'aide d'une cellule de flottation de type Denver 12.



Photo VI.1 La cellule de flottation utilisée (Denver 12)

VI.2 Les réactifs de la flottation

VI.2.1 Les types des réactifs utilisés

Le choix des réactifs de chaque famille a été fait en fonction des données de l'étude bibliographique afin de cibler les produits chimiques les plus appropriés à utiliser. Un autre point important à prendre en considération est celui de la disponibilité de ces produits chimiques. Ci-dessous un tableau résumant tous les réactifs utilisés et leur action.

Tableau VI.1 Les réactifs de flottation utilisés

Réactifs	Action
Acide oléique 9%	Collecteur de baryte
Carbonate de sodium 10%	Régulateur de milieu
Sulfate de sodium 3%	Déprimant des métaux
Silicate de sodium 3%	Déprimant de calcite et quartz
Huile de pin	Moussant

VI.2.2 La préparation des réactifs

- **La préparation des réactifs à partir des produits solides**

Il s'agit de carbonates de sodium, silicates de sodium, et le sulfate de sodium. Pour ces trois réactifs, la démarche est la même. Il faut peser 3 g de produits solide qui ont une pureté presque totale et le mettre dans un bécher de 100 ml d'eau distillée et bien agiter le mélange pour obtenir une solution à 3% de concentration.

- **La préparation des réactifs à partir des solutions concentrées**

Il s'agit dans ce cas de l'acide oléique. Pour ce dernier, il est soluble dans l'éthanol, alors la démarche consiste à mettre un peu d'éthanol dans une fiole jaugée de 100 ml et mettre ensuite 10 ml d'acide oléique concentré de concentration 0.9 g/ml puis compléter le volume de la fiole jusqu'au traits jaugé avec de l'éthanol et bien mélanger le contenu pour obtenir une solution à 9 % de concentration.



Photo VI.2 Les Réactifs de flottation utilisés

VI.3 Le mode opératoire

La cellule de flottation doit être remplie avec l'eau distillé, puis on ajoute le minerai de façon à obtenir une pulpe d'une densité d'environ 25% en solide. Les essais de flottations comprennent plusieurs paramètres qui peuvent influencer sur la qualité du concentré ou bien du produit de la cellule à savoir : la granulométrie du minerai à flotter, la densité de la pulpe, le régime des réactifs, le temps de flottation, le temps de conditionnement, le type et la consommation des réactifs. Durant ce travail, on a essayé de varier à chaque fois un paramètre sans toucher aux autres paramètres on utilisant le protocole représenté dans Figure VI.1.

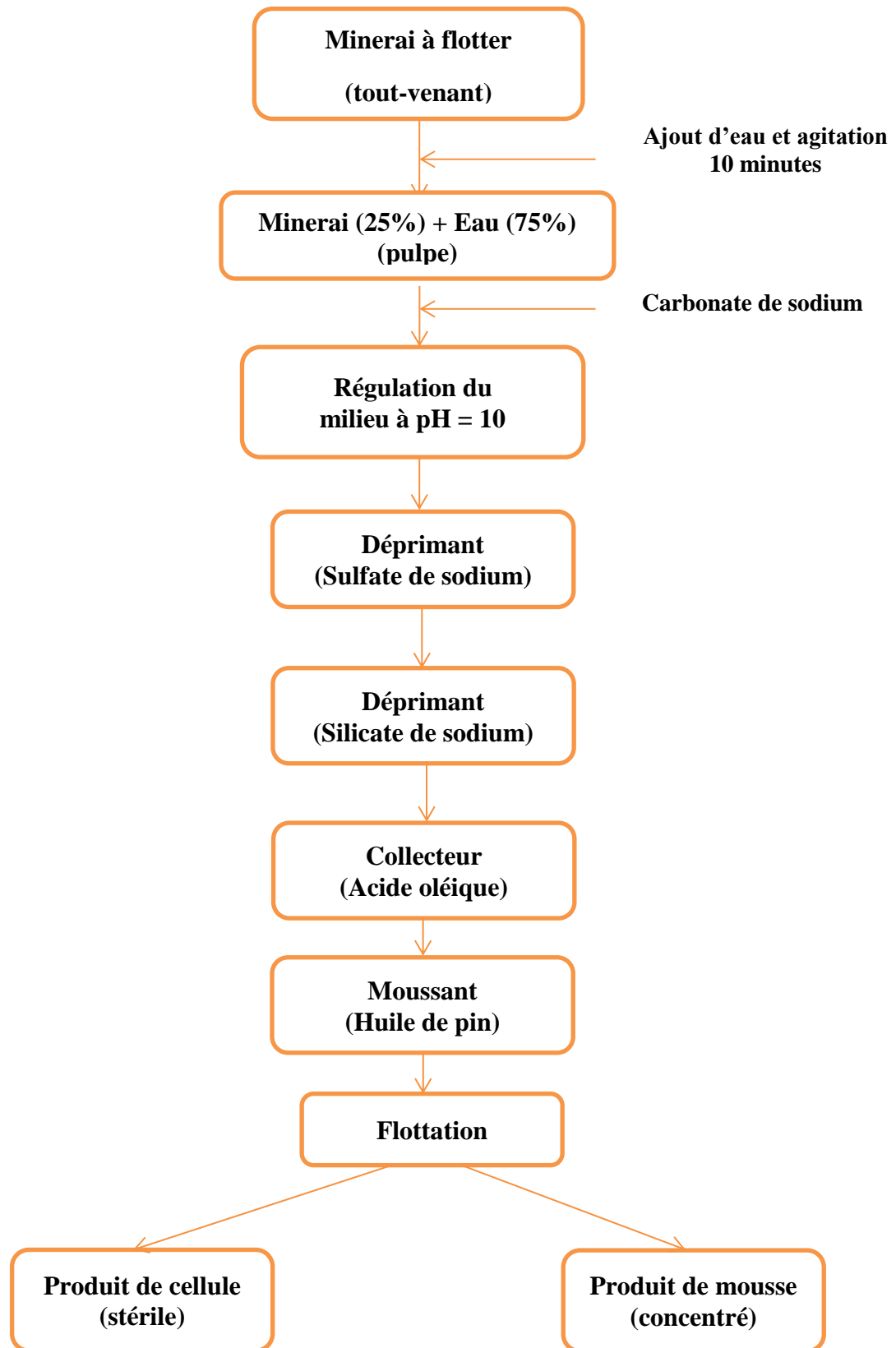


Figure VI.1 Organigramme de protocole expérimental de la flottation au laboratoire

Les deux produits obtenus après la flottation sont appelés produit de mousse (le concentré) et produit de cellule (stérile). Les deux derniers sont filtrés, séchés ensuite préparés pour l'analyse chimique afin de contrôler l'efficacité des essais de traitement. Ces analyses sont effectuées par fluorescence aux rayons X par (XRF) au laboratoire de l'unité EMRU (Elegant Materials Reserch Unity) de l'université de Farhat Abbas –Sétif 1.

VI.4 Les expériences factorielles

VI.4.1 Les données de départ

Les données de base de notre essai sont les suivant :

- Volume de la cellule : 1500 ml
- Pourcentage du solide : 25 %
- Pourcentage de liquide : 75 %
- Coefficient de remplissage : 0.75
- Le volume utilisé : 1125 ml
- Dimension des grains : [-0.250 +0 mm]
- La masse volumique du minerai à flotter : 3.41 g/cm^3

Donc : 25g solide X ml

3.41g solide 1 ml Alors que : $X = 7.33 \text{ ml}$

Donc : 25% Solide7.33 ml

75% Liquide..... 75 ml Alors que le volume total est égal à : 82.33 ml

- Le volume occupé par le solide :

On a : 25g de solide dans 82.33ml

Et X g de solide dans 1125 ml

Donc : $X = 341.61\text{g}$ alors : $V_{\text{solide}} = 341.61/3.41 = 100.17\text{ml}$

- Le volume occupé par l'eau est égale à :

$$V_{\text{eau}} = V_T - V_{\text{solide}} \text{ donc } V_{\text{eau}} = 1125 - 100.17 = 1024.83\text{ml}$$

VI.4.2 Le choix des facteurs

On a étudié l'influence de trois facteurs importants dans la flottation, qui en général sont :

- La consommation des collecteurs.
- La consommation des déprimants.
- Le temps de flottation.

Durant toutes les expériences on doit garder les autres constants (dilution de la pulpe : 25%, milieu de flottation « PH : 10 » machine de flottation, débit d'air, agitation : 2000 tr/minute, dimension des grains : < 250 µm, ...etc.) et on ne change qu'un seul facteur à la fois parmi les trois facteurs choisis.

Tableau VI.2 La Variation des facteurs étudiés

Facteur étudiés	symbole	Valeurs		Valeurs de base
		Niveau haut (+)	Niveau bas (-)	
Collecteur	A	400 g/t	200 g/t	300 g/t
Déprimant	B	340 g/t	140 g/t	240 g/t
Temps de flottation	C	3 minutes	1 minute	2 minutes

Le plan factoriel des expériences est un plan factoriel complet, le nombre d'expériences en relation avec le nombre de facteurs est déterminé par la formule suivante :

$$n=q^k \dots\dots\dots(VI-6)$$

- N : nombre d'expérimentations
- Q : nombre de niveau de chaque facteur (2) $n = 2^3=8$ expériences
- K : nombre de facteur(3)

VI.5 Résultats et discussions

Les résultats des expériences sont représentés dans le tableau ci-dessous

Tableau VI.3 Les expériences factorielles et résultats

Expériences	Facteurs			Résultats		
	(A)	(B)	(C)	Teneur en BaSO ₄ βc (%)	Rendement γc(%)	Extraction ξc (%)
1	+	+	+	65.80	72.40	95.54
2	-	+	+	68.60	71.00	97.70
3	+	-	+	68.80	70.00	96.60
4	-	-	+	65.00	51.43	67.10
5	+	+	-	70.00	52.00	73.00
6	-	+	-	66.30	53.52	71.16
7	+	-	-	66.20	54.60	72.50
8	-	-	-	66.00	51.00	67.50

- β_c (%) : Teneur en BaSO_4 dans le concentré de chaque expérience est déterminé d'après les résultats des analyses chimiques.
- γ_c (%) : Rendement du concentré obtenu de chaque expérience.
- ξ_c (%) : Degré d'extraction du concentré de chaque expérience calculé par la formule : $\xi_c = \frac{\beta_c \times \gamma_c}{\beta_i}$ avec β_i : la teneur en BaSO_4 dans l'échantillon initial (49.86%).

On peut remarquer d'après le Tableau VI.3, que certaines consommations de réactifs et des Temps de flottation déterminent des récupérations et des rendements élevés de barytine mais avec des concentrés de qualité insuffisante. Alors que ces valeurs ne permettent pas une bonne dépression des minéraux de gangue, cela nous donne de faibles teneurs en BaSO_4 mais des rendements de poids et des récupérations élevées. Tandis que d'autres paramètres nous permettent d'obtenir des concentrés avec des teneurs en BaSO_4 plus élevés mais toujours insuffisantes et avec de faibles rendements et récupérations lorsqu'on augmente la consommation des collecteurs et des déprimant avec la réduction du temps de flottation.

- **Les équations de régression**

La régression linéaire multiple est une méthode d'analyse des données quantitatives. Elle a pour but de rendre évidente la relation entre une variable dite expliquée, qui est notée Y et de nombreuses autres variables dites explicatives notées X_1, X_2, \dots, X_k .

Les variables $X_i, i=1, \dots, k$ peuvent être soit aléatoire, soit contrôlables, ce qui signifie qu'elles sont connues sans erreur. Dans ce qui suit, nous supposons que les variables $X_i, i=1, \dots, k$ sont contrôlables. Nous nous intéressons au modèle linéaire, ce qui signifie au niveau des modèles de type: $Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_k X_k$. où $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$. Où les nombres réels sont appelés coefficients de modèle (Bouzenzana Abdellali.2007).

Calcul de la valeur moyenne pour chaque indice :

$$\vartheta_\gamma = \sum \gamma_i / 8 = 425,95 / 8 = 53,24 = a_0 \dots\dots\dots(\text{VI-7})$$

$$\vartheta_\beta = \sum \beta_i / 8 = 536,7 / 8 = 67,08 = b_0 \dots\dots\dots(\text{VI-8})$$

$$\vartheta_\xi = \sum \xi_i / 8 = 641,1 / 8 = 80,13 = c_0 \dots\dots\dots(\text{VI-9})$$

- **Calcul des coefficients de correction pour chaque facteur**

Pour le collecteur : $K_Y = 2,75$, $K_\beta = 0,61$ et $K_\xi = 4,27$ (VI-10)

Pour le déprimant : $K_Y = 2,73$, $K_\beta = 0,58$ et $K_\xi = 4,21$ (VI-11)

Pour le temps de flottation : $K_Y = 6,71$, $K_\beta = - 0,03$ et $K_\xi = 9,1$ (VI-12)

- **Les équations de régression**

$$Y = a_0 + 2,75 X_1 + 2,73 X_2 + 6,71 X_3 \text{(VI-13)}$$

$$\beta = b_0 + 0,61 X_1 + 0,58 X_2 - 0,03 X_3 \text{(VI-14)}$$

$$\xi = c_0 + 4,27 X_1 + 4,21 X_2 + 9,1 X_3 \text{(VI-15)}$$

C'est à dire

$$Y = 53,24 + 2,75 X_1 + 2,73 X_2 + 6,71 X_3$$

$$\beta = 67,08 + 0,61 X_1 + 0,58 X_2 - 0,03 X_3$$

$$\xi = 80,13 + 4,27 X_1 + 4,21 X_2 + 9,1 X_3$$

- **Les explications des courbes de régression**

Les courbes de régression nous permettront d'optimiser le procédé de flottation. Le but de cette étude est le traitement du minerai brut, en vue d'améliorer sa qualité, donc on s'occupe des indices qualitatifs qui sont : la teneur β et le degré l'extraction ξ en %.

- $\beta = 67,08 + 0,61 X_1 + 0,58 X_2 - 0,03 X_3$ (VI-16)

- $\xi = 80,13 + 4,27 X_1 + 4,21 X_2 + 9,1 X_3$ (VI-17)

Les commentaires

- **X1** : si on fait augmenter la valeur de X1 (Collecteur) d'un pas (100 g/t) la teneur β sera améliorée avec 0,61 % et le degré d'extraction ξ avec 4,27 %.
- **X2** : si on fait augmenter la valeur de X2 (Déprimant) d'un pas (100 g/t) la teneur β sera augmentée avec 0,58% et le degré d'extraction ξ avec 4,27%.
- **X3** : si on fait diminuer X3 (Temps de flottation) d'un pas (1 minute) la teneur β sera diminuée avec 0,03%. Et si on fait augmenter X3 d'un pas le degré d'extraction sera augmenté avec 9,1 %.

De cette manière on arrive à optimiser le procédé de flottation ; en agissant sur les facteurs étudiés.

VI.6 Le schéma de la flottation proposé

Les schémas d'enrichissement de la Barytine par flottation sont généralement très simples. Habituellement ils contiennent une opération principale, une de contrôle et deux à trois opérations relaveuses (Wies.A, 1991). Dans notre cas l'étude des conditions minéralogiques, chimiques du minerai barytique d'Ain Mimoun ainsi que les essais de flottation réalisés et la recherche bibliographique sur le traitement de ce type de minerai, nous conduisent à proposer un schéma technologique pour enrichir la barytine d'Ain Mimoun.

Il est insuffisant d'utiliser une seule opération de flottation pour l'obtention d'un concentré de haute qualité ce qui nécessite d'ajouter d'autres opérations de flottation relaveuse et de contrôle. Le schéma de flottation proposé comprend une flottation principale, deux stades de flottation de contrôle et trois stades de flottation relaveuse. Lors de la flottation principale on obtient un concentré non conditionné et des rejets peu riches ces deux produits parfois sont soumis à d'autres opérations de flottation. La flottation du concentré de la première opération s'appelle flottation relaveuse son but est l'amélioration de la qualité du concentré. La flottation des rejets de la flottation principale s'appelle flottation de contrôle, son but est la récupération du minéral utile perdu avec les rejets et l'obtention d'un stérile final pauvre.

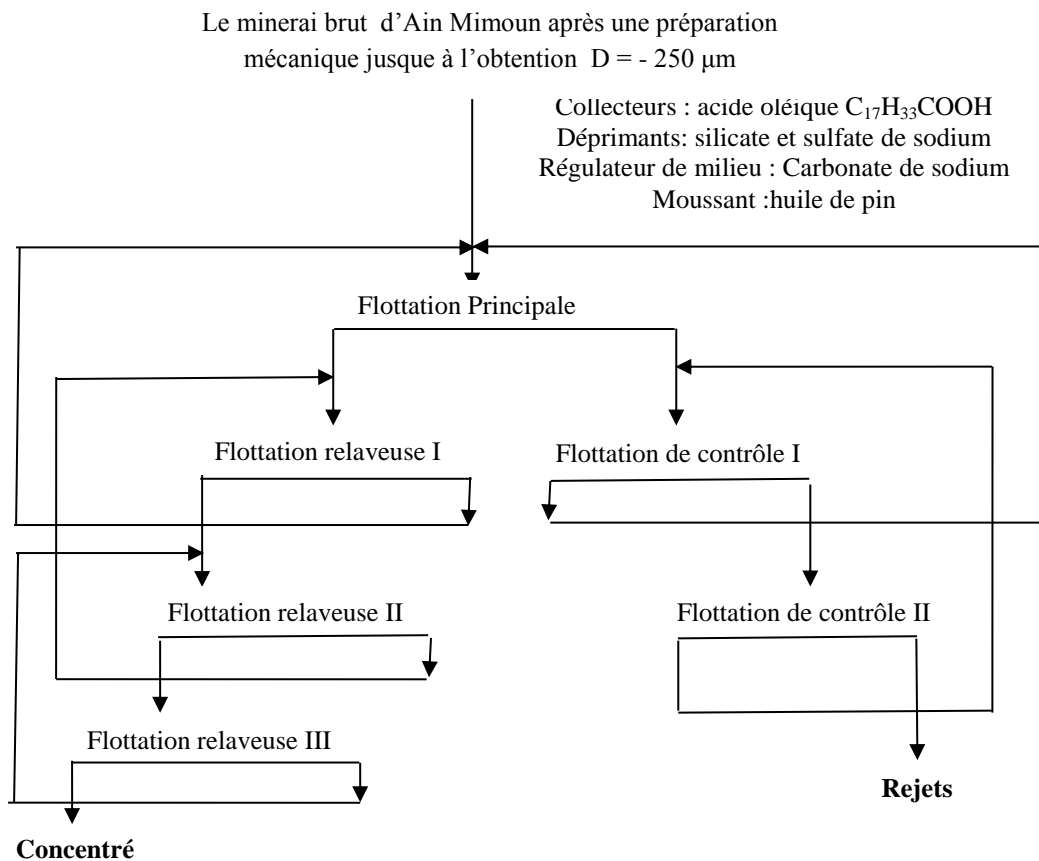


Figure VI.2 Le Schéma de la flottation proposé

VI.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué 8 essais de flottation avec une seule phase de flottation en utilisant un plan d'expérience factorielle. Le choix du nombre d'étages de la flottation a été fait suite aux résultats des essais effectués où on a remarqué un fort rendement pondéral et une bonne récupération dans une seule phase seulement de flottation mais avec une mauvaise qualité. Le schéma de flottation proposé comprend une flottation principale, deux stades de flottation de contrôle et trois stades de flottation relaveuse.

Suite aux résultats obtenus, il a été décidé d'augmenter la consommation du déprimant et du collecteur afin d'éliminer le maximum possible de stériles dans le concentré d'une part et d'augmenter le taux du minéral utile dans le concentré d'autre part. Les résultats restent toujours insuffisants et le concentré contient toujours une importante fraction d'impuretés.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

La Barytine est un minéral très important dans le domaine industriel et surtout dans l'industrie pétrolier et chimique à cause de ces différentes propriétés (densité, blancheur, absorbance des rayons ...etc.). En fonction de son usage la Barytine fait l'objet de nombreuses spécifications et normes, souvent spécifiées par l'utilisateur.

Le choix des méthodes de traitement du minerai dépend de plusieurs facteurs tels que ; type du minerai, sa composition chimique, minéralogique, sa finesse...etc. Les méthodes les plus utilisées sont la séparation gravimétrique (milieu dense, spirales, table à secousses...etc.), la séparation magnétique, la flottation, la séparation électrostatique, le traitement chimique et la bio-minéralisation. Les méthodes les plus couramment utilisées pour l'enrichissement de la Barytine sont la séparation gravimétrique (jiggage) et la flottation. Qui donne raisonnablement, de bons résultats avec l'acide oléique obtenus sur les minerais contenant de la silice sous forme de minéraux de gangue on peut déprimer cette dernière par les silicates de sodium (Na_2SiO_3) en utilisant l'huile de pin comme moussant dans un milieu de Ph basique (11 à 11.5).

Le gisement de barytine d'Ain Mimoun est un complexe filonien de type hydrothermal qui représente un potentiel minier très intéressant sur le plan économique, au vu de la quantité et de la qualité du minerai extrait. Ce gisement est abrité dans des formations géologiques d'âge Crétacé, allant du Barrémien jusqu'au Cénomaniens, coiffées par du Miocène transgressif, présentant ainsi un inventaire pétrographique riche et diversifié. Le cortège minéralogique est composé de deux catégories de minéraux, à savoir les minéraux métalliques et ceux de gangue cités précédemment (Baryte, dolomite, quartz et calcite).

La méthode d'exploitation appliquée au niveau de la mine d'Ain Mimoun est celle des sous niveaux abattus. La méthode actuelle de traitement reste faible et ne pourra pas satisfaire en quantité et qualité la demande nationale vu la structure actuelle des ateliers et le schéma technologique de traitement utilisé, ainsi que les Pertes en minéral utile dans les stériles avec une teneur en BaSO_4 20-30%.

Les différentes techniques d'analyses appliquées (DRX, MEB, IR, Fx,...) ont mis en évidence des caractérisations globales pour notre minerai.

Sur le plan chimique, l'analyse des échantillons a montré que le bilan matière du minerai Barytique dans l'échantillon brut a une teneur de 49.86% en BaSO₄. Ainsi, on remarque la présence excessive de quartz, d'Alumine et de calcite respectivement 32.50%, 7.97% et 3.90%. Donc, ce type de minerai de Barytine renferme principalement une gangue siliceuse et argileuse.

Les résultats d'analyse granulo-chimique du minerai Barytique d'Ain Mimoun ainsi que les résultats de densité de chaque tranche montre que la fraction la plus riche en BaSO₄ est de [-0.250 +0.125] ce qui confirme les résultats de l'auscultation à la loupe binoculaire alors que les grains de barytine sont bien libérés de leur gangue dans cette tranche.

Une flottation directe de la baryte a été proposée suivie par deux stades de flottation de contrôle et trois stades de flottation relaveuse. En utilisant l'acide oléique comme collecteur, sulfate et silicate de sodium comme déprimants, l'huile de pin comme moussant et dans un milieu basique avec un Ph de 10.

La flottation dépend de plusieurs paramètres dont chacun peut être objet d'une recherche plus approfondie dans les travaux futurs.

Ces résultats dérivent d'une étude faite à l'échelle du laboratoire. Dans le but de passer à l'échelle industrielle, il est préférable de faire des essais d'abord à l'usine pilote afin d'étudier le dimensionnement de l'usine de traitement ainsi que son impact économique.

En guise des perspectives nous envisageons d'améliorer la qualité de concentré d'Ain Mimoun par des nouveaux procédés, par l'optimisation des paramètres expérimentaux avec un traitement et une valorisation des rejets solides et liquides, en vue de protéger l'environnement.

Par manque de moyen de caractérisation et d'enrichissement ainsi que de réactifs, nous n'avons pas pu bien étudier le traitement de la barytine d'Ain Mimoun par les autres méthodes telle que ; la flottation inverse par exemple. Il est vivement recommandé de procéder à des essais de flottation en utilisant d'autres réactifs et d'autres techniques.

Nous recommandons vivement aux responsables du département d'acquérir dans les plus brefs délais tous les équipements nécessaire pour l'enrichissement et pour la caractérisation ce qui permettra aux étudiants de master, Magister ou doctorants de l'utiliser dans les projets similaires et pour permettre aux prochains étudiants d'améliorer et de valider nos résultats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abed. S, 1986. La sédimentation deltaïque du Crétacé inférieur dans les Aurès. 6ème Sém. Sc. Terre, Alger, 1986

Abdellaoui.K, Boumaza.A, Kamoun.N, Boutaleb.A, 2019. Chemical and Physical Investigations on the barite of Ain Mimoun ore deposit Khenchela North-eastern Algeria. Journal of Advanced Research in Science and Technology, 2019, 6(1), 865-877.

Andrews, P. R. A. and Collings, R. K., 1989. Beneficiation of barite: A review of processing studies at CANMET. Mining Engineering, 457 – 461.

Albert B, et al. Effect of organic and unorganic chemicals on the flotation, non-sulphide minerals using fatty acid collector Po Obogascheniu Poleznik Iskopaemih Leningrad. ; 1968.

Alem.D 2012.confection d'une lame mince. Atelier des lames minces. Département de géologie. Université Badji Moukhtar Annaba.

Alexanian.C, Morel.P et Le Bouffant.L, 1966. – Sur les spectres d'absorption infrarouge des minéraux naturels. Bull. Soc. Fr. Cérmn., 71 : 3-38.

B

Batouche.T, Bouzzenana.A, Messai.A 2018. Beneficiation methods of barite ore in algeria.9ème congrès national de la Société Algérienne de Chimie USTHB, Alger,mai 2018.

Batouche.T, Bouzzenana.A, Zedam.R, Bourourou.M, 2019(b). Mineralogical and physico-chemical characterization of barite wastes from Ain Mimoun deposit (Khenchela,Algeria), Solid State Physics,Mineral Processing,DOI: 10.29202/nvngu/2019-3/5.

Batouche.T, Zedam.R, Bouzzenana.A, 2019(a). Description mineralogique des minéraux de gangue du gisement de barytine, d'Ain Mimoun, KHENCHELA, NE ALGERIE. Le 1er Séminaire National en Géosciences et Environnement (SGSE-2019). Tamanrasset.ALGERIE.

BALADHA.F, 2012. Revalorisation des rejets barytique issues des jigs et impacts environnementales : cas de la mine de Ain Mimoun. Mémoire de magister en mine 2011-2012

Ballais.J.L,1981. Recherches géomorphologiques dans les Aurès (Algérie). A.N.R.T.,Lille III, 2 vol. 626 p.

BARRETT.CS, 1957. « Structure des métaux » DUNOD, Paris (1957), pp.397.

Barry A. Wills, Tim Napier-Munn.2006 : An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Gravity concentration, Mineral Processing Technology. Elsevier Science & Technology Books. October 2006. ISBN: 0750644508.450P.

Basics in mineral processing. Edition 10, 2015. Metso.354 pages.

Basics in minerals processing. 2010, Metso Expect results, Edition 7.

Bhaskar Raju.G, Prabhakar.S and Subba Rao.S, 2004. Studies on the Beneficiation of Barite. International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT – 2004). La dernière modification 04 Dec 2013.p 322-330. <http://eprints.nmlindia.org/6144>.

Bittner, J. D. Hrach, F.J. Gasiorowski, S.A. Canellopoulos, L.A., Guicherd, H. 2014a. Triboelectric belt separator for beneficiation of fine minerals. *Procedia Engineering*, 83, 122 – 129.

Bittner, J. D. Flynn, K. P. Hrach, F. J. 2014b. Expanding Applications in Dry Triboelectric Separation of Minerals. XXVII International Mineral Processing Congress, 1 – 13.

Bouzenzana Abdellali.2007, Recovery and Valorisation by Flotation of Treatment Rejections to the Phosphates Case of Djebel-Onk Algeria. *Journal of applied sciences* 7(18) : 2551-2559, 2007. ISSN 1812-5654.

BRAGG .W L, 1934. MACMILLAN. New York (1934), (1), pp.18.

Brobst, D.A. 1958, Barite resources of the United States:U.S. Geological Survey Bulletin 1072–B, 130 p. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/b1072B>.

Browning JS, Rampacek C. Flotation of complex barite fluorspar ores. In: *Proceedings 7th international mineral processing congress; 1964*. pp. 221–6.

Broyeur pendulaire. 2015 <https://www.ltasa.com/broyeurs-pendulaires/>.

Bulatovic, S. M. 2015. Beneficiation of Barite Ore, *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*, 34(3), 129-141.

Bulatovic S. Flotation of barite and celestite using new reagent schemes Report of Investigation, Lakefield Research, 1987. 120 pp.

Bureau européen pour la PRIP., (2004). Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la gestion des résidus et stériles des activités minières. pp 632.

Bureau.D, 1986. Approche sédimentaire de la dynamique structurale : évolution mésozoïque et devenir orogénique de la partie septentrionale du fossé saharien. Thèse d'Etat, 441p, 2 Tomes, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, (1986).

C

Camoin.G, Bouju. J. P, Maurin. A. F, Perthuisot.V, Rouchy.J. M, 1990. Relation récifs-diapirs : l'exemple du Sénonien de la région de Khenchela. (Algérie centre - orientale). *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t VI, N°5, (1990), pp.831- 841.

Carbridge .D.E, 1956. - *J. Appl. Chem.*, 6 : 456.

Ciccu, R. Curreli, L. Giuliani, S. Manca, P. P. and Massacci, O. "Optimization of an Integrated Flowsheet for Barite Processing," in Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Johannesburg, 1987.

Chibka.N, Exploitation des gisements metalliferes, université de Annaba. Office des publications universitaires.p15

Clark, S.H.B., Gallagher, M.J., and Poole, F.G., 1990, World barite resources—A review of recent production patterns and a genetic classification: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy—Section B—Applied Earth Sciences, v. 99, p. B125–B132.

Coussy.S, 2011. Stabilisation de rejets miniers pollués à l'arsenic à l'aide de sous-produits cimentaires : étude de l'influence de la cristalochimie sur le risque de mobilisation des polluants. Thèse doctorat. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, p 373.

D

Da Luz, A.B., Baltar, C.A.M, 2005. Usos E Especificacoes, Barita. In: da Luz, A.B., Lins, F.F., eds. Usos E Especificacoes, Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministerio da Ciencia E Tecnologia, 263 – 277.

Deniz, V. 2000. Recovery of barite from BASER Co. barite processing plant slimes by using MGS. GEOSOUND Sci. Technol. Bull. Earth Sci. 36: 207-212.

Deniz. V, 2012. The effects of ball filling and ball diameter on kinetic breakage parameters. Advanced Powder Technology, 23, 640–646.

DENIZ Vedat et Taki GULER. 2018. Production of White Barite from Barite Concentrates of Shaking Tables by Bleaching Process after Magnetic Methods. <http://doi.org/10.29227/IM-2018-01-12>.

Derfouf Chems-Eddine, 2011. EFFET DE LA SOUDURE SUR LA STRUCTURE DE L'ACIER. Thèse doctorat. Université Mohamed Khieder – Biskra, p 160.

Duflos G 2014. La baryte ou barytine,2014. Association des Amis d'Allègre. Association de La Neira.p 01.

E

Estefan, 1974. Radiometric study of the adsorption of chromate ions in anionic flotation of barite and Celestine minerals. Published by Elsevier Volume 9, Issue 1, January 1974, Pages 19-22. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(74\)80004-5](https://doi.org/10.1016/0032-5910(74)80004-5).

ENOF 2015. Rapport géologique du champ minier Mizab Ain Mimoun 2015. Documentation de l'entreprise, p06.

ENOF 2018 Plan D'exploitation Mine D'Ain Mimoun 2018, 93 pages

F

Fouqué.F. 1879.Les applications modernes du microscope à la géologie. Revue des Deux Mondes tome 34.

Francis Rouessac et Annick Rouessac, 2007. Analyse Chimique, Méthodes et Techniques Instrumentales Modernes 6e Edition Dunode.

G

Gahan, C.S, Srichandan, H., Kim, D., Akcil, A., 2012. Bio hydrometallurgy and Bio mineral Processing Technology: A Review on its Past, Present and Future. Research Journal of Recent Sciences, 1(10), 85-99.

Gaine, 1973. Une méthode d'induration des échantillons de sols à l'aide de vernis : notice technique. Cahiers ORSTOM.Série Pédologie, 11 (3-4), 265-267.

Gérard GILLET.1991. Séparation magnétique. Techniques de l'Ingénieur 10 nov 1991. Réf : A5220 V1.

Ghennai.D et Elaich.N, 1993. Contribution à l'étude micropaléontologique et sédimentologique du Crétacé moyen de la région de Khenchela. Mém. Ing. 147p, USTHB, Alger, (1993).

Gilles BARBERY 1981 : Flottation, Mécanismes et réactifs. Techniques de l'Ingénieur 10 août 1981. Réf : A5350 v1.

Gosselin.A, Blackburn et Bergeron.M. 1999. Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques.

Guiraud.R, 1990. Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du Bassin du Hodna et des régions voisines. Publ. Office National de la Géologie, Mémoires N°3, (1990), pp. 1-259, 10 pl.

Güven, Ö., Çelik, M. S., Drelich, J. W. (2015). Flotation of methylated roughened glass particles and analysis of particle bubble energy barrier. Minerals Engineering, 79, 125-132.

Grigorova, I. L., Dzhamyarov, S. D., Nishkov, I. M. (2014). Tailings Characterization of "Chelopezene" Tailings Pond, Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies, 8, 778 – 785.

H

Hadjiev.A., Peter Hadjiev, Rashko Georgiev. 2000, Flotation of barite from complex iron ore. International Symposium On Processing Of Fines (Prof-2000), Nml Jamshedpur, India, 2000.P222-230.

HANK.V. et GENZEL.Ch, 1997. «Structural and Residual Stress Analysis by Non destructive Methods», Elsevier (1997), pp.435.

Herkat.M, 2005.Analyse quantitative des bioassociations et caractérisation des cortèges sédimentaires et des ensembles paléogéographiques des séries du Cénomano- Turonien des Aurès et du Tell oriental (Algérie). Bull. Soc. Géol. France, t 176, No 2, (2005), pp. 183-190.

Herkat.M, 1992. Manifestations diapiriques du Trias dans les séries du Crétacé supérieur de l'Atlas Saharien et des Aurès. Bull. Serv. Géol. Algérie, vol.3, N°1, 199, (1992), pp.15-27.

Hicyilmaz C, Ghaemi M. The effect of inorganic agents on the flotation of barite and fluorite Changing Scope of Mineral Processing; 1996. Rotterdam Conference.

I

Ibisi.M.I, 1991 : Characterization and upgrading of a Nigerian barite sand, BOL.SOC.ESP.CERAM.VIDR. 30 (1991) 2, 101-103.

IUPAC 2018 : www.iupac.org. Periodic Table of the Elements. 1 December 2018. International Union of Pure and Applied Chemistry. 2018 IUPAC.

J

Jakabsky.S, Karoli.A, Hredzak.S, Lovas.M, Znamenackova.I. (2010). Possibilities of Processing and Utilization of Tailings from the Settling Pit nearby the Rudnany Village (Eastern Slovakia), 42, 305 – 308.

Janaki et Velraj, 2011. Spectroscopic studies of some fired clay artificats recently excavated at Tittagudi in Talmilnadu, Recent Research in Science and Technology 3(3) 89-91.

Jean-LouisVignes et all....,2016.SULFATE DE BARYUM,

<http://www.societechimique de france>.

Johnson,C.A, Piatak, N.M., and Miller, M.M, 2017, Barite (Barium), chap. D of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. D1– D18, <https://doi.org/10.3133/pp1802D>.

K

Kolawole.F.O, Bergerman.M.G, Ulsen.C et Kolawole.S.K, 2019. A global review of barite beneficiation processes: a case study of azara barite ores in nigeria. Nigerian Journal of Engineering. Vol. 26, No. 1, April 2019.ISSN: 0794 – 4756.

Kecir.M,1993. Etude générale de la flottation différentielle Barytine-Fluorine. Mines et carrière. Décembre 1993.ISSN 0999-5714.P47-55.

Kecir.M et Botula.J, 2015. Optimisation of barite flotation parameters. October 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1579.0807.

Kecir.M et Kecir.A, 2015. Selective Flotation of Barite and Associated Minerals: A Comparative Study. Inżynieria Mineralna. 2015. Journal of the Polish Mineral Engineering Society.P117-124

Khomsis.S, Bédir.M, Soussi.M, Ghazi Ben Jemia.M, Ben Ismail Lattrache.K, 2006. Mise en évidence en subsurface d'événements compressifs Eocène moyen-supérieur en Tunisie orientale (Sahel) : Généralité de la phase Atlasique en Afrique du Nord. Comptes rendus des Geosciences. Paris, t 338, (2006), pp. 41-49.

L

Laffitte.R, 1939. Etude géologique des Aurès. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 484 p, 2ème série, N° 15, Alger. (1939), pp.175-451.

Larachi.N, Bali.A, Ould Hamou.M, Bensaadi.S, 2019. Recovery of lead and barite from the abandoned Ichmoul mine wastes in Algeria. Environmental Earth Sciences (2019) 78:601. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8593-5>

Lessard.L, 1955. Faciès béchiques dans le Crétacé supérieur et âge des premières manifestations diapiriques du Trias près de Khenchela. Publ. Serv. Carte géol. Algérie. N°5,Alger. (1955), pp.379-390.

Leach D. L. et Sangster D.F. (1993): Mississippi Valley type lead-Zinc deposits. In: Kirkham R.V., Sinclair W.D., Thorpe R.I. and Duke J.M. (Eds). Mineral deposit modelling.Geological Association of Canada Special Paper, 40, pp. 289-314.

Leach D. L., Viets J. G. et Powell J. W. (1996): Textures of ores from the Silesian- Cracow Zinc-Lead deposits, Poland: Clues to the ore-forming environment. Pr. Panstw. Inst. Geol.CLIV, 1996. pp. 37 – 50. (With 4 figures and 11 plates).

Leach D. L., Apodaca L. E., Repetski J. E., Powell J. W. et Rowan E. L. (1997): Evidence for Hot Mississippi Valley – Type Brines in the Reelfoot Rift Complex, South– Central United States, in Late Pennsylvanian– Early Permian. U.S. Geological Survey professional paper 1577. U.S.G.P.O., Washington, 1997, p24.

Leach D. L., Sangster D. F., Kelley K. D., Large R. R., Garven G., Allen C. R., Gutzmer J. et Walters S. (2005): Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits: A Global Perspective. Economic Geology 100 th Anniversary Volume, pp. 561– 607.

Lottermoser, B. G. (2007). Mine Wastes Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 3rd ed., Springer, New York, 6 P.

M

Maglione.G et Carn.M, 1975. Spectres Infrarouges Des Minéraux Salins Dans Le Bassin Tchadien. Cah. Orstom, Sér. Géol., Vol. Vii, No 1, 1975: 3-9

Marinakos, K. I., Shergold, H. L. (1985). The mechanism of fatty acid adsorption in the presence of fluorite, calcite and barite. *International of Mineral Processing*, 14, 161-176.

Matías.M, Salvarredy.A. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique, en vue de l'obtention du Doctorat de l'université de TOULOUSE, pp 489.

Mackenzie A. F. Et Dawsonz J. E, 1961.The Preparation And Study Of Thin Sections Of Wet Organic Soils Materials.<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1961.tb00904.x>

Manouchehri, H. R., Rao, K. H., & Forssberg, K. S. E. (2000). Review of electrical separation methods. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 17(1), 23-36.

Marteau.P, Colin S et Vincines B 2014. Mémento Barytine rapport BRGM/RP-63974 .Nouembre 2014. p13.

Marteau.P 2014.Barytine Fiche détaillées, Novembre 2014 p01.

Mayer.D, Gerard.P et Michel.G , 2006. Spectroscopic studies of barite from the kremikovtzi deposit (Bulgaria) with implication for its origin, *Annales Géologiques De La Péninsule Balkanique* (67) 101-108.

MESSAIA, 2019 Contribution a l'étude d'une valorisation des minerais de fer pauvres, cas de la mine de ROUINA –AIN DEFLA.Thèse de doctorat LMD en Mines et Environnement. Université Badji Mokhtar Annaba.122 pages.

MEM 2017 : Les Potentialités Minières. La Baryte. MEM ; Ministère de l'industrie et des mines site officiel 2017.

Mgbemere.H.E, Obidiegwu.E.O et Obareki.E, 2018, Beneficiation of azara barite ore using a combination of jigging, froth flotation and leaching. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)*Vol.37,No.4,October 2018, pp. 957 – 962. <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v37i4.14>

Molaei, N., Razavi, H., Chelgani, S. C. (2017). Designing different beneficiation techniques by Taguchi method for upgrading Mehdi-Abad white barite ore, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1 – 5.

MOUSSAOULE, 2015. Essais de valorisation du minerai Plombo-barytique du gisement d'Ichemoul (W. Batna) par flottation. Thèse de Magistère en génie minier,ENP ALGER.114 p

MOUSSACEB.K, 2007. optimisation du système de gestion de l'homogénéisation du cru et du processus technologique de fabrication de ciment dans le système carrière usine de fabrication, application aux cimenteries algériennes, thèse doctorat 2007.

MINERALURGIE. 2015 : <http://www.mineralinfo.fr/>Mineral Info. Le Portail Français Des Ressources Minérales Non Energétiques.

O

Oladapo, M. I., Adeoye-Oladapo, O. O. (2011). Geophysical investigation of barite deposit in Tunga, Northeastern Nigeria. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(20), 4760-4774.

Ovtcharov.V et Khassiev.T,1986. MINERALURGIE. Flottation égouttage technologies. Université de ANNABA -1986.

Ozkan, A., Aydogan, S., Yekeler, M. (2005). Critical solution surface tension for oil agglomeration. *International Journal of Mineral Processing*, 76, 83 – 91.

Ozbas, K. E., Hicyilmaz, C. (1994). Concentration of Barite and Fluorite Materials of Eskisehir-Beylikahir District. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 28, 65-74.

P

Parsonage.P. (1988). Principles of mineral separation by selective magnetic coating. *International Journal of Mineral Processing*, 24, 269-293.

Pearse.M.J, 2005. An overview of the use of chemical reagents in mineral processing. *Minerals Engineering* 18 (2005) 139–149.

Pierre.B, Robert.J. 2012a : Concentration par gravité Principes, Techniques de l'Ingénieur 04/03/2012. Réf : J 3 190.

Pierre.B, Robert.J. 2012b : Concentration par gravité Différentes technologies, Techniques de l'Ingénieur 04/03/2012. Réf : J 3 191.

Pierre.B, El-Aïd. J, 2012. Fragmentation Technologie. Techniques de l'Ingénieur. A 5 060-A5 080

Pradip et Rai, B. (2003). Molecular modeling and rational design of flotation reagents. *International Journal of Mineral Processing*, 72, 95 – 110.

R

Raju, G. B, Ratchambigai. S, Rao. M. A, Vasumathi. N, Kumar. T. V. V, Prabhakar. S, Rao. S. S, 2016. Beneficiation of Barite Dumps by Flotation Column; Lab-Scale Studies to Commercial Production. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(1), 75–81.

Ramaswamy.V, Vimalathithan.M R et Ponnusamy.V, 2010. Synthesis of well dispersed, elliptical shaped Barium sulphate nano particles water-chloroform mixed solvent. *Archives of Physics Research* 1(4) 217-226.

Ripley, E. A., Redmann, R. E., Crowder, A. A. (1996). Environmental effects of mining. St Lucie Press, Delray Beach, Florida, USA.

Roskill Information Services, Ltd., 2006, The economics of barytes, 10th ed.: London, United Kingdom, Roskill Information Services, Ltd., 254 p.

Robert.H, Robert.J. 2012 : Concentration gravimétrique, Techniques de l'Ingénieur 04/03/2012. Réf : A 5 190

Robert.G 2019 . Completion and extension of the periodic table of elements beyond uranium. C.R.Physique 2019, <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.12.006>

S

Sadowski, Z. (1992). The influence of sodium lignin sulfonate on the adsorption of sodium dodecyl sulfate on salt-type mineral surfaces. Minerals Engineering, 5, 421 – 428.

Sally. J et Suzette M. Kimball 2017, USGS; United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, janvier 2017.p31.

Scogings A. 2018. Barite - Density. Oilfield Minerals & Markets Forum, Houston 8 May 2018.

Shaikh, A. M. H., Banerjee, S.S., Dixit, S.G. (1994). Use of magnetic surfactants in the high gradient magnetic separation of essentially nonmagnetic calcite and barite. Separation Technology 4, 174 – 179.

Slaczke, A. (1987). Effects of an Ultrasonic Field on the Flotation Selectively of Barite from a Barite-Fluorite-Quartz Ore. International Journal of Mineral Processing, 20, 193 – 210.

Sonmez, I., Cebeci, Y. (2003). A Study on spherical oil agglomeration of barite suspensions, International Journal of Mineral Processing 71, 219–232.

Sokić, M., Matković, V., Marković, B., Manojlović, V., Štrbac, N., Živković, D., Kamberović, Z. (2016). Complex Sulphide-Barite Ore Leaching in Ferric Chloride Solution. Metallurgical and Materials Engineering 22 (2), 81-89.

Srdjan M. Bulatovic, April 2007, Handbook of Flotation Reagents Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores, Publisher : Elsevier Science &Technology Books

Somasundaran, P., Yelloji Rao, M. K. (n.d.). Reagents of Biological Origin in Metallurgy, Chapter 25, 255 – 256.

Superprof 2020 : <https://www.superprof.fr/ressources>. Yann Léguillon. Quelles sont les caractéristiques du numéro atomique 56 : le baryum ?

T

TARTE.P, 1962. - Etude des silicates par spectrométrie infrarouge. Bull. Soc. Fr. Céram., D. 553 : 13-34.Cah. ORSTOM.

Teke, E., Yekeler, M., Ulusoy, U., Canbazoglu, M. (2002). Kinetics of dry grinding of industrial minerals: calcite and barite. International Journal of Mineral Processing 67, 29– 42.

Tülay. T, Sultan. G, M. Kadir G, Burakhan E, Enes K, Gülay. B. 2019: Developments in Flotation Technology. IMPC Eurasia Conference 31 October-2 November 2019 Antalya – Türkiye.

U

Udenko.A, Onyedika Gerald.C, Ogwuegbu Martins et Ayuk Ausaji. 2011. Flotation recovery of barite from ore using palm bunch based collector, Int. J. Chem. Sci.: 9(3), 2011,p1518-1524.

U.S.Geological Survey, 2019, Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey, 200 p., [https:// doi.org/10.3133/70202434](https://doi.org/10.3133/70202434).

V

Vincent.S, 2006. Capture de fines particules par des inclusions fluides. Thèse de doctorat Transferts, Dynamique des Fluides, Energétique et Procédés. Spécialité Génie des Procédés et de l'Environnement. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.FRANCE.P292.

Vila. J.M, 1977. Carte géologique de l'Algérie au 1/50.000, feuille de Khenchela N° (203), Sonatrach, Direction exploration. (1977).

Violaine.Ph, 2007, mise en évidence d'un changement de stoechiométrie du complexe carbonate limite au sein de la série des lanthanides(iii). thèse doctorat l'université paris-sud xi 2007.

VON. M, LAUE. Z. 1926. KRISTALLOGR. (6), pp.115.

W

Wang, Y., Yang, S., Li, H. (2015). Studies on the leaching of tungsten from composite barite–scheelite concentrate. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 54, 284–288.

Widanagamage, I. H., Griffith, E. M., Singer, D. M., Scher, H. D., Buckley, W.P., Senko, J.M. (2015). Controls on stable Srisotope fractionation in continental barite. Chemical Geology 411, 215–227.

WIES.A, 1991. Conception et étude d'un circuit de flottation, Fac. Sciences Appl, Université libre de Bruxelles,123pp.

Wyman, R. A. (1970). Experimental work on barite from Yarrow. Ontario. Division Report 70, 51 (IR).CANMET. Energy, Mines and Resources Canada.

x

Xiong, D., Lu, L., & Holmes, R. J. (2015). Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. In *Iron Ore* (pp. 283-307)

y

Yahiaoui.A, 1990. La partie inférieure de la série marnocalcaire du Crétacé supérieur. (Cénomaniens sup. à Coniaciens inf.) entre Batna et El-Kantara (Algérie orientale). Thèse de Doctorat. 207p, Université de Nancy, (1990).

Yelles-Chaouche.A, Boudiaf.A, Djellit.H, Bracene.R, 2006. La Tectonique active de la région Nord-Algérienne. *Comptes rendus des Géosciences*. Paris, t 338, (2006), pp. 126-139.

z

ZEDAM.R, 1998. Etude géologique du gisement de Barytine Mizab, Ain Mimoun, Khenchela. Thèse de Magistère, Univ. BADJI Mokhtar, septembre 1998. 130 pages.

Zedam.R, LAOUAR.R, BOUHLEL.S. 2007 Analyse Petrographique et Sedimentologique de L'albien D'ain Mimoun, Khenchela, (Nord-Est Algérie). *Sciences & Technologie D – N°26*, Décembre (2007), 09-20.

ZEDAM R, 2012, Mise en place d'une Minéralisation Hydrothermale au flanc Nord de l'Anticlinal de Khenchela. Identification et détermination sur fond Lithostratigraphique et Tectonique. Thèse de Doctorat sciences, université Mentouri, FSTGAT, département des sciences de la terre. Juillet 2012, 220 pages.

Zhang, X., Du, H., Wang, X., Miller, J.D. 2013. Surface chemistry aspects of bastnaesite flotation with octyl hydroxamate. *International Journal of Mineral Processing*, 133, 29 – 38.