



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

Mr AFFROUN Mansour

Mme ELKIM Thinhinane

Thème

Traitement et caractérisation du minerai Célestine par hydrocyclone cas de gisement de Beni Mansour-Bejaia

Soutenu le 30/06/2022 devant le jury composé de :

Président :	Mr. HAMICHE	Laid.	M.C.B	U.A.M.E
Promoteur :	Mme. BOUZIDI	Nedjma.	Professeur	U.A.M.B
Co-Promoteur :	Mr. ADJISSA	Massinissa.	Doctorant	U.A.M.B
Examineur:	Mr. BOUABDALLAH Sofiane.		M.C.B	U.A.M.B

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté pour effectuer ce travail

On tient à remercier notre encadreur Mme BOUZIDI NEDJIMA pour les précieux conseils et l'aide qu'elle nous a apporté

Nos remerciements vont aussi à Mr ADJISSA MASSINISSA, pour nous avoir dirigé durant toute la partie pratique.

Notre vifs remerciement vont aussi aux membres de jury Mr Hammiche Laid et Mr Bouabdallah Sofiane , qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail

A l'ensemble des enseignants qui nous ont suivis durant notre cycle d'études

A tous les ingénieurs de la société des mine de célestine « ZERGOUN BROTHERS GROUP », A LEUR TÊTE Mr CHEBELLE LAMINE, EN PARTICULIER : Mme BENHMICHI ASSIA et Mme ABDERRAHMANI ZAHRA, SOFIAN ; qui nous ont aidés durant notre stage pratique au sein de l'entreprise

Et aussi on tient à remercier Mr ATMAN DJERMOUNE pour son aide particulier et sa disponibilité pendant les analyses DRX

En fin, on tient à remercier toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

DÉDICACE

*Ce travail est dédié à la mémoire de mon père que dieu lui
accorde sa miséricorde*

*A ma chère mère qui m'a soutenu toute au long de ma vie,
c'est grâce et à cause d'elle que je suis arrivé à ce niveau
d'études, je la remercie infiniment et je la souhaite une
longue vie pleine de santé*

*A mes frères et sœurs Célia, Douba, Koka, qui m'ont cessé
d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et
de générosité*

A mes adorables Nouna, Mohand et Daniel

*A toutes mes amis(e) proches : Lahlou, Djamel, Aïssa Ben,
Fahim, Ali, Mass Fateh, Massi, Bahki, Youcef, Islam, Nadir
Manich*

A toute la promotion Génie Minier

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail

A tous ceux qui me sont chers

MANSOUR

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon père qui aura bien voulu voir cet instant et dont la responsabilité et l'engagement et le soutien à mon côté, que dieu lui accorde sa miséricorde

*A la lumière de mes jours et les étoiles de mes nuit ma mère
Noria*

A ma chère sœur Taous et son mari

A mes chers frères Massinissa et Gourta

A mes neveux Saïd et mayas

A ma Grand-mère Fatima

A toute ma famille (mon oncle, mes tantes et leurs époux), en particulier la famille SLIMANI

A mes cousin et cousines

A mon cher mari ACHOUR

A tous mes amis(e) : Taous, Anaïs, Amira, Maliza, Amel, Hiyam, Dila, Mélissa, Loula, Salima, Asma, Kiki, Bilal

THINHINANE

Sommaire**Remerciement****Liste des figures****Liste des tableaux****Liste des abréviations****INTRODUCTION GENERALE.....01****CHAPITRE I : Généralités sur la Célestine**

I.1. Introduction03

I.2. Définition de la Célestine04

I.3. Historique sur le minerai de Célestine05

I.4. Les propriétés de la Célestine07

I.4.1. Les propriétés physico-mécaniques07

I.4.2. Les propriétés physico-chimiques de minerai de célestine07

I.4.3. Propriétés optique et physique09

I.5. Domaine d'usage de la Célestine10

I.6. Les propriétés physico-chimique de strontium (Sr)11

I.7. Utilisation et source de strontium12

I.7.1. Dans l'industrie12

I.7.2. Dans l'industrie chimique12

I.7.3. Enrichissement de la Célestine13

I.8. La séparation gravimétrique13

III.8.1. Le principe de la séparation gravimétrique14

I.9. Concentration par nappe pelliculaire fluant15

I.10. Séparation par table à secousse16

III.7. Concentration par accélération différentielle18

III.8. Mécanisme de séparation dans les jigs18

I.13. Le programme de production	19
I.14. Les gisements de la célestine en Tunisie	21
I.14.1. La célestine du Djebel Kebbouch et de Djebel Bezina(Tunisie).....	21
I.14.2. Les gisements de fluorine de hammam Jédidi et hammam Zriba-Jébel Guébli (Tunisie nord-orientale)	21
I.15. L'utilisation de la Célestine aux USA	21
I.16. Conclusion.....	22

CHAPITRE II: La Célestine du Beni Mansour .

II.1. Introduction.....	23
II.2. La situation géographique	23
II.3. Historique du gisement	25
II.4. Origine du gisement	26
II.5. La distribution des teneurs.....	27
II.6. La Composition minéralogique moyenne	21
II.7. La Composition chimique moyenne (en%).....	28
II.8. Les études réalisées sur la Célestine de Beni Mansour	28
II.8.1. Laboratoire d'Alger 1971.....	28
II.8.2. Laboratoire du canada 1978.	29
II.9. Minéralogie de la Célestine	29
II.10. Technologie d'exploitation.....	29
II.10.1. Paramétrés de tir	29
II.10.2. Amorçage et accordement.....	31
II.10.3. Chargement	32
II.10.4. Transport	32
II.14. Conclusion	33

CHAPITRE III : Le traitement de la Célestine du Beni Mansour .

III.1. Introduction.....	34
III.2. L'ensemble de processus d'enrichissement de la Célestine	34
III.3. La méthode de traitement de Célestine de Beni-Mansour.....	35
III.3.1. Traitement mécanique	35
III.3.1.1. Le principe traitement par voie sèche	36
III.3.1.2. Principe de séparation par voie humide.....	37

III.4. Conclusion	41
CHAPITRE IV : Matériels et méthodes.	
IV.1. Introduction	42
IV.2. L'intérêt de la caractérisation physico-chimique et minéralogique	42
IV.3. L'échantillonnage	42
IV.3.1. Le prélèvement de l'échantillon.....	43
IV.4. La préparation mécanique des échantillons	43
IV.4.1. Concassage.....	44
IV.4.2. Homogénéisation et quartage.....	44
IV.4.3. Analyse granulométrique	45
IV.4.4. Essai par l'hydrocyclone	46
IV.4.4.1. Définition	46
IV.5. Méthodes de caractérisation	48
IV.5.1. Caractérisation minéralogique par diffraction à rayon X	48
IV.5.1.1. Définition de la DRX	48
IV.5.1.2. Principe de l'analyse	49
IV.5.2. Analyse chimique par fluorescence des rayons X	50
IV.5.2.1. Définition.....	50
IV.5.2.2. Principe de fonctionnement.....	50
IV.6. Conclusion	52
CHAPITRE V : Résultats et discussions.	
V.1. Introduction.....	53
V.2. Les résultats de l'analyse granulométrie	53
V.3. Les résultats de la concentration par l'hydrocyclone	54
V.4. Les résultats de la caractérisation	55
V.4.1. Caractérisation minéralogique par (DRX).....	55
V.4.2. Les résultats de la fluorescence X (FX)	60
V.5. Discussion de résultats	63
V.6. Conclusion	64
CONCLUSION GENERALE	65
Références bibliographiques.....	66

CHAPITRE I : Généralités sur la Célestine

Figure I.01 : Le strontium.....	04
Figure I.02 : Voici l'emplacement du strontium dans le tableau périodique des éléments.	04
Figure I.03 : La Célestine de Beni-Mansour	05
Figure I.04 : La Célestine bleu.	05
Figure I.05 : La Célestine de Madagascar.	06
Figure I.06 : La structure cristallin de la Célestine	10
Figure I.07 : Cristaux hexagonaux de Strontianite Visualisé au microscope optique.	11
Figure I.08 : Le principe de la concentration par nappe pelliculaire fluant	16
Figure I.09 : Le comportement des particules sur une table a secousse	17
Figure I.10 : Le comportement des particules pendant le jiggage	18
Figure I.11 : la production mondiale de la Célestine	13

CHAPITRE II :La Célestine du Beni Mansour .

Figure II.01 : localisation de site de Beni-Mansour sur la carte routière au 1/300000.....	24
Figure II.02 : Le gisement de la Célestine de Beni Mansour.....	26
Figure II.03 : Le schéma de charge des trous de min	31
Figure II.04 : le schéma de raccordements des trous de mine.....	32

CHAPITRE III : Le traitement de la Célestine du Beni Mansour

Figure III.01 : L'hydro-cyclon de rejet et de concentré respectivement de Beni Mansour	35
Figure III.02 : Schéma technologique de la préparation mécanique de la Célestine	37
Figure III.03 : Schéma illustratif de mode de fonctionnement de table à secousse	38
Figure III.04 : Schéma de l'ensemble de processus de traitement du Célestine.....	39
Figure III.05 : Schéma technologique de processus de traitement du Célestine	40

CHAPITRE IV : Méthodes et matériels .

Figure IV.01 : Le protocole de la préparation des échantillons.....	43
Figure IV.02 : Le concasseur à mâchoire de type de laboratoire	44
Figure IV.03 : Les étapes de la réalisation de quartage	45
Figure IV.04 : Tamiseuse automatique de laboratoire.....	46
Figure IV.05 : L'hydrocyclone de type de laboratoir.....	48
Figure IV.06 : Principe de l'analyse par DRX.....	49
Figure IV.07 : diffractomètre a rayon X.....	50
Figure IV.08 : Principe de base de l'analyse par FX.....	51
Figure IV.09 : un spectromètre à fluorescence X.....	51

CHAPITRE V:Résultats et discussions .

Figure .V.01 : Courbe du pourcentage pondéral (passants/refus) tout venant	53
Figure V.02 : Diffractogramme par rayon X pou le fond de tamis	55
Figure V.03 : Diffractogramme par rayon X pour la fraction]0.125mm ;0.250mm[.....	56

Figure V.04: Diffractogramme par rayon X pour la fraction]0.250mm ;0.5mm[.....	57
Figure V.05: Diffractogramme par rayon X pour la sous-verse.....	58
Figure V.06: Diffractogramme par rayon X pour la sur-verse.....	59
Figure V.07: Diffractogramme par rayon X pour l'ensemble des échantillons de la Célestine.....	59
Figure V.08. : Histogramme d'analyse FRX pour la fraction]0,125mm ;0.250mm[.....	60
Figure V.09.: Histogramme d'analyse FRX pour]0.250mm ;0.5mm[.....	61
Figure .V.10 : Histogramme d'analyse FRX pour sous-verse	61
Figure .V.11.: Histogramme d'analyse FRX pour sur-verse	62

CHAPITRE I : Généralités sur la Célestine

Tableau I.01 : Les propriétés physique de la Célestine	09
Tableau I.02 : les prévisions de possibilité de traitement par le critère de Taggart	15
Tableau I.03 : Les principaux pays producteurs de la Célestine	20
Tableau I.04 : Les domaines d'utilisation de strontium au USA en 2003.	22

CHAPITRE II : La Célestine du Beni Mansour .

Tableau II.01 : Les coordonnées des bornes délimitation le périmètre d'exploitation envisagé	25
Tableau II.02 : Les teneurs moyennes pondérées en SrSO_4	27
Tableau II.03 : Les teneurs en SrSO_4 dans les blocs de réserves	27
Tableau II.04 : Les teneurs en autres éléments associatives dans le gisement.	28
Tableau II.05 : La Composition minéralogique moyenne de la Célestine de Beni Mansour.	28
Tableau II.06 : La Composition chimique moyenne de la Célestine de Beni Mansour ...	28

CHAPITRE V: Le traitement de la Célestine du Beni Mansour .

Tableau. V.01 : Les résultats de l'analyse granulométrie du minerai tout-venant	53
Tableau. V.02 : Les résultats des débits de sous verse et de sur verse	54
Tableau. V.03 : La concentration en matières solide dans la soverse et la surverse	55
Tableau. V.04 : Les résultats d'analyse chimique (FRX) pour l'ensemble des échantillons.....	63

Liste des symboles et sigles

Caractères Grecs

- θ Angle d'incidence des rayons X
- λ (Å) longueur d'onde des rayons X
- ν Cm⁻¹ Nombre d'onde

Caractères Latins

- V unité caractère optique vitesse de phase de la lumière
- N_m - N_g - N_p indices de réfraction sans unités
- C° Degré Celsius de la température
- g/mol Gramme par mole
- Pa : Pascal unité de mesure de la pression
- t/an Tonnes par Ans
- USGS Institut d'études géologiques des Etats-Unis
- Km kilomètres
- ENOF Entreprise National Des Produits Miniers Non Ferreux et Des Substances Utiles
- U.R.S.S Union des Républiques Socialistes Soviétiques
- N° Tr Numéro du tranché
- N°S Numéro du surface
- Pouce unité de longueur =2,54cm .
- µm micro mètre
- tp6 bac de récupération de tout- venant après criblage
- DRX Diffraction des Rayons X
- FX Fleuriscence X pour analyses chimiques

2TH° : déviation de faisceau et l'angle entre l'horizontale et le détecteur (nom montage)

Sonarem: société National des Ressources Minières

H % : Taux d'Humidité

CE $\mu\text{S}/\text{Cm}$ Conductivité électrique

Mpa Méga pascal

MES Matière en suspension

IR infrarouge

LM lames Minces

SARL Société à responsabilité limitée

KV kilo volt

SciAps Appareil de détection de fluorescence X .

.I. Introduction Générale

L'Algérie est un pays riche en diverses substances utiles dont la majorité n'est pas encore mise en valeur, le sol Algérien contient des réserves importantes en différents métaux et minéraux, elle vient d'enregistrer un saut particulier dans son parcours économique en particulier le secteur minier qui vient de connaître un nouveau souffle de reprise à de nouvelles ambitions de développement, après avoir vécu une longue période d'extinction [1].

L'industrie minière est une activité qui a pour objet l'extraction et le traitement de différents minerais qui représentent un pôle industriel et économique, elle joue un rôle important dans l'économie mondiale. C'est une industrie unique par l'impact complexe qu'elle peut avoir sur le développement économique local, sur l'environnement, sur les profils socioculturels souvent typiques des vastes zones minières d'un pays ou d'une région particulière [1].

La Célestine est une espèce minérale composée de sulfate naturel de strontium de formule SrSO_4 avec des traces de Ba ; Ca...etc. La Célestine (pôle strontium) donne un isomorphisme complet avec la Baryte. Paradoxalement la couleur bleu pâle qui semble la caractériser n'est pas la plus couramment rencontrée [2]. Elle s'enflamme et brûle facilement dans l'air et réagit avec l'eau. Le strontium est isolé par Sir Humphry Davy (Angleterre) en 1808 après que son oxyde a été identifié dans le minerai d'une mine d'Écosse près de Strontiane, la strontianite SrSO_4 en 1790 par Thomas Charles Hope. Celui-ci s'est appuyé sur les travaux de William Cruikshank et Adair Crawford, les premiers à postuler l'existence d'un élément inconnu dans la strontianite[3].

Il existe plusieurs domaines d'application où la Célestine pourrait être utilisée de tel que la production de sels strontium, utilisée dans l'industrie sucrière pour l'enrichissement de mélasses ou le raffinage du sucre de betteraves, servent en pyrotechnie pour la production de feux artificiels (couleur rouge) et entrent aussi dans la fabrication des peintures lumineuses, tubes téléviseurs et le traitement des eaux, batteries électriques, de verres iridescents spéciaux et d'émaux...etc [4].

L'unité de traitement et d'enrichissement de Beni Mansour (SARL TBRHO FRERES ZERGOUN) a acquis en 2010 la concession minière sur le gisement de Célestine de Beni-Mansour suite à une adjudication du ministère de l'énergie et des mines. Le permis d'exploitation et par la suite l'ouverture de la mine exigent au préalable une étude géologique et minière complétée par une étude sur les aspects économiques et financiers[5].

Par notre présent travail sur l'analyse et caractérisation de la Célestine de Beni Mansour, nous essayons de répondre à la problématique, par une étude de caractérisation et d'application de la concentration par hydrocyclone afin d'améliorer le rendement et la qualité de la célestine produite. A cet effet, nous avons structuré notre travail en Cinq chapitres distincts précédés par une introduction générale et il se termine par une conclusion générale et recommandations :

- ✓ le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographie sur la Célestine et ses généralités.
- ✓ , Dans Le deuxième chapitre est une présentation générale de l'unité de traitement de Célestine SARL TBRHO FRERES ZERGOUN.
- ✓ Dans troisième chapitre une description générale de processus d'enrichissement et la technique de concentration et l'appareillage utilisé pour valoriser cette matière première dans cette unité.
- ✓ Dans Le quatrième chapitre nous parlerons sur les techniques expérimentales et les matériaux utilisés pour réaliser nôtres étude, le mode opératoire de chaque étape, et matériaux que nous avons utilisée pour la préparation des échantillons à caractériser .
- ✓ le cinquième qui est le dernier chapitre est consacré à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. Ces résultats nous permettent d'identifier les principaux éléments composant Ce minerai et ses impuretés.
- ✓ On finiron nôtres manuscrit par une conclusion générale et perspective comme récapitulatif des résultats obtenus .

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CELESTINE

I.1. Introduction

La Célestine désigne le sulfate de strontium naturel dont la formule chimique SrSO_4 . Le strontium est un élément chimique de numéro 38 dans la classification périodique de Mendeleïev (figure I.1). Le strontium, comme le calcium, est un alcalino-terreux. Il est mou, malléable, gris-jaune. Au contact avec l'air, il forme un film d'oxyde protecteur (passivation). Il s'enflamme et brûle facilement dans l'air et réagit avec l'eau. Le strontium est isolé par Sir Humphry Davy (Angleterre) en 1808 après que son oxyde a été identifié dans le minerai d'une mine d'Écosse près de Strontiane, la strontianite SrCO_3 en 1790 par Thomas Charles Hope. Celui-ci s'est appuyé sur les travaux de William Cruikshank et Adair Crawford, les premiers à postuler l'existence d'un élément inconnu dans la strontianite. Du strontium sédimente (dans les eaux douces, mais surtout océaniques). Une grande partie sera peu à peu intégrée dans les roches métamorphiques calcaires. Les récifs coralliens en absorbent également. La teneur moyenne de l'écorce terrestre en strontium est de 0.04%. Au sein de la célestine les ions Sr^{2+} peuvent être remplacés par des ions Ca^{2+} ou Ba^{2+} . Le strontium est également naturellement présent mais en moindre quantité sous forme strontianite qui est un carbonate de strontium SrCO_3 [6].

Avant tout travail d'optimisation, il est indispensable de bien définir et décrire l'objet étudié. Ce chapitre va permettre de donner des généralités sur la célestine, et ces propriétés et caractéristique ainsi que leurs domaines d'utilisations, les gisements de la célestine en Tunisie, on finira notre chapitre par une petite conclusion et quelques perspectives, la figure (01) représente le strontium.



Figure I.1 : le strontium [2].

1	2																	10
1 H Hydrogène																		2 He Hélium
3 Li Lithium	4 Be Béryllium																	10 Ne Néon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium																	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton	
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon	
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	*	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astate	86 Rn Radon	
87 Fr Francium	88 Ra Radium	**	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnérium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roëntgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium	
* lanthanides		57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium		
** actinides		89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium		

Figure I.2 : Emplacement du strontium dans le tableau périodique des éléments [3].

I.2. Définition de la Célestine

La Célestine est une espèce minérale composée de sulfate naturel de strontium de formule $SrSO_4$ avec des traces de Ba ; Ca. La Célestine donne un isomorphisme complet avec la Baryte. Les premiers échantillons trouvés avaient une couleur bleu de ciel, elle se rencontre rarement, mais parmi les minéraux de strontium c'est l'espèce principale, elle se caractérise par son système orthorhombique [7], la figure (02+03) représente la Célestine de Beni Mansour et la Célestine bleu.



Figure I.3 : la célestine de Beni-Mansour.



Figure I.4 : la Célestine bleu [8].

I.3. Historique de la Célestine

La Célestine nom d'origine issu du latin « coelestis » ou « caelestis » signifiant céleste. La Célestine est aussi appelée « la pierre des anges ». La Célestine trouve son origine à Madagascar. Cette pierre a été découverte en 1797 par deux minéralogistes allemande, Martin Heinrich Klaproth, un chimiste et un minéralogiste qui a fit la première analyse chimique sur la Célestine en 1797 ,et Abraham Gottlob Werner, qui es la classifie dans son

inventaire des minéraux en 1798 et même c'est lui qui a donné le nom de Célestine en raison de sa couleur bleue, la couleur du ciel observée au sein des premiers échantillons recueillis, translucide, particulièrement pure et alumineuse[9] .

Dès l'antiquité, la pierre Célestine est connue pour avoir d'étranges propriétés. Elle est devenue très prisée par les alchimistes ou encore par les magiciens. A cette époque, les savoirs sur cette pierre sont réservés aux adeptes des savoirs mystiques et des sciences occultes. Ainsi, cette pierre est restée longtemps méconnue pour les non-initiés. Les romains eux connaissaient la Célestine sous l'appellation d'aqua-aura dénomination qui est aujourd'hui donnée à une pierre qui est fabriquée de façon artificielle. La pierre Célestine était utilisée soit sous sa forme solide, la pierre soit comme une essence ou encore un élixir. Enfin, la Célestine était employée sous forme de poudre. Sa large diffusion autour du bassin méditerranéen l'a fait connaître à beaucoup de monde. Elle a dès lors été largement utilisée. On pouvait trouver de la Célestine avant le 18eme siècle en Italie, en suisse, en Angleterre, au Maroc ainsi qu'en Tunisie. Et aujourd'hui en Algérie particulièrement[9].



Figure I.5 : la Célestine de Madagascar [9].

I.4. Les propriétés de la Célestine

I.4.1. Les propriétés physico-mécaniques

- Présentation : masse compacte
- Structure : béchique, souvent massive, quelques fois rubanée ou poreuse et caverneuse
- Texture : en cristaux de quelques millimètres à plusieurs centimètres, en tablettes.
Inclusion de débris de carbonates
- Couleur : blanc légèrement bleuté et à éclat vitreux parfois gris bleuâtre, on rencontre parfois des cristaux incolores et limpides
- Dureté : 3,5 de l'échelle de Mohs
- Comportement avec l'humidité : indifférence
- Masse volumique : 3,9
- Coefficient de foisonnement : 1,50
- Masse volumique apparente : 2,33
- Résistance aux chocs : faible [9].

I.4.2. Les propriétés physico-chimiques de minerai de la Célestine

La Célestine est une pierre naturellement composée de strontium et de soufre, elle appartient au groupe des sulfures. Sa structure forme un isomorphisme entier avec la baryte. Le strontium qui est un alcalino-terreux, donne en effet une solution solide avec la baryte mais également avec l'anhydrite ou le sulfate de calcium. La Célestine se compose d'une masse molaire 183.69g/mole de masse volumique 3.9 à 4 g/cm³ sa solubilité dans l'eau est de 0.0132g/l à 20°C, de maille orthorhombique, souvent incolore, parfois blanc, comprenant de nombreuses nuances de bleu blanc ou pale. Elle est en association avec la blende, la galène ainsi que d'autres sulfures. La pierre Célestine se trouve au départ au creux des roches volcanique. Celles-ci seront remplies plus tard par des solutions hydrothermales de strontium. La célestine appartient au système cristallin orthorhombique l'un des sept systèmes cristallins qui classe les minéraux par rapport à leur symétrie.

C'est un minéral à la structure plutôt dense, fibreuse comme la baryte. Cette pierre comporte des impuretés en général colorées de bleu vert, rouge clair, brun ou encore rouge brun ou encore jaune du a la présence de soufre. Elle est aussi typique des milieux hydrothermaux. Plus généralement la pierre Célestine demeure un minéral naturel dispersé au sein des roches sédimentaire. On la retrouve notamment dans les dolomites, les calcaires ou

encore dans les grés. Faisant partie du groupe des sulfates, la Célestine forme une masse rocheuse d'évaporites. On peut donc l'observer sous forme de cristaux sur de la calcite, de la dolomite ou bien encore sur de l'aragonite. Ces cristaux ont généralement la forme de prisme allongé ou une forme plus aplatie, parfois ces cristaux peuvent prendre la forme de tablettes. Cette forme étant plus rare, elle est la plus recherchée.

La pierre Célestine apparaît de même sous forme de géodes ou de nodules, à l'intérieur des formations sédimentaire. On trouve les gisements de la Célestine les plus importants : Allemagne, Angleterre, Autriche, USA, France, Canada, Italie, Madagascar, Tunisie et Slovaquie ou en Russie.

La Célestine est disponible sous forme de petites pierres[10]. La Célestine est de minerai de strontium, sa composition chimique est de SrSO_4 , ce minérale est composé de sulfate de strontium, la Célestine à une lente solubilité dans les concentrations acides et alcalino-carbonate solution et très lente soluble dans l'eau La Célestine se cristallise dans le système orthorhombique et forme habituellement des cristaux plutôt plats et mais aussi en cristaux tabulaire, prismatique épais, rhombique, des cristaux peuvent être présents en granulat (en général clivables) [11]. la figure (06) représente la structure cristallin de la Célestine.

I.4.3. Propriétés optique et physique**Tableau I.1** : Les propriétés physique de la Célestine[12].

Propriétés optique :	
Doublage :	Nul
Caractère optique :	Biaxe positif, $2V=50^\circ$
Polariscope :	Anisotrope : rétabli tous les 90°
Indice de réfraction :	$N_p = 1.621$ à 1.625 $N_m = 1.622$ à 1.624 $N_g = 1.630$ à 1.635 Matériel de Madagascar : $N_p = 1.619$ à 1.621 $N_m = 1.622$ à 1.624 $N_g = 1.630$ à 1.631
Biréfringence :	+0.008 à +0.012
Dispersion	0.014
Polychroïsme	Fiable : nuances de incolore à bleu clair/ bleu, bleu-mauve à violet/ vert foncé à bleuâtre
Spectre d'absorption :	Non observable / non diagnostique
Luminescence :	Variable faible à nulle : bleue parfois blanche-verte ou jaune Parfois phosphorescence bleue- blanche
UV Court (254) :	Bleue à mauve à nulle
UV long (366nm) :	Blue, jaune à nulle
Propriétés physique	
Densité :	3.90 à 4.00
Dureté :	3 à 4
Clivage :	Parfait selon (001), bon selon (210)
Cassure :	Conchoïdale, irrégulière
Couleur du trait :	Blanc
Résistance au choc :	Fragile
Résistance à la chaleur :	Mauvaise : couleur disparaît avec 200°C / fond dans la flamme
Observations et remarques	
Inclusions :	Givres liquides en « broussailles » Décollements / fractures Givres de guérisons épars
Cristaux :	Prismatiques, tabulaires/ granuleux, fibreux/ compact
Confusions possibles avec :	Barite, topaze, etc.
Taille(s) :	Cristaux bruts, facettes collections, etc.

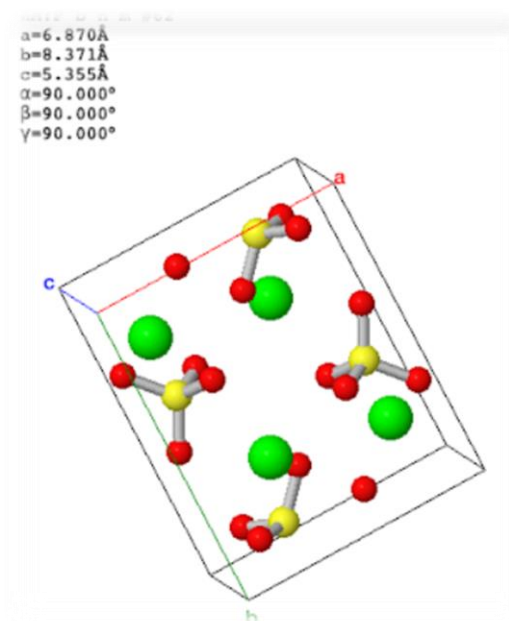


Figure I.6 : La structure cristalline de la Célestine[11].

I.5. Domaine d'usage de la Célestine

La pierre Célestine est utilisée soit sur forme solide, la pierre, soit comme essence ou encore comme un élixir. La Célestine était employée sous forme de poudre. La Célestine est le minéral extrait pour la production de sels strontium, utilisée dans l'industrie sucrière pour l'enrichissement de mélasses ou le raffinage du sucre de betteraves, servent en pyrotechnie pour la production de feux artificiels (couleur rouge) et dans le domaine d'oxyde et entrent aussi dans la fabrication des peintures lumineuse, tubes téléviseurs et le traitement des eaux

Le strontium est utile sous forme carbonate pour la production des tubes cathodiques, batteries électriques, de verres iridescents spéciaux et d'émaux, de céramique, des divers caoutchoucs, couleurs pour téléviseurs et écrans informatiques plus claire et moins couteux et plus respectueux de l'environnement. En effet, cet élément est exploité dans la structure osseuse dans les sols agricoles. Sa forme métallique utilisée principalement en électronique et dans certains alliages. Le strontium ingéré se retrouve concentré à environ 99% dans le système osseux, ainsi que dans le système conjonctif. Ingéré en trop grande quantité, cet élément provoque des troubles osseux proches du rachitisme, a tendance à remplacer le calcium dans l'os. De ce fait, le strontium 90, très radioactif, est particulièrement dangereux pour l'homme ,la Célestine et le strontianite sont les principales minérales de l'élément chimique strontium [13].



Figure I.7 : Cristaux hexagonaux de Strontianite visualisé au microscope optique[14].

I.6. Les propriétés physico-chimique de strontium

Le strontium élémentaire a un poids moléculaire de 87,62 g/mol. Il se situe entre le calcium et le baryum dans le groupe des métaux alcalino-terreux. Le strontium (Sr) se trouve uniquement à un état de valence de +2 dans l'environnement. Parmi les nombreux isotopes de strontium qui peuvent exister, on en trouve seulement quatre (^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr) à l'état naturel, tous sont considérés comme stables et faiblement radioactifs. Les isotopes radioactifs de strontium, en particulier ^{89}Sr et ^{90}Sr , se forment lors de la fission nucléaire dans les réacteurs. Le strontium est présent naturellement dans la croûte terrestre dans une concentration de 0,04 % (au 15e rang des éléments les plus abondants), et dans l'eau de mer dans une concentration de 0,00008 % (8 ppm). Il réagit facilement au contact de l'eau et de l'oxygène, et se retrouve généralement sous forme de carbonate de strontium (SrCO_3) et de sulfate de strontium (SrSO_4) dans les minéraux, mais peut aussi être présent dans d'autres composants comme le phosphate de strontium [$\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$] et en association avec des formations de roches sédimentaires. Il est présent dans l'eau en tant que cation hydraté, et peut créer des complexes avec des carbonates et des silicates selon la minéralisation de l'eau. Le strontium a un point d'ébullition de 375 °C, un point de fusion de 777 °C et une pression de vapeur de 0,0005 Pa (basse). La solubilité des sels de strontium varie. Le nitrate de strontium ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, 538–790 g/L à 18 °C), le chlorure de strontium (SrCl_2 , 345–538 g/L à 20 °C), et le SrSO_4 (0,14 g/L à 30 °C) sont modérément solubles dans l'eau, alors que le

SrCO_3 (0,01 mg/L à 25 °C) est faiblement soluble. Il n'existe pas de données relatives à la constante de la loi de Henry [15].

I.7. Utilisation et source de strontium

I.7.1. Dans l'industrie

Les espèces géochimiques de strontium les plus importantes sur le plan économique sont le SrSO_4 (Célestine ou célestite) et le SrCO_3 (strontianite). Le SrSO_4 est la principale source géochimique de strontium, elle est convertie en d'autres formes à des fins commerciales, surtout le SrCO_3 et le $(\text{Sr}(\text{NO}_3)_2)$. Le SrCO_3 est utilisé dans les procédés de fabrication d'aimants permanents en céramique et de glaçure, en remplacement du plomb. Il sert également à accroître la résistance et la dureté du verre, à améliorer des propriétés optiques, et à absorber les radiations. On l'emploie pour enlever le plomb des solutions électrolytiques au zinc et pour fabriquer des alliages d'aluminium utilisés dans les industries de l'aérospatiale et de l'automobile. Son utilisation répandue pour les applications électriques et la peinture s'explique par ses propriétés physiques, qui permettent la conduction à température élevée, offrent une résistance à la corrosion, et permettent une démagnétisation. Le nitrate de strontium et, dans une moindre mesure, le sulfate de strontium, le chlorure de strontium et l'oxalate de strontium servent principalement à fabriquer des pièces pyrotechniques et des dispositifs de signalisation qui produisent une vive couleur rouge. Le chromate de strontium est utilisé comme pigment de peinture [16].

I.7.2. Dans l'industrie chimique

Les formes radioactives de strontium sont utilisées dans le cas d'applications médicales comme l'imagerie osseuse.

Certains sels de strontium sont classés comme des produits de santé naturels en vertu du Règlement sur les produits de santé naturels. Le citrate, le lactate et le gluconate de strontium, souvent en combinaison avec d'autres ingrédients, sont les sels principalement utilisés dans les produits de santé naturels pour favoriser la santé des os. Ils sont également utilisés dans le dentifrice pour soulager la sensibilité dentaire.

Le ranélate de strontium (SrR) est un médicament d'ordonnance commercialisé en Europe pour le traitement de l'ostéoporose. Il se dissocie en deux atomes stables de Sr^{2+} et en une molécule d'acide ranélique dans le tractus gastro-intestinal. Son effet pharmacologique d'augmenter la densité minérale osseuse est attribué à la fraction du strontium. L'acide ranélique est très peu absorbé et essentiellement excrété.

Bien que l'utilisation du SrR ait été approuvée pour le traitement de l'ostéoporose chez les personnes âgées dans l'ensemble des pays de l'Union européenne en 2004, elle a par la suite été restreinte. L'Agence européenne des médicaments (AEM, 2014) considérait que le rapport avantages et risques était favorable à l'emploi du SrR. L'agence a cependant recommandé que son utilisation soit limitée aux patients ne pouvant recourir à aucune autre option et à ceux sans antécédents de problèmes cardiaques ou circulatoires, et de cesser le traitement en cas d'éruption cutanée, en raison des effets nocifs possibles. Conséquemment, le SrR peut être prescrit en Europe uniquement dans des cas sévères où les patients sont supervisés par un médecin.

Certains sels de strontium (iodure, carbonate) sont utilisés dans le cadre du traitement contre le cancer au Canada. Seul le strontium-89 radio pharmaceutique est approuvé au Canada pour un usage intraveineux dans le cadre du traitement contre le cancer.[16]

I.7.3. Enrichissement de la Célestine

Pour récupérer une teneur en sulfate de strontium >90 % SrSO_4 qui est dans la Célestine, on l'extrait soit à ciel ouvert ou souterrainement, utilisant les méthodes suivantes : méthodes gravimétriques, séparation magnétique, et par flottation [6].

Dans une première phase, il est convenu de produire de concentré à une teneur de 91% en SrSO_4 avec une granulométrie de 0-2 mm. Par la suite, après une meilleure maîtrise du marché et des installations d'enrichissements, la lixiviation à froid pourra être envisagée [13].

I.8. La séparation gravimétrique

La concentration par gravité ou gravimétrique est une voie importante de la minéralurgie. sont-ils enrichies par une technique gravimétrique. Des étapes successives de concentration suivant chaque étape de réduction granulométrique permettent de profiter de la libération progressive des espèces minérales de valeur, évitant ainsi de recourir immédiatement à un broyage poussé à la maille de libération, ce qui diminue la consommation énergétique et le coût du traitement.

Ces procédés sont très bien adaptés aux petites installations, mais permettent aussi de traiter des tonnages importants. De plus, ils se prêtent tout particulièrement à la mise en place d'unités mobiles (sur des dragues ou dans des sites isolés).

Les objectifs de la concentration gravimétrique sont :

d'une part l'obtention de concentrés définitifs pour des extractions de charbon, de fer et de minéraux lourds comme la wolframite ou la cassitérite ;

d'autre part la production de pré concentrés dans un grand nombre de cas (fluorine, barytine, minerais métalliques, traitement des déchets, etc.), permettant de réduire l'emploi de méthodes de valorisation plus onéreuses ou de s'affranchir de paramètres sensibles intervenant dans des procédés autres que gravimétriques : cette voie est ainsi moins perturbée par des variations de composition minéralogique-chimique que la flottation, où les sels solubles, les changements dans la stœchiométrie des minéraux, la qualité de l'eau et la nature des impuretés sont des facteurs perturbants.

La réussite d'une séparation gravimétrique repose sur la connaissance poussée des paramètres minéralogiques du minerai à traiter (maille de libération, masse volumique des divers constituants, présence de mixtes minéralogiques, répartition granulométrique des espèces minérales, etc.)[17]

I.8.1. 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 générale la résistance à la pénétration dans un milieu plus ou moins fluide (gaz, eau, liquide homogène ou mélange composée d'un fluide et de particules solides maintenues en suspension),

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 [17].

$$C_T = (\rho_L - \rho_f) / (\rho_l - \rho_f) \dots \dots \dots (\text{critère de Taggart})$$

Ou :

ρ_f : masse volumique du fluide.

ρ_L : masse volumique du minéral lourd.

ρ_l : masse volumique du minéral léger.

Tableau I.02 : les prévisions de possibilité de traitement par le critère de Taggart [15]

Valeur CT	Difficulté de la séparation
>2,5	Facile pour toutes granulométries
$1,5 < Ct < 2,5$	Possible pour les granulométries >200 mm
$1,25 < Ct < 1,5$	Possible pour les granulométries >1,7 mm
< 1,25	Impossible

I.9. Concentration par nappe pelliculaire fluant

La concentration par nappe pelliculaire fluant est basée sur la longueur de parcours effectué par une particule sur un plan incliné, à la surface duquel s'écoule, par gravité, un film liquide. La poussée exercée par le film est proportionnelle à la section de la particule perpendiculaire au mouvement de déplacement.

La taille de la particule, sa densité et sa forme interviennent dans le déplacement au même titre que la pente et la rugosité de la surface, l'épaisseur et la vitesse d'écoulement du film d'eau.

D'une manière générale, la séparation est provoquée par la mise en jeu de deux facteurs.

- Le temps que met la particule pour rejoindre la surface du plan incliné. Ce temps est fonction de la densité, de la taille et de forme des particules ainsi que de la nature de l'écoulement.
- La résistance qu'offrent les particules, une fois qu'elles ont atteint la plan incliné, au mouvement de la nappe pelliculaire [12].

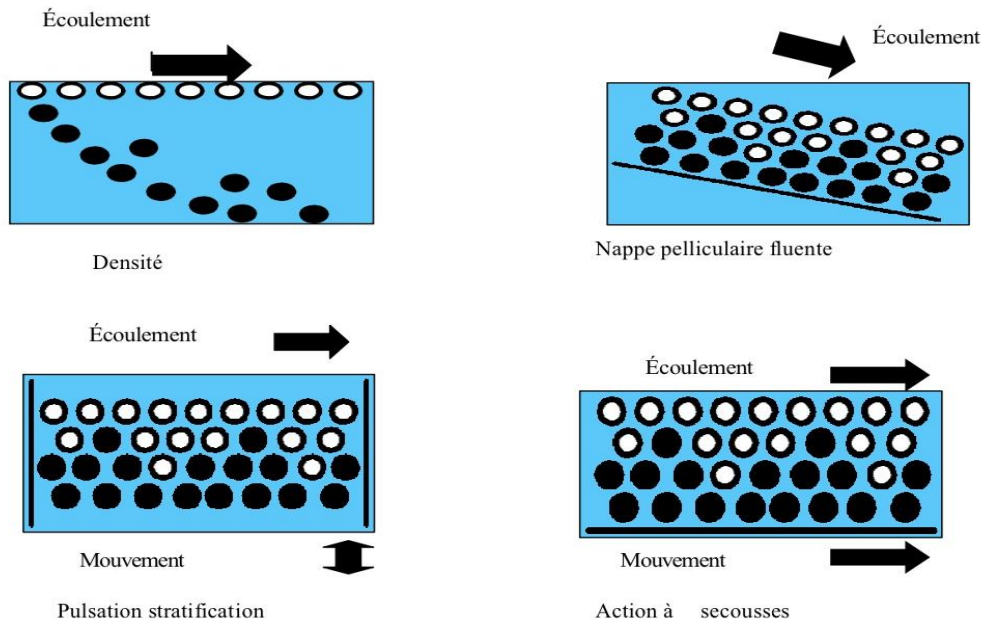


Figure 13. Les différents mécanismes de séparation gravimétrique

Figure I.08. : Le principe de la concentration par nappe pelliculaire fluante [12]

I.10.Séparation par table à secousse

Les tables à secousse font partie des équipements de séparation par nappe pelliculaire fluante, sont constitués d'un plateau ayant une certaine inclinaison par rapport à l'horizontale, et animé d'un mouvement dissymétrique suivant le sens longitudinal.

L'alimentation des tables s'effectue dans une boîte à son extrémité plus haute, par une pulpe brute (minerais en suspension dans l'eau). La nappe est formée par déversement d'eau sur le long du bord supérieur qui descend jusqu'au bord inférieur.

Des réglettes « riffles » longitudinales permettent de séparer les produits lourds. En revanche les produits légers ont tendance à sauter ces nervures « riffles ». Les grains lourds disposés entre les riffles, avancent en adhérant à la surface de la table longeant ceux-ci jusqu'à l'extrémité où ils seront finalement évacués dans l'angle de la table opposé à l'arrivée de la pulpe, ceci grâce au mouvement asymétrique longitudinal imprimé au plateau [18][19].

Ces appareils de concentration sont plus efficaces au traitement des minerais présentant des grandes différences de densités entre minéraux. Les principaux facteurs intervenant dans le processus de séparation par tablage sont :

- Le % solide de la pulpe doit être compris entre 20 à 30%
- La consommation en eau de lavage est comprise entre 1 et 2 m³ par tonne de minerai traité.
- L'amplitude de la secousse doit être déterminée selon la grosseur du grain par formule : $L = \sqrt[4]{dm}$
- Le nombre de secousses N est déterminé par la vitesse du moteur.
 $N = 250 / \sqrt[5]{dm}$.
- L'angle d'inclinaison : la vitesse de déplacement des grains selon le plan incliné dépend de la vitesse de l'eau ; les grandes vitesses sont obtenus avec des grands angles
- L'angle et l'eau de lavage sont étroitement liés et sont paramètres essentiels lors du réglage du procédé.
- Figure page 17 schémas illustratifs de mode de fonctionnement et du table à secousse [11]

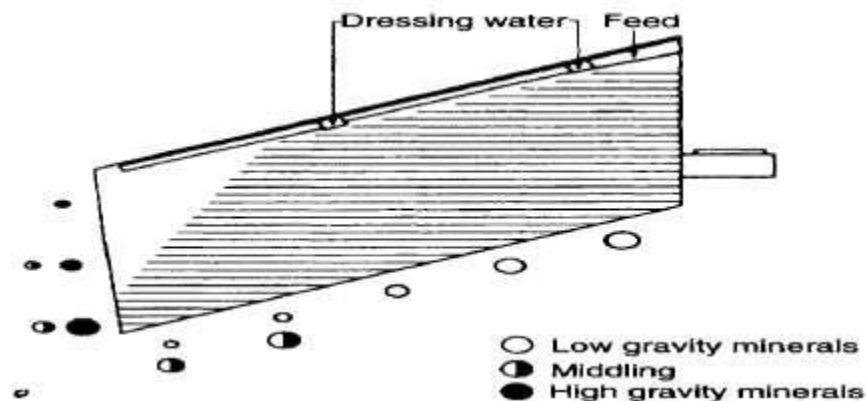


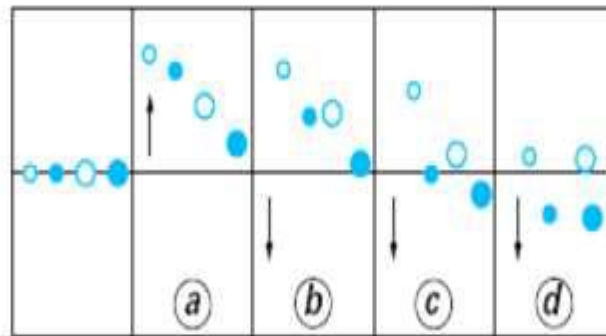
Figure .I.09. :Le comportement des particules sur une table à secousse [18]

I.11. Concentration par accélération différentielle

L'accélération différentielle pour une particule, est l'accélération initiale du mouvement de la particule, celle-ci dépend seulement de la densité relative du solide et du liquide.

En revanche, la dimension de la particule n'intervient pas. Le procédé d'accélération différentielle se réalise si la répartition de chute des particules minérales est assez fréquent, la

durée de chute est assez dans la mesure où on soumette les particules à des courants ascendants, assurés par la pulsation du fluide[11].



(a) poussée

(c) accélération différentielle

(b) sédimentation gênée

(d) filtration interstitielle + succion

Figure I.10. : Le comportement des particules pendant le jigage [12].

I.12. Mécanisme de séparation dans les jigs

La séparation des particules lourdes et légères est obtenue en 03phases à l'aide de l'action combinée des courants ascendants et descendants. Lorsqu'on applique une pulsion sur liquide, les particules seront entraînées sélectivement par les courants ascendants du liquide suivant une vitesse donnée de sorte que le lit se dilate et se fluidise. Pendant cette période de temps, deux phénomènes se produisent : l'accélération différentielle et la sédimentation entravée.

- 1ere phase ; accélération différentielle : lors du phénomène de sédimentation, avant d'atteindre la vitesse limite, les particules acquièrent une accélération qui ne dépend que de leur densité, seulement si le temps de chute est court et la fréquence des cycles élevée, le mélange binaire de particules lourds et légères se comporte de manière à ce que les distances parcourues par les particules sont en fonction de leur accélération et de leur densités sue de leurs granulométries

- 2eme phase : sédimentation entravée : lorsque les particules atteindrais leur vitesse de sédimentation terminale qui est dépendante de leur densité et leur dimension aussi. La sédimentation des particules prend plutôt place en régime entravé, donc avec un rapport de sédimentation minéral lourd/minéral léger plus grand (formation d'une suspension épaisse de densité élevée) qu'en sédimentation libre.

- 3eme phase : infiltration interstitielle : à la fin de la période de pulsion et au début de la suction, la sédimentation entravée cesse au moment où le lit de particules commence à devenir compact (tassement). L'eau circulant à travers le lit, entraine les petites particules de masse volumique élevée : c'est l'effet stratification assistée ou l'infiltration interstitielle. Ces particules s'accumulent dans le fond de la Huch, pour en être soutirées périodiquement, formant un concentré relativement pur.

L'essai de concentration gravimétrique par jiggag a été réalisé à l'aide d'un bac à piston de type laboratoire au sein de laboratoire de valorisation des ressources minérales, département de génie minier, université Badji Mokhtar Annaba. Dans le procédé de concentration gravimétrique, et afin de mener les essais dans les meilleurs conditions, plusieurs variable opératoires liés aux appareils utilisés sont étudiés et analysés. De même, les granulométries, les densités et teneurs en éléments utiles sont évalués avant et après de chaque opération de séparation[16].

I.13. Le programme de production

S'agissant d'une substance utile dont le marché est assez restreint, il est convenu de démarrer avec une production de concentré marchand de 17 500 tonnes la première année puis d'assurer une montée à cadence pour atteindre le double la cinquième année.

L'extraction et l'enrichissement de 50 000 t/an de minerai est prévu en un poste de 08 heure à raison de 5 jours par semaine soit 223 jours ouvrables par année[13]. La production mondiale de concentrés de la Célestine en 2020, à dépassés, 210 000 tonne[20].



Figure I.11 : La production mondiale de la Célestine [20]

Tableau I.3 : Les principaux pays producteurs de la Célestine [12].

Les pays	La quantité/ tonne par an
Argentin	670t
Iran	35000t
Mexique	38000t
Chine	50000t
Espagne	86000t

I.14. Les gisements de la Célestine en Tunisie

I.14.1. La Célestine du Djebel Kebbouch et de Djebel Bezina(Tunisie)

La Célestine semble être fréquente en Tunisie .Elle accompagne les minerais oxydes de Zinc dans les calcaires, dolomies et cargneules du Trias. Et quand il s'y mêlés minerais métalliques se sont généralement des sulfures (blende, galène ou pyrite).

Les cristaux de la Célestine sont blancs. Les plus gros atteignent 1cm dans leurs plus grandes dimensions, ils sont très brillants sauf s'ils sont recouverts d'une sorte de poussière de très petits cristaux de pyrite.

L'analyse de ces cristaux, Par M. Pisani, a donné les résultats suivants :

- Anhydride sulfurique....43 ,40%.
- Strontium.....56,20%.
- Chaux...0,40%.
- La formule $SrSO_4$ correspond à la composition :
- Anhydride sulfurique...43,60%.
- Strontium.....56, 40%.

La Célestine du Kebbouch est donc du sulfate de strontium à peu près pur[21].

I.14.2. Les gisements de fluorine de hammam Jédidi et hammam Zriba-JébelGuébli (Tunisie nord-orientale)

La barytine $BaSO_4$ et la célestine $SrSO_4$ forment une série continue de solutions solides, les solutions (Sr, Ba) SO_4 sont rares .

Cette étude porte des échantillons de « Célestobarytine » provenant des deux principaux districts, Celui de Hammam Jédidi et celui de Hammam Zriba-Jébel Guébli, dans le premier district, on trouve des gites de remplissage de fractures et de substitution de brèches tectoniques, et dans le second, il s'agit d'un gite stratiforme de substitution et de remplissage de poches de dissolution [20]

I.15. L'utilisation de la Célestine aux USA

La Célestine est la principale source des sels de strontium. Ce minéral est désigné sous plusieurs autres appellations dont la plus courante est la Célestine .Il est principalement utilisé sous forme de carbonate ou dans le processus d'électrolyse du Zinc, traitement des eaux, production des tubes cathodiques, écrans informatiques...etc[13].

Les statistiques de l'année 2003 font ressortir qu'aux états unis, le marché des sels de strontium se présentait comme suit :

Tableau I.4 : Les domaines d'utilisation de strontium au USA en 2003[13].

Electrolyse de Zinc	2%
Céramique	10%
Peinture	2%
Pyrotechnie	10%
 Tubes téléviseurs	73%
Autres	3%

I.16. Conclusion

La Célestine est un minéral très important dans le domaine industriel et surtout dans l'industrie pétrolière et chimique à cause de ses différentes propriétés, après être exploité juste elle sera traitée pour récupérer le concentré, par différentes méthodes de traitement, comme la mine de Beni Mansour, elle utilise la séparation gravimétrique dont elle récupère une teneur de 90% du concentré.

CHAPITRE II : La Célestine de Beni-Mansour

II.1. Introduction :

Notre pays possède une capacité minéralogique importante à l'investissement et l'association visant l'exploration minière la transformation et la fabrication pour certaines essences minérales.

Malgré cela, le secteur minier est resté très productif par rapport au potentiel que recèle notre pays, qui est appréciable notamment, pour les substances utiles non métalliques telles que les phosphates, le sel, le marbre,...

L'Algérie s'est attachée, depuis l'indépendance, à se doter d'un secteur minier qui puisse répondre à ses préoccupations. Dans le secteur minier, un important effort de prospection a été consenti durant ces 30 dernières années, il permet de développer l'infrastructure géologique de base d'inventorier un grand nombre de gites et indices dont certains offrent de réelles perspectives d'investissement pour leur exploitation. C'est sur cette base que l'état algérien a décidé de promouvoir de mettre en valeur ce potentiel. [14]

La SARL TBRHO FRERES ZERGOUN a acquis en 2010 la concession minière sur le gisement de célestine de Beni-Mansour suite à une adjudication du ministère de l'énergie et des mines. Le permis d'exploitation et par la suite l'ouverture de la mine exigent au préalable une étude géologique et minière complétée par une étude sur les aspects économiques et financiers.[6]

La démarche adoptée dans cette étude, s'inscrit dans le cadre d'une exploitation optimale et rationnelle des réserves. Elle se fonde sur les règles de l'art minier et a pour souci une limitation optimum des coûts de production.

II.2. La situation géographique

Le gisement de Beni-Mansour de Bejaia, se trouve à 160 km à l'est d'Alger, à 40 km à l'est de Bouira et à 100 km au sud-ouest de Bejaia qui est le chef-lieu de la wilaya.

Il occupe une position géographique intéressante aux confins de 3 wilaya et se situe non loin d'infrastructures assez denses :

- L'autoroute Est-ouest très proche (5 km)
- La route nationale N° 5 Alger -Constantine (2.5 km)

- La route nationale N° 26 Alger-Bejaia (5 km)
- Des chemins de wilaya en bon état
- Une gare de tri ferroviaire, Beni Mansour (5 km), nœud entre Alger, Bejaia et Constantine
- Le port de Bejaia à 100 km
- Ligne haute tension à 4 km du gisement

Ce village abrite environ de 3000 habitants, rattachés au commun de Boudjellil, Daïra de Tazmalt, dispose de toutes les infrastructures et les commodités nécessaires[6].



Figure II.01 : localisation de site de Beni-Mansour sur la carte routière.[6]

L'intersection de la piste d'accès vers le gisement avec la route asphaltée est à une distance de 1100 m du contour de la minéralisation, alors que le carreau mine (ou vont être implanté les annexes du chantier et l'installation de concassage) est à une distance de 440 m à vol d'oiseau.

Le pont qui enjambe le petit cours d'eau sur la piste menant vers le site est conçu pour supporter des camions d'au moins 25 à 30 tonnes de poids total en charge.

Plus au nord, la région est relativement peuplée et certains villages et zones d'habitation se situent à moins de 7 km du site. Les coordonnées des points de délimitation du périmètre minier retenu à l'exploitation sont présentés dans le (Tableau II.01) et la surface du périmètre : 72 hectares (rectangle de 1200*600m) [6]

Tableau II.1 : Les coordonnées des bornes délimitation le périmètre d'exploitation envisagé[6].

Système de coordonnées	UTM zone 31		WGS 84	
	N° Borne	X	Y	X	Y
1	624 000	4018 200	623934	4018500
2	625 200	4018 200	625134	4018500
3	625 200	4017 600	625134	4017900
4	624 000	4017 600	625934	4017900

II.3. Historique du gisement

Avant les années 60, le gisement ne semble pas offrir d'intérêt. Chez les auteurs ayant travaillé dans la région, il n'est fait mention nulle part de ce gisement. Il semble pourtant que durant les années 40 ou 5, une exploitation artisanale y a été menée. Les premiers à en avoir parlé semblent être des géologues soviétiques de la SONARAM qui ont en 1968, visité échantillonné et estimé les réserves jusqu'à la profondeur de 15m. Ils ont attiré l'attention par la suite sur les teneurs élevées en strontium. Ce n'est qu'en 1970 qu'un projet de prospection-évaluation est mis en œuvre et eu terme duquel les réserves de minerai sont évaluées de façon méthodique. En 1986, dans le cadre de travaux de recherche complémentaire, les géologues complètent les travaux réalisés en 1970 par d'autres sondages en resserrant la maille de forage et en effectuant des levés géophysique sue la partie la prometteuse du gisement.

Les réserves géologiques sont réévaluées et leurs contours précises .Durant les années 80, le gisement a été exploité de façon artisanale pour fournir un complément à l'usine de Mekla distante de 140 km qui fabriquait de la baryte de forage pour le secteur pétrolier .Les quantités extraites durant cette période s'élèvent à 6000 tonnes environ.

Vers la fin des années 80, L'ENOF à essayer d'intéresser une société japonaise puis une autre allemande spécialisées dans la Célestine et a commercialisé auprès de cette dernière un changement de 1500 tonnes environ. Le minerai enrichi à l'usine de Mekla par le procédé de jiguage n'a pas permis de dépasser les 89% en teneur et l'opération ne connut pas de suite [7].



Figure II.02 : Le gisement de la Célestine de Beni Mansour

II.4. Origine de gisement

Sous forme de nodules, de nids, parfois d'amas continus, la Célestine se rencontre en concentrations plus ou moins importantes dans les roches sédimentaires (dolomies, calcaires, argiles à gypse, marnes, etc.). Ses découvertes correspondent souvent à des étages bien déterminés de ces roches.

Elle a été décelée dans des organismes marins, en particulier dans des squelettes d'un groupe de radiolaire. Parfois, elle se retrouve dans des coquilles d'ammonites et d'autres fossiles comme résultat d'un dépôt postérieur. IL est vrai que l'on connaît de très rares mais typiques filons hydrothermaux de Célestine contenant de la galène, de la blende et autres sulfures .Elle s'observe dans les amygdales des roches ignées.

La célestine se rencontre assez fréquemment en concrétions dans les formations sédimentaires gypsifères du permien répondues en U.R.S.S dans la région d'Arkhangelsk de la haute et la moyenne Volga, la Bachkirie, la région d'Orenberg, etc. Elle est connue en de nombreux points de la région Transcaspienne, etc.

Parmi les gisements d'autres pays, on mentionne les grands gisements de Célestine dans les régions de Bristol(Angleterre), en Westphalie et à Waldeck(Allemagne) [13].

II.5. La distribution des teneurs

D'après les résultats des analyses de laboratoire qui à été faites par l'entreprise, les teneurs en Célestine sont régulières comme montre le tableau III.02. Certaines variations sont expliquées par la présence dans les corps de minerai de nombreux débris de stériles.

Tableau II.02 : Les teneurs moyennes pondérées en SrSO_4 [6].

Surface (Tranchées)									
N° Tr.	1	12	2	14	15	17	3	18	19
Teneur	69,87	73,88	82,49	64,82	63,60	73,37	76,32	65,43	64,27
N°Tr.	20	21	2	6	D1	4a	D ₃	5a	/
Teneur	81,7	59,37	48,83	61,52	83,7	65,96	78,3	81,75	/
Profondeur(Sondages)									
N°S.	9a	17	10	10a	6	11	13	5	4
Teneur	39,0	69,22	55,08	63,04	77,72	80,01	59,45	57,86	75,38
N°S.	12	16	15	3	1	/	/	/	/
Teneur	52,01	80,20	73,27	78,84	66,71	/	/	/	/

Les teneurs en SrSO_4 dans les blocs sont importantes, tandis que la différence de teneur entre catégories de réserves reste insignifiantes (Tableau II.03). La teneur moyenne pondérée en Célestine sur la totalité du gisement est 68,29%.

Tableau II.03 : Les teneurs en SrSO_4 dans les blocs de réserves [6].

Catégorie des réserves	Teneurs en SrSO_4%		
	Minimum	Maximum	Moyennes
B	63.60	73.05	68.42
C1	58.42	75.13	67.54
C2	59.77	81.75	69.56

Tableau II. 04 : Les teneurs en autres éléments associatives dans le gisement[6].

Elément	Teneur %		
	Minimum	Maximum	Moyenne
BaSO ₄	Traces	3.7	0.2-0.8
Gypse	1.03	10.38	4-5%
SiO ₂	1.2	9.7	1.8
Fe ₂ O ₃	0.1	15.69	0.8-0.3
CaCO ₃	15.0	61.0	23.0

II.6. La Composition minéralogique moyenne.

Le tableau suivant nous montre la composition minéralogique moyenne de la Célestine de Beni Mansour

Tableau II.05 : La Composition minéralogique moyenne de la Célestine de Beni Mansour [6].

Elément	Célestine	Calcite	Dolomie	marne	gypse	limonite	barytine	quartz
Teneur %	70,14	6	12	2	6	1,6	0.9	1.5

II.7. La Composition chimique moyenne (en%)

Tableau II.06 : La Composition chimique moyenne de la Célestine de Beni Mansour [6].

Elément	SrO	CaO	MgO	SiO ₂	BaO	Fe ₂ O ₃
Teneur %	39,55	7,57	2,6	2.6	0.59	1.26

II.8. Les études réalisées sur la Célestine de Beni Mansour

II.8.1. Laboratoire d'Alger 1971 :

Elle a porté 03 échantillons technologiques composites représentatifs de toutes les variétés de minerai rencontrés en surface et profondeur, enrichis par flottation et gravitation, après broyage, attrition et quartage.

- **gravitation :**

Les essais ont permis d'obtention d'un concentré à 91,7% de Célestine .Ce qui oblige de recourir à l'utilisation de HCL dilué pour atteindre des titres de 94,0% à 99,27% de SrSO₄.

- **Par flottation :**

Il a été obtenu des concentrés titrant 94,05% SrSO₄ [22].

II.8.2. Laboratoire du canada 1978.

Elle a été également porté sur 03 échantillons selon la teneur en SrSO₄ : forte (92,4%), moyenne (87,5%), faible (82,2%).

- **préparation des échantillons**

les échantillons concassés jusqu'à 2,5 cm dans un broyeur à marteau, les fractions obtenus ont été réduites jusqu'à une maille de 6 mm dans un concasseur à mâchoire.Ces dernières ont de nouveau été broyées jusqu'à 10, 20 et 200 micromètre en vue des analyses et essais d'enrichissements.

- **Analyse chimique : les méthodes utilisées sont**

- La différence gravimétrique pour le dosage de SrSO₄.
- La gravimétrie pour le dosage de SiO₂ et CO₂.
- L'absorption atomique pour le dosage de Ca, Mg, Ba, Al, Fe, Na, et K. [22]

II.9. La minéralogie

Macroscopiquement, la Célestine constitue le minerai principal sous forme de gros cristaux (1,5cm) ou de grains fins disséminés dans la gangue.

En lame mince, la Célestine se présente sous forme d'agglomérats cristallins de 0,1 à plusieurs mm .Les cristaux ont de nombreuses microcavités .La gangue est composée de dolomie et de la calcite avec de petites quantités de la séricine, quartz, pyrite et oxyde de fer.

-Par diffraction aux rayons X, il a été détecté, par ordre d'importance, les minéraux de Célestine, dolomite, calcite, quartz, oxyde de fer et Séricite [6].

II.10. Technologie d'exploitation

II.10.1. Paramétrés de tir

Les marnes et les roches qui sont des roches à faible résistances mécaniques et la Célestine qui est fragile et de faible dureté nécessitent moins un explosif brisant qu'un

explosif déflagrant qui lui, produit plus de gaz et qui est plus économique .L'utilisation de l'anfomil et donc retenue .L'utilisation de l'anfomil (qui craint l'eau) se justifie d'autant plus que la probabilité de présence d'eau dans le trop de mine est quasiment nulle.

Un explosif de la famille des nitrates (marmanite 2) sera utilisé comme charge amorçant. Les paramètres de tir qui sont déterminés ci-dessous pourront, comme dans toutes les mines, être réajustés à la lumière des résultats obtenus au cours des premiers mois d'exploitation. La charge amorçant est introduite en premier au fond de trou et fait partie de la charge de pied .

Enfin, on distingue trois parties dans le trou de mines : la hauteur de la charge de pied, la longueur de la charge intermédiaire et la hauteur du bourrage[23].

➤ **charge de pied :**

Elle est égale à $1,3 \times 1,6 = 2,08$ m composée d'une cartouche de marmanite 2 d'une longueur de 0,65 m et d'un poids de 1,250 Kg et de 1,43 m d'anfomil en vrac qui donne un poids de 3,9Kg. La charge total de pied est donc de $1,25 + 3,90 = 5,15$ Kg.

➤ **Bourrage :**

La hauteur du bourrage en haut de trou de mine doit assez réduite en minerais pour éviter la production de blocs à débiter par la suite car la granulométrie recherchée est de 0-400 mm avec une largeur de la banquette soit : 1 ,60 m.

➤ **Charge intermédiaire :**

Elle est en contact directe avec la charge de pied pour éviter de réamorcer et de toute façon, l'espace restant est limité. La longueur de la charge intermédiaire est donc égale à la hauteur du trou de mine moins la charge de pied et la hauteur de bourrage soit :

$$L = 6,06 - (2,08 + 1,60) = 2,38 \text{ m .}$$

Cette charge constituée uniquement d'anfomil représente un poids de 6,5 Kg. Le totale du trou de mine en explosif est de : $5,15 + 6,5 = 11,65$ Kg ce qui représente une consommation spécifique d'explosif de 176g /t en minerais. La consommation spécifique d'explosif dans les marnes sera de 179g/t. Dans les gypses, elle sera de 142g/t[23].

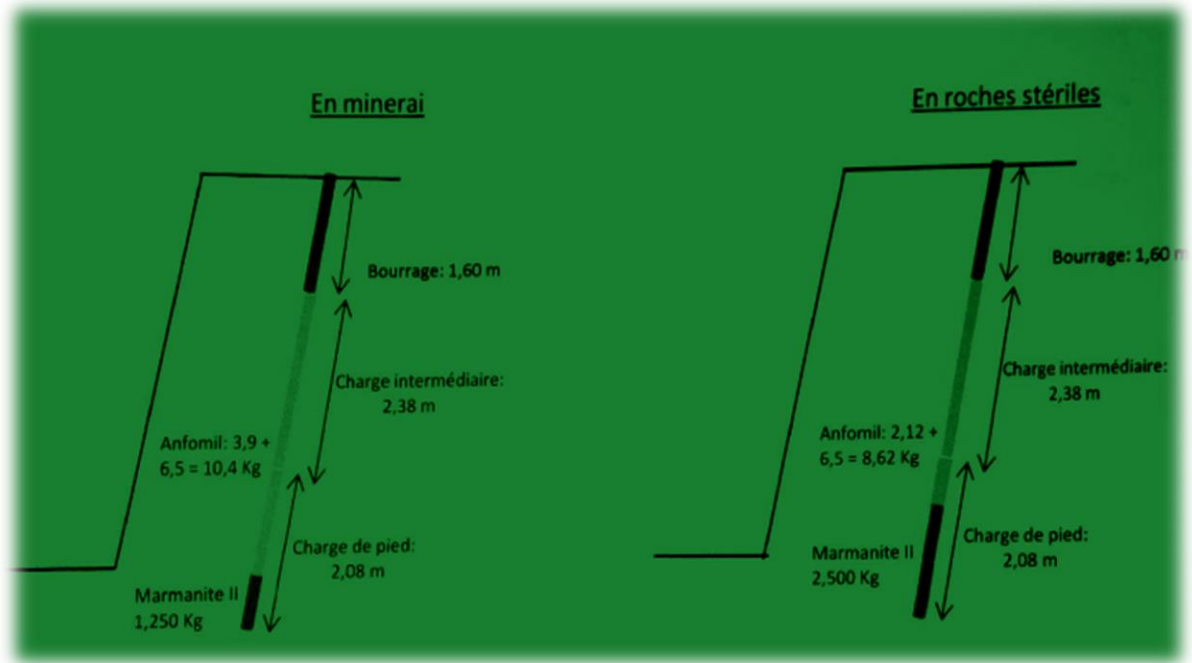


Figure II.03 : Le schéma de charge des trous de mine [23].

II.10.2. Amorçage et accordement

L'amorçage des charges explosives dans les trous de mine sera assuré par cordeau détonant de 12g relié à la cartouche de marmanite, il située au fond du trou .Les trous d'une même rangée seront reliés entre eux par cordeau détonant de 12g .L'amorçage des cordeaux détonant sera quant à lui assuré par des détonateurs électriques à microretard .Le croquis ci-dessous représente le schéma de raccordement pour un tir sur 3 rangées[24].

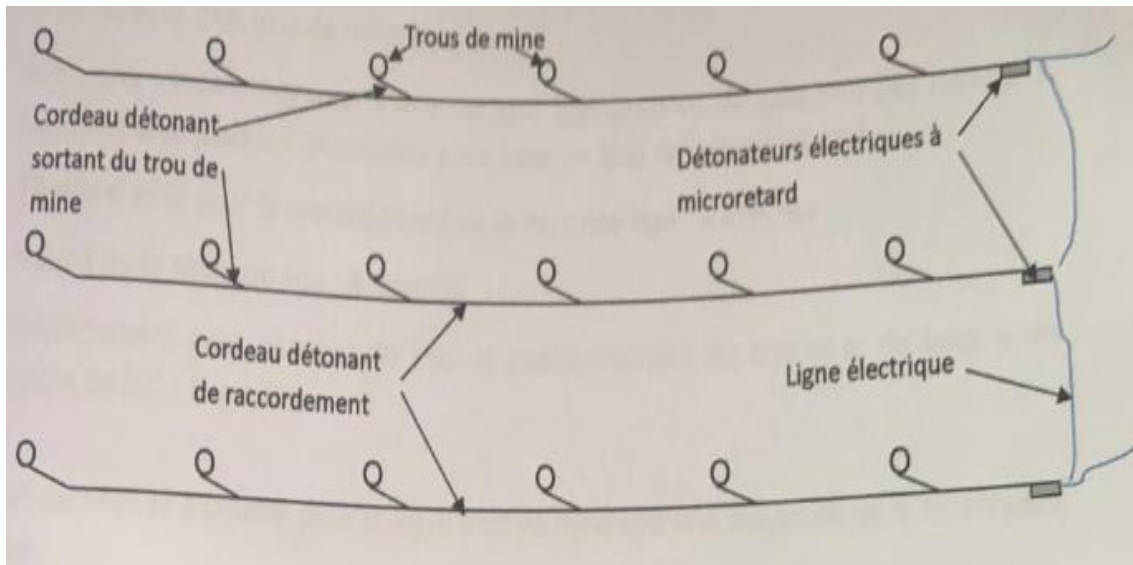


Figure II.04 : Le schéma de raccords des trous de mine [24]

II.10.3. Le chargement

La roche (minéral ou stérile) va se présenter, après le tir de mine, en un tas étalé le long du gradin sur une hauteur de 3 mètres et une largeur moyenne de 7m. Le produit foisonné et d'une granulométrie de 0-400 mm est repris par un engin de chargement et déversé sur camion. Les critères à prendre en considération sont :

- le volume adéquat du godet de la pelle (2,3 m³).
- La quantité de minéral et de découverte à extraire.
- Les dimensions de la machine.
- La hauteur de la benne du camion à charger.
- Le coût d'acquisition [24].

II.10.4. Le transport

Les produits chargés sur camions sont : soit livrés à l'installation de traitement mécanique, soit mis en stock près de celle-ci, soit transportés vers la décharge de stériles.

La distance moyenne de parcours pour le minéral est de 2 200 mètres, pour les stériles, elle est en moyenne de 600 mètres. Vu le poids volumétrique relativement élevée de la Célestine, la capacité de la benne exprimée en tonne est prépondérante, la capacité exprimée en m³ devient secondaire[24]

II.11. Conclusion

Le gisement de béni Mansour dispose de réserves minières appréciables avec de bonnes teneurs en Célestine. Son emplacement au sommet d'une crête est favorable en ce sens ou, le minerai affleurant largement, il permet d'avoir un faible taux de découverte, un accès facile vers les différents niveaux d'exploitation tout en causant aucun risque à l'environnement.

Le processus de production est de type classique, avec l'abatage à tir de l'explosif, le chargement par pelle et transport par camion.

Enfin, des recherches sont au cours d'avancement pour valoriser le concentré soit par lixiviation à l'acide chlorhydrique ou flottation indirecte à des taux qui dépassent 96%

CHPITRE III : Le traitement de la Célestine de Beni-Mansour

III.1. Introduction :

Le traitement des minerais est aussi ancien que la civilisation humaine. Le traitement et la valorisation des ressources minérales englobent l'ensemble des étapes qui se situent entre l'exploitation des gisements et l'obtention d'un produit marchand. La discipline associée s'appelle 'la minéralurgie'. Elle englobe donc toutes les étapes de l'extraction minière à l'extraction finale du produit marchand. Elle s'intègre entre l'exploitation des mines et la métallurgie (dans le cas de minerais métalliques) ou la vente des charges minérale, elle consiste à séparer les différents minerais contenus dans un minerai pour collecter sa partie utile. Pour ce faire, le minerai subit des différents procédés de traitement impliquant des techniques physique et chimique. Il sera ensuite prêt à traité par voie métallurgie (traitements thermique et chimique) afin d'obtenir des métaux et des alliages [15].

La célestine est largement utilisée dans les différents secteurs industriels pour ses propriétés particulières. Son usage principal est comme fluide dense utilisée dans les forages pétroliers et gaziers. La célestine est à la base de fabrication des divers composée du strontium. Le principal procédé de transformation dénommé « Black Ash » consiste dans un premier temps à transformer la célestine en sulfure de strontium [14].

La plupart des minerais de valeur (métalliques ou industriels) sont évaluées en fonction de leur pureté. Après la libération par réduction et avec un contrôle de la dimension des particules (concassage, broyage, criblage), tous les impuretés peuvent être séparées . En fonction de leurs propriétés, ils peuvent être séparés par différents méthodes de valorisation (la séparation gravimétrique, la séparation magnétique, la flottation, la séparation électrostatique, les méthodes chimiques et méthodes biologiques)[15].

III.2. L'ensemble de processus d'enrichissement de la Célestine

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 célestine.

Des essais d'enrichissement avaient déjà été réalisé dans le passé par Hazen Research en 1978 (essais d'enrichissement par liqueur dense, flottation, tables à secousses, lavage sur crible). Les meilleurs résultats ont été obtenus par les tables à secousses qui ont permis d'obtenir un concentré titrant 53,58% de SrO avec un taux de récupération de 70%, même

essais été réalisé par Bumigeme en 2012, et il a obtenu le meilleur résultat par les tables à secousse avec un concentré plus de 56% de SrO mais avec un taux de récupération de 53.5%. Ces essais ont montré que les meilleurs résultats étaient obtenus par les tables à secousses qui s'avèrent en outre le procédé le plus économique en raison de coûts d'acquisition et de fonctionnement relativement faible [25].

III.3. La méthode de traitement de célestine à Beni-Mansour

III.3.1. Traitement mécanique

Cette installation a pour objet de conférer au minerai une granulométrie appropriée pour enrichissement par voie humide.

La granulométrie finale du produit concassé-broyé sera du 0 à 2 mm telle que déterminée par les différents laboratoires.

A l'effet d'assurer à l'installation une régularité dans son fonctionnement et une certaine autonomie par rapport à la carrière, un stock de tout venant d'au moins 1200 tonnes qui correspond à une semaine de travail devra toujours être disponible en tête de station [25].



Figure III.01 : L'hydro-cyclon de rejet et de concentré respectivement de Beni Mansour.

III.3.1.1. Le principe du traitement par voie sèche

- minerai extrait de la carrière avec une granulométrie 0-400 mm est diverse par les camions sur un alimentateur à tablier métallique équipé de rehausses pouvant emmagasiner 15 m³.
- le produit passe ensuite directement sur un concasseur à percussion qui le réduit à de 0 à 100 mm
- Le 0 à 100 mm passant est dirigé vers un crible pour contrôler la granulométrie et passer les particules inférieures à 50 mm vers un broyeur, et les supérieurs à 50 mm ils seront retenus vers le concasseur pour avoir la taille nécessaire. On a utilisé un broyeur a marteaux pour libérer le minerai jusqu'à une sortie de 2 mm, Avant de passer par un broyeur ont besoin d'un bruleur pour séché le minerai. En suit lors de la sortie de broyeur est dirigé directement vers une trémie de stockage (25 m³), par un bande transporteuse (tp6) [25].

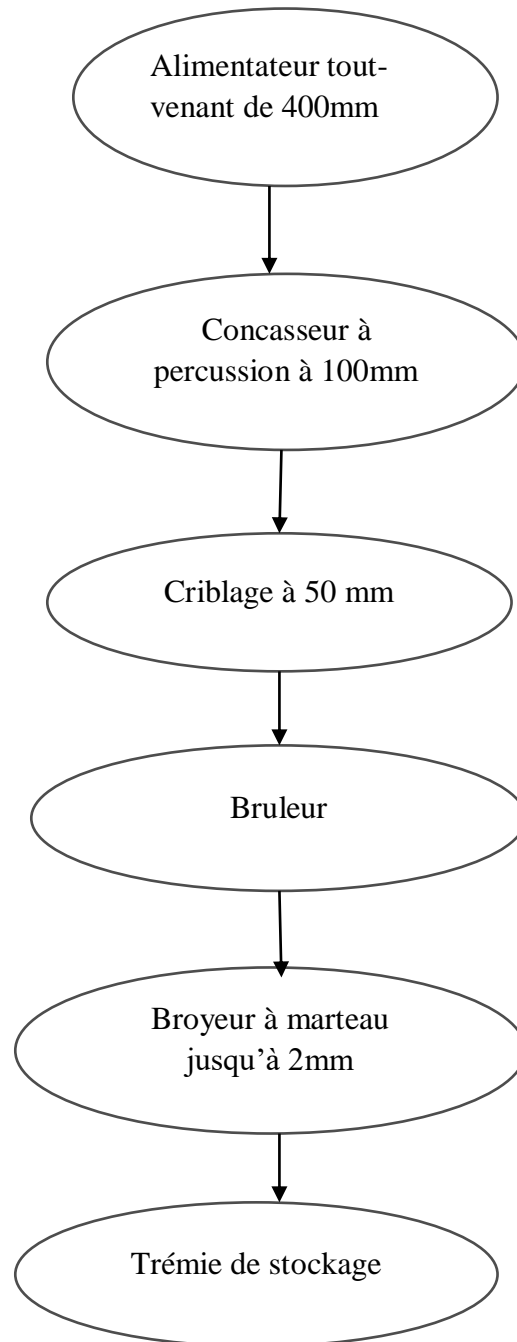


Figure III.02. : Schéma technologique de la préparation mécanique de la Célestine.

III.3.1.2. Principe de la séparation par voie humide

La Célestine broyée à (0-2) mm est dirigé directement dans une cuve de mise en pulpe avec un pourcentage, de 40% de solide et de 60% de liquide(l'eau recyclé + l'eau claire), le minerai sera pompée avec une pompe à pulpe vers un hydro-classificateur qui se trouve en niveau haut, pour une séparation par dimension en cinq tranches granulométrie (0-0,25),(0,25-0,4),(0,4-0,63),(0,63-1),(1-2). Prenons compte des paramètres fonctionnelle qui permet une

meilleure séparation granulométrique tels que le débit d'alimentation en pulpe (surtout la densité de de la pulpe), le débite d'alimentation d'eau (la pression d'eau aussi elle joue un rôle très importants dont l'eau ascendant à une pression pour chaque chambre d'hydro classificateur pour que les fins passe d'une chambre à l'autre et la tranche granulométrie souhaiter passe vers les distributeurs rotatifs, qui partagent le minerai vers les tables à secousses selon les granulométrie désigne

- Une pulpe brute (minerais en suspension dans l'eau) est dirigé vers les table à secousses qui permet avec ces riffles longitudinales de séparer les produits lourds et les légers sautent des riffles, les grains lourds disposée entre les riffles avancement jusqu'à l'extrémité ou ils seront évacuées dans l'angle de table opposée à l'arrivée de la pulpe grâce à un mouvement longitudinales imprimée ou plateaux.
- La fraction lourd qui constitue les concentrés des tables (célestine enrichie) est également récupérée par des conduits métallique et acheminée vers un hydrocyclone pour la débarrasser d'une grande partie de l'eau contenue qui seront récupérer au bassin de décantation par un canal et pompe absorbante. Le minerai marchand égoutté est mis en stock à l'aide d'un chargeur sur pneus. L'aire de stockage du concentré en vrac aura une capacité d'au moins 2000 tonnes qui un minimum pour le chargement d'un minéralier.[26]

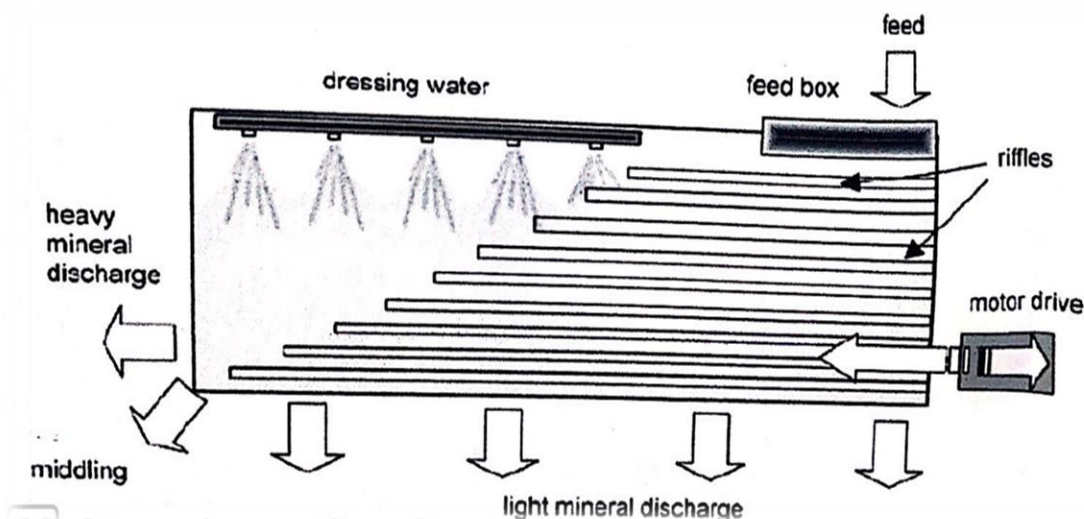


Figure III.03. : Schéma illustratif de mode de fonctionnement de table à secousse [21].

Le schéma de traitement ci-après en donne l'illustration de l'ensemble du process.

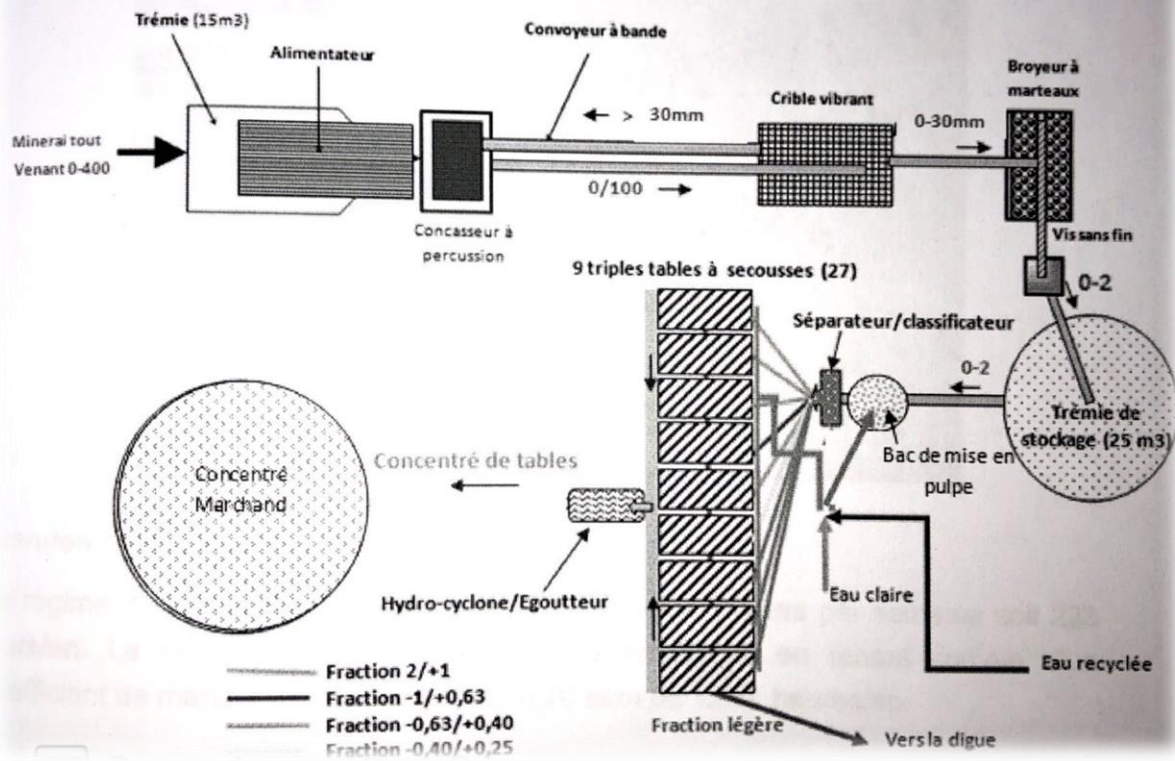


Figure III.04. : schéma de l'ensemble de processus de traitement du Célestine [27]

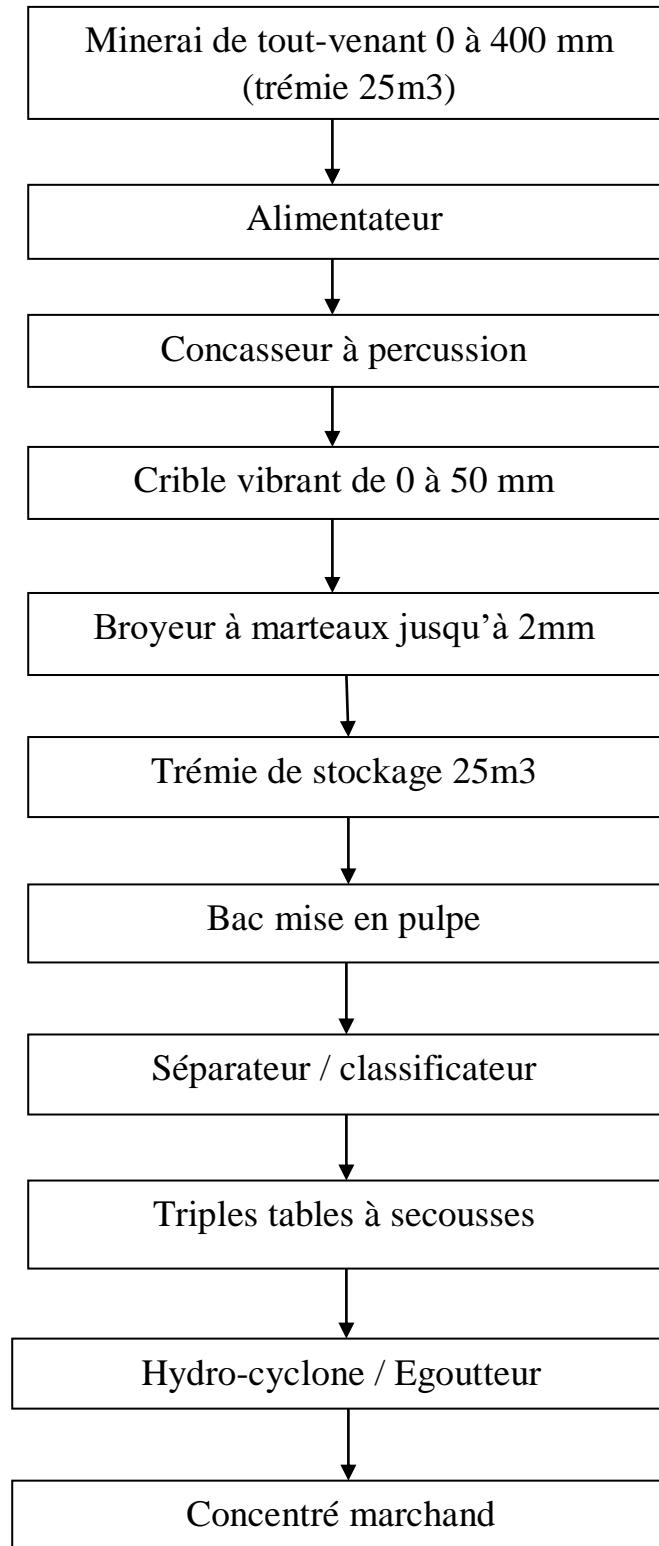


Figure III.05 : Schéma technologique de processus de traitement du Célestine

II.4. Conclusion

En général, après l'extraction du minerai une préparation mécanique (concassage, broyage) est nécessaire pour sa réduction granulométrique jusqu'à atteindre la maille de libération. Cette opération suivie par un criblage destiné à obtenir les granulométries nécessaire aux procédés de traitements.

Le choix de la méthode de traitement du minerai dépend de plusieurs facteurs, tels que : le type, la composition chimique et minérale, la finesse, du minerai. Méthode la plus courante la séparation gravimétrique est utilisée (milieux denses, spirales, table à secousse...), séparation magnétique, flottation, séparation électrostatique, traitement chimique et bio-minéralisation. Les méthodes d'enrichissement les plus utilisées sur la célestine est la séparation gravimétrique (table à secousse) celle qui donne un produit très riche avec peu de pertes.

CHAPITRE 04 : Méthodes et matériels

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, le but est de présenter les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation et l'enrichissement de la Célestine de Beni-Mansour. 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 physico-chimiques. Elle repose principalement sur la distribution granulométriques des particules, 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 comprend la détermination des différentes espèces minérales constitutives du minerai de la Célestine de Beni-Mansour, Cette étude nous permettrons d'orienter notre étude de caractérisation, et d'étudier les paramètres d'une bonne méthode d'enrichissement, et de comprendre l'influence de la granulométrie sur le degré de la séparation. A cet effet, diverses analyses ont été effectuées par exemple :

- Analyse granulométrique (AG)
- La Fluorescence X (FX)
- Le Diffractomètre à Rayons X (DRX)

IV.3. L'échantillonnage

L'échantillonnage est défini comme un processus dans lequel une partie extraire une substance, un matériau ou un produit pour fournir un échantillon représentatif tous ont été utilisés à des fins analytiques .Il utilise la substance métallique est enveloppée dans plusieurs couches de papier et de nylon pour éviter toute pollution éventuelle. Les points sélectionnés impliquent des affleurements rocheux principales unités géologiques de la zone d'étude.

Les principales étapes de caractérisation du processus d'échantillonnage sont développer par une stratégie d'échantillonnage pour collecter des échantillons sur le terrain, conservation des échantillons et leur préparation pour diverses analyses et méthodes de traitement. La valeur de la caractérisation des résultats dépend de la mise en œuvre

suffisant pour effectuer toutes ces étapes. Les stratégies d'échantillonnage sont intrinsèquement basées sur la quantité ainsi que le nombre d'échantillons et la sélection des points de prélèvement d'échantillons (nombre et lieu). La représentativité de l'échantillon dépend largement de choix effectués [4].

IV.3.1. Le prélèvement de l'échantillon

L'échantillonnage est réalisé sur le terrain au niveau du gisement de la Célestine de Beni-Mansour, exactement par la société privé SARL TBRHO FRERES ZERGOUN.

IV.4. La préparation mécanique des échantillons

Les échantillons ont été fournis par l'entreprise SARL TBRHO FRERES ZERGOUN, ensuite, une préparation mécanique à lieu au niveau de laboratoire de l'université de Bejaia (LTMGP), pour réaliser ce travail, on a suivi l'organigramme présenté dans la figure IV.01, ce dernier est commencer par un concassage suivi par un tamisage, puis l'essai d'enrichissement par l'hydro-cyclonage, afin de réaliser ce protocole les échantillons seront préparer pour les analyse physico-chimique (FX, DRX) et analyse granulométrique.

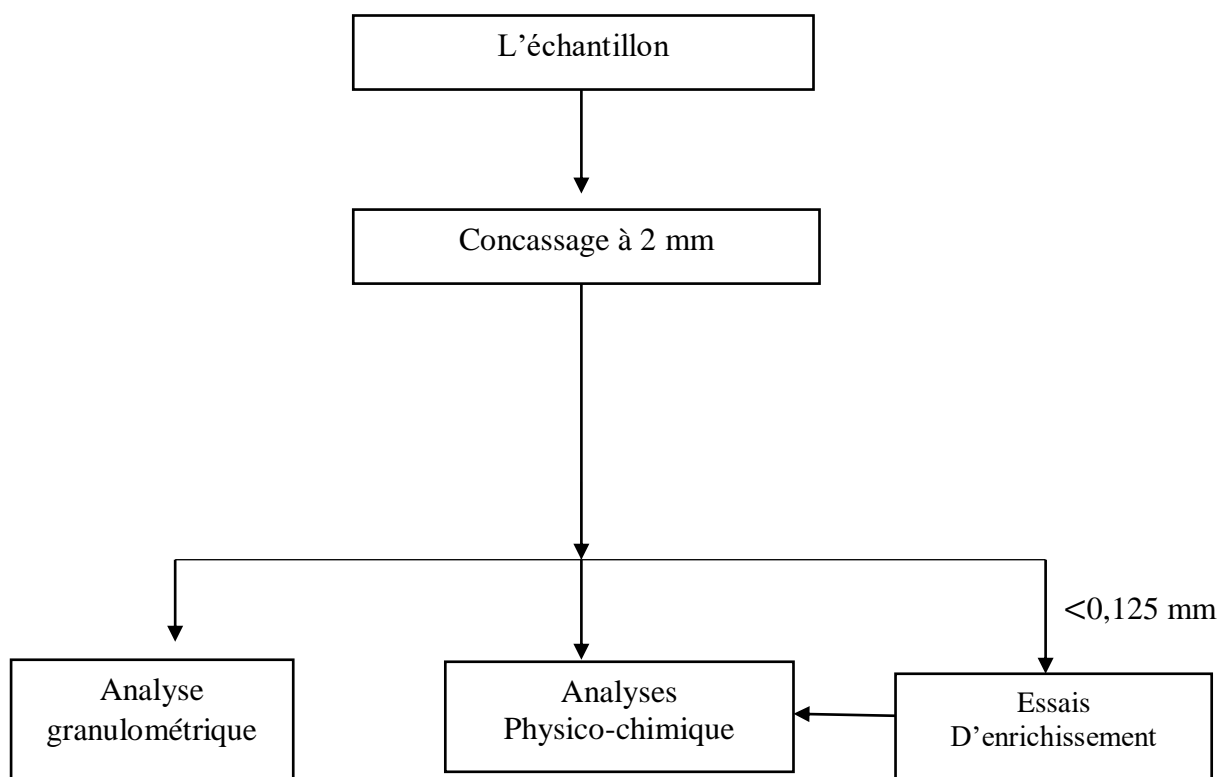


Figure IV.01. : Le protocole de la préparation des échantillons

IV.4.1. Concassage

C'est un traitement mécanique qui sert à réduire les dimensions de la matière première à une granularité de l'ordre de quelques millimètres. On a utilisé un concasseur à mâchoire de type FRITSCH qui est disponible au niveau de laboratoire de minéralurgie du département des mines et géologie[27] Le concassage ne permis pas de réduire les diamètres des grains de différents échantillons jusqu'à un diamètre inférieur à 2mm. Généralement la fragmentation par concassage est suivie par une opération de séchage et de broyage pour une préparation des échantillons aux différents analyses subséquentes telles que l'analyse granulométrique[1].



Figure IV.02.: Le concasseur à mâchoire de type de laboratoire.

IV.4.2. Homogénéisation et quartage

Le quartage est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon. Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation qui est un procédé mécanique qui consiste à mélanger les échantillons de minerai de fer et le rendre homogène par transformation en quatre quarts égaux, dont on prélève deux quarts opposés les deux autres seront gardés comme témoins. C'est une opération de réduire le poids de l'échantillon pour l'analyse. Ce procédé obéit à la loi de RECHARDSE donnée par la relation suivent [28] :

$$Q_i \geq Kd^2; m \leq Q_i/Kd^2 \text{ et } m=2^n.$$

Avec ;

Q :Quantité de l'échantillon à préparer dans l'étape considérée.

K : Coefficient de la préparation de la minéralisation (pour un échantillon hétérogène $K=0,5$ et pour un échantillon homogène $K=0,1$).

d :Diamètre de plus gros grain, n :Nombre de quartage et m : masse déterminant le nombre de quartage utilisé comme moyen de vérification.

Le quartage à été appliqué sur une quantité de 8 kg de minerai tout-venant à l'aide d'un diviseur , qui doit la séparer en deux partie égaux, puis nous allons étale notre minerai sur un plan pour former une galette circulaire et le partager en quatre partie, on élimine deux fraction et réunit d'autres fraction opposées, nous allons suivi le même processus jusqu'à l'obtention d'une masse de 500g.

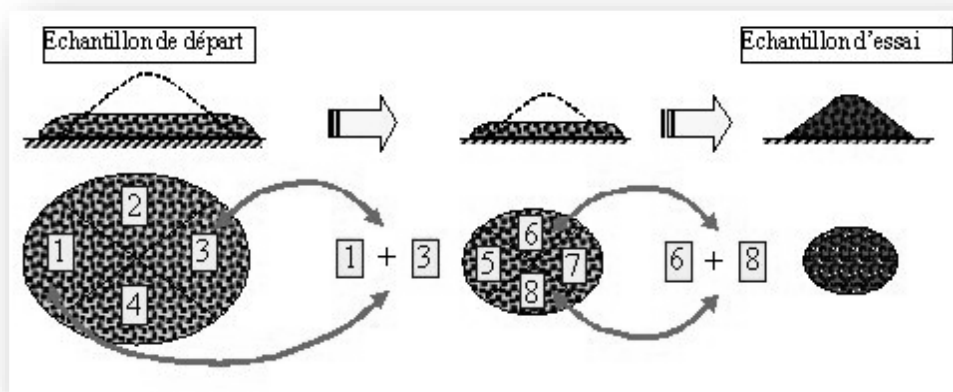


Figure IV.03: Les étapes de la réalisation de quartage[28].

IV.4.3.Analyse granulométrique

C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en utilisant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension, ce type d'analyse vise habituellement à évaluer dans quelle tranche granulométrique, le degré de libération est important[29].

Lors des essais de tamisage, la série des tamis sélectionnés de norme AFNOR (NF-ISO 3310-2) et empilée verticalement selon une taille des ouvertures de tamis qui décroît de haut en bas. Pour la première manipulation ,un échantillon d'une masse de 500g kg est introduit sur une série de 7 tamis (2mm;1mm ; 0,71mm ; 0,5mm ; 0,250mm ; 0,125mm ;

et < 0.125). La pile de tamis est soumise à un mouvement de secousse horizontale par une tamiseuse. L'échantillon est tamisé pendant 30 minutes avec une amplitude de 5A.



Figure IV.04 : Tamiseuse automatique de laboratoire

Le Facture de courbure et Facture d'uniformité sont données par les relation suivants :

➤ **Facture de courbure :**

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}).$$

➤ **Facture d'uniformité :**

$$C_u = D_{60} / D_{10}. [29]$$

IV.4.4. Essai par l' hydrocyclone

IV.4.4.1. Définition

Les hydrocyclones sont des appareils statiques de forme cylindro-conique ou cylindrique dans lesquels l'effluent est injecté tangentiellement sous pression dans leur partie cylindrique .La classification par hydrocyclones est un procédés de classement des particules basé sur leur réponse à un fluide en mouvement, à leur vitesse de sédimentation dans un fluide sous l'action d'une accélération centrifuge.

Un hydrocyclone est un dispositif qui assure la séparation boues/micro sable, les boues, plus légères, partent en surverse et sont évacuées vers les unités de traitement des boues, tandis que les micro sables, plus denses, sont réinjectés dans le bassin de floculation via la souverse de l'hydrocyclone et participe à la formation de nouveaux floes [30].

- Pour réaliser notre étude, une quantité de 1kg de la poudre de la Célestine d'une granulométrie <0,125mm à été mélangé avec un volume de 20L d'eau, soit un rapport de solide en masse de (%Sm= 4.76%), la pulpe obtenus à été introduite dans la partie cylindrique de l'hydrocyclone , l'appareil à été réglé à une pression de 1.5bar , pendant 15 min ,le débit d'alimentation à été stabilisé à 100L/min.

Le débit à la souverse et à la surverse sont calculés par :

$$Q_1 = V_1/t_1$$

$$Q_2 = V_2/t_2$$

Avec :

Q_1 : le débit de souverse

Q_2 : le débit de surverse

V_1 : volume de pulpe récupérer dans réception de souverse

V_2 : volume de pulpe récupérer dans réception de surverse

t_1 et t_2 : la durée de remplissage des récupérer un volume de 10L de souverse de et un volume de 8L de surverse respectivement .

Deux échantillons de 400ml ont été prélevés de chaque fraction (souverse, surverse) ,pour objective de calculer les % solides en masse.

$$\% \text{ Solide en masse (Sm\%)} = [M \text{ solide } / (M \text{ solide } + M \text{ liquide })].$$

Après une décantation pendant 4h et une filtration pour éliminer la phase liquide de la pulpe ,les échantillons ont été séchés dans une étuve de marque memmert 100-800 pendant 24h à une température de 90 C°, après le séchage les produits obtenus ont été pesés à l'aide d'une balance. Cette étape à été réalisée au niveau du laboratoire des procédés minéralurgies (labo 24) de l'université de Bejaia à l'aide d'un Hydrocyclone de type de laboratoire marque HARTON Anlagentechnik GmbH Ahornweg 13.



Figure IV.05. : L'hydrocyclone de type de laboratoire .

IV.5. Méthodes de caractérisation

La prochaine étape dans la caractérisation consiste à déterminer la composition en oxyde et éléments du minerai de la Célestine. Pour atteindre cet objectif une série de caractérisations sont effectuées, telle que :DRX, FX, , à partir de cette étape nous pouvons envisager une méthode de valorisation selon la granulométrie la plus riche en élément utile . [33],[34][1]

IV.5.1. Caractérisation minéralogique par diffraction à rayon X

IV.5.1.1. Définition de la DRX

C'est 'une méthode d'analyse minéralogique des matériaux cristallisés, elle' appliquée sur des poudres ou des échantillons massifs. Elle sert à la détermination de la nature des éléments des phases minérales et leurs quantifications. [28]

IV.5.1.2.Principe de l'analyse

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde ($0,1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon orienté ou non. On utilise un rayonnement électromagnétique en cuivre dont la longueur d'onde est $\text{Cu K}\alpha = 1,542 \text{ \AA}$. Ce rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. Si l'on calcule les directions dans lesquelles on a du signal, on s'aperçoit que l'on obtient une loi très simple : si l'on trace des plans imaginaires parallèles passant par les atomes, et si l'on appelle d la distance entre ces plans (ou distance interréticulaire), alors les interférences sont constructives si :

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot (\sin\theta) \dots \text{Loi de Bragg}$$

Où

θ est l'angle de rayon incident ,

n est un nombre entier appelé «ordre de diffraction»,

λ est la longueur d'onde des rayons X[35].

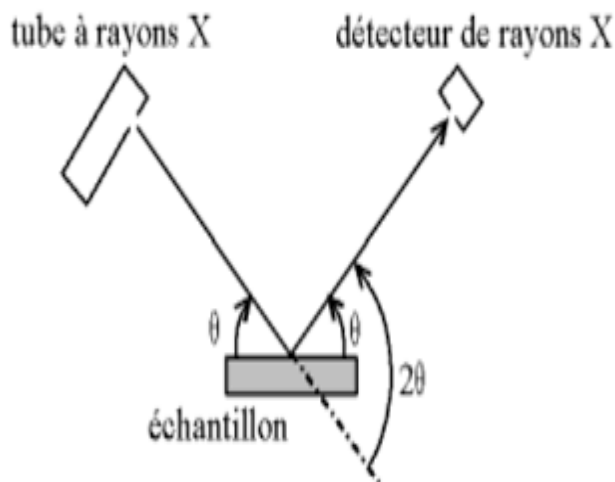


Figure IV.06. : Principe de l'analyse par DRX [35].

L'analyse minéralogique par DRX a été effectuée sur des échantillons obtenus après l'analyse granulométrique et la classification par l'hydrocyclone au niveau plateau technique de l'université de Bejaia à l'aide d'un diffractomètre PANALYTICAL EMPYREAN (figure IV.08). Les échantillons caractérisés par DRX sont :

Les fractions granulométriques ($0,5\text{mm}, 0,250\text{mm}$, $0,250\text{mm}, 0,125\text{mm}$, $0,125\text{mm}, 0\text{mm}$ (le fond de tamis.)) ; la surverse, et la soverse .



Figure IV.07 : diffractomètre à rayons X

IV.5.2. Analyse chimique par fluorescence des rayons X

IV.5.2.1. Définition :

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse élémentaire, donc permet de déterminer les concentrations en éléments purs. Cependant, les éléments sont souvent présents sous la forme de composés (molécules, cristaux polyatomiques) dans le matériau initial. Il peut donc être souhaitable de présenter des pourcentages de composés plutôt que d'éléments. On exprime par exemple souvent des concentrations en oxyde, en particulier en géochimie ou pour les ciments[36].

IV.5.2.2. Principe de fonctionnement

Quand un matériau est soumis à un rayonnement de faible longueur d'onde et donc de forte énergie, comme les rayons X, les rayons gamma ou bien un faisceau d'électrons ou d'ions suffisamment accélérés, les atomes constituant le matériau peuvent subir une ionisation, c'est-à-dire qu'un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés des couches électroniques (on parle aussi d'orbitales atomiques) de chacun de ces atomes

Le rayonnement fluorescent peut donc être analysé de façon équivalente en énergie par le logiciel d'analyse, à partir des concentrations en éléments et des formules chimiques on parle d'analyse dispersive en énergie ou en longueur d'onde. Le spectre du matériau analysé est l'intensité du rayonnement en fonction de l'énergie, généralement exprimée en électronvolts

(eV) ou en longueur d'onde. C'est un outil puissant pour l'analyse chimique élémentaire, branche de la chimie analytique [35].

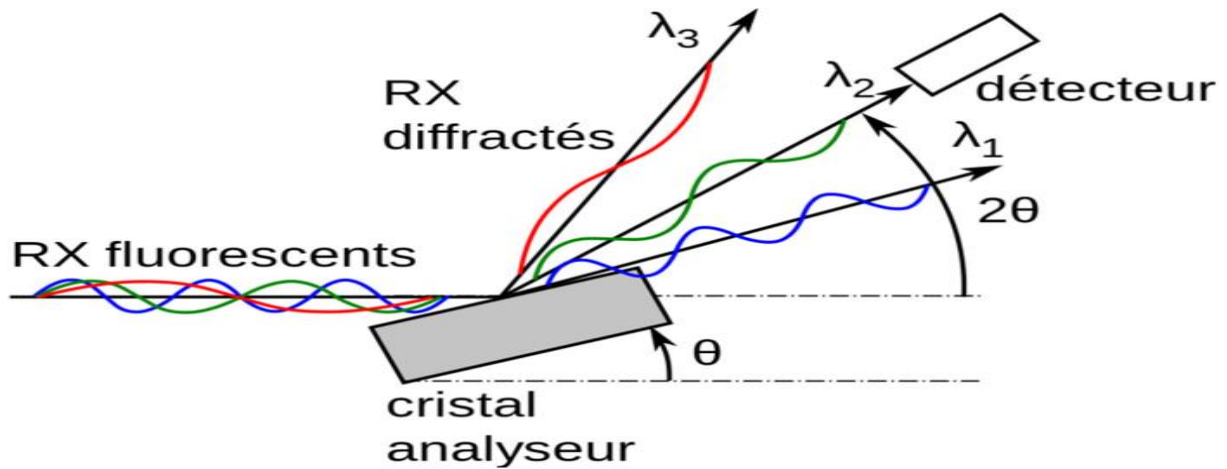


Figure IV.08 : Principe de base de l'analyse par FX[36].

Les analyses chimiques (FRX) ont été réalisées au plateau technique de l'université de Bejaia à l'aide (figure IV.10.) l'aide d'un spectromètre à FX à dispersion de longueur d'onde (WDXRF) de marque SciAps. Les échantillons caractérisés par DRX sont :

Les fractions granulométriques ($]0.5\text{mm}, 0.250\text{mm}[$, $]0.250\text{mm}, 0.125\text{mm}[$, $]0.125\text{mm}, 0\text{mm}[$ (le fond de tamis.) ; la surverse, et la soverse .



Figure IV.09 : Spectromètre à fluorescence X .

IV.6. Conclusion

Avant de procéder à une analyse quelconque d'un minerai solide , il est nécessaire de préparer l'échantillon en lui faisant un traitement mécanique qui est la phase la plus délicate pour la représentativité des échantillons destinés à l'analyse. Les méthodes d'analyse présentés dans ce chapitre ont pour but de :

- Déterminer la composition minéralogique des échantillons et les fractions granulométriques sélectionnées par DRX.
- Obtenir les concentrations des éléments utiles et nuisible inclus dans ce minerai.
- déterminer la fraction granulométrique la plus riche en élément utile .

CHAPITRE 05 : Résultats et discussions

V.1. Introduction

Ce chapitre, est Consacré à la présentation des résultats obtenus par la caractérisation de la Célestine de Beni Mansour. Pour atteindre notre objectif il faut d'abord interprètes les résultats de l'analyse granulométrique puis les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de la Célestine.

V.2. Résultats de l'analyse granulométrique

Les résultats d'analyse granulométrique par tamisage de l'échantillon sont présentés au tableau V.01. et sous forme de courbe granulométrique (figure V.01.)

.Tableau .V.01 : les résultats de l'analyse granulométrie du minerai tout-venant

Masse tamis (g)	Masse tamis remplis (g)	D en mm	Masse du refus (g)	% rendement pondéral refus	% rendement cumulé de refus	% rendement cumulé de tamisât
401,70	408,9	>2 mm	7,2	1,45	1,45	98,55
378,24	521,19	]2;0,75]	142,95	28,85	30,30	69,70
415,6	547,3	]0,75 ;0,5]	131,7	26,58	56,88	43,12
403	443,25	]0,5 ;0,25]	40,25	8,12	65,01	34,99
378,01	526,91	]0,25 ;0,125]	148,90	30,05	95,06	4,94
340,15	364,65	]0,125 ; 00[	24,50	4,94	100,00	0,00
		Totale	495,5	100		

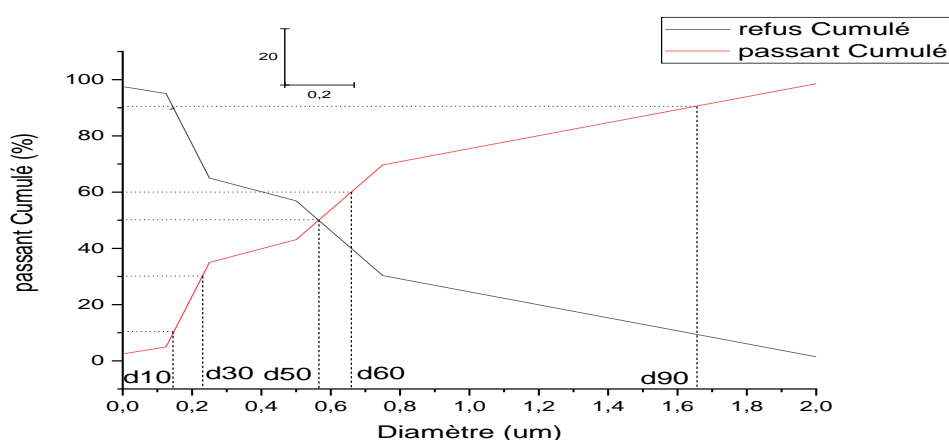


Figure .V.01 : Courbe du pourcentage pondéral (passants/refus) tout venant.

Les diamètres d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%,30%,50%,60% de tamisât .ils représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de :10%,30%,50%,60% du matériau de départ.

D'après la courbe de tamisât cumulé on a obtenu :

$$d_{10}=0,144\text{mm} ; d_{30}=0,229\text{mm} ; d_{50}=0,564\text{mm} ; d_{60}=0,658\text{mm} ; d_{90}=1.657\text{mm}.$$

On calcule après le coefficient de HAZEN (C_u) et le coefficient de courbure pour savoir l'état de notre matière :

$$C_u=D_{60}/D_{10}=4,57.$$

$$C_c=(D_{30})^2/D_{10}*D_{60}=0,55.$$

La courbe des passants cumulés présente une allure concave tournée vers le haut cela s'explique le fait que :

Le coefficient d'uniformité d'HAZEN (C_u) est très grand [$C_u=4,57>2$], c'est-à-dire 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.

Le coefficient de courbure (C_c) étant inférieure à [1 ;3], cela s'explique par le fait que la granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

V.3. Résultats de la concentration par l'hydrocyclone

Les débits de solide et liquide obtenus dans l'hydro-cyclone sont présenté dans tableau .V.02.Le débite de la pulpe dans l'alimentation est de 100L/min.

Tableau. V.02 : les résultats des débits de sous verse et de sur verse.

	Volume (L)	Temps (min)	Débit (L/min)
Sous verse	10	2,53	3,95
Sur verse	8	4	2

D'après les Tableau V.02, on constate que le débit dans la souverse et presque 2 fois le débit dans la surverse .

Les résultats des % en masse du solide obtenus par hydro-cyclone (soverse et surverse) sont présentés dans le Tableau .V.03 :

Tableau. V.03: La concentration en matières solide dans la soverse et la surverse.

	Volume (L)	Masse (g)	% solide en masse
Souverse	0,4	10,49	26,225
Surverse	0,4	2,45	6,125

D'après les résultats de Tableau V.03, on constate que % solide en masse (%Sm) est plus élevé dans Souverse qui est de 26.225% presque 4.5fois sa valeur dans la surverse ,les résultats de ces deux tableaux nous donne une bonne séparation .

V.4.Analyses minéralogique et chimique

V.4.1. Caractérisation minéralogique par (DRX)

Les résultats d'analyse minéralogique par DRX pour les différents échantillons sont montrés par les diffractogrammes suivants :

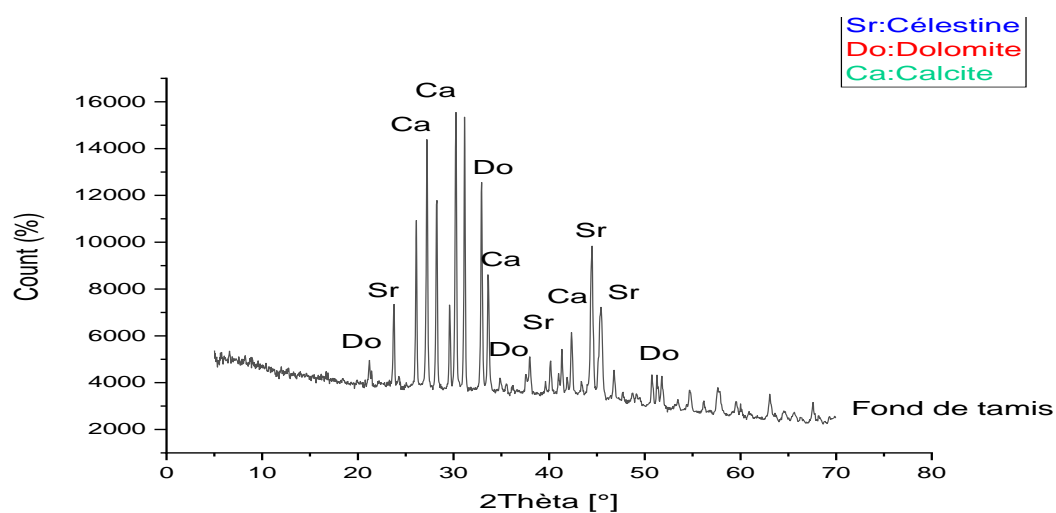


Figure V.02: Diffractogramme par rayon X pour l'échantillon fond de tamis.

Le diffractogramme (DRX) nous montre que l'échantillon est composé essentiellement de la Dolomite (Do), de la Célestine(SrSO_4),et de la calcite (CaCO_3) . Selon les résultats de L'analyse quantitative, la Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) est la principale phase minéralogique, elle représente 70% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX de cet

échantillon nous montre les réflexions de la Dolomite vers $21.30^{\circ}2\theta$, $33.61^{\circ}2\theta$, et $37.81^{\circ}2\theta$ et $57.76^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $32.79^{\circ}2\theta$. La Célestine est la phase visée dans cette analyse elle représente 24% de la totalité de l'échantillon, d'après ce spectre la Célestine est détectée à des réflexions de $23.56^{\circ}2\theta$, $38.52^{\circ}2\theta$, et $46.89^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $44.46^{\circ}2\theta$. La calcite est la phase mineure dans notre échantillon avec une quantité de 6% les raies de diffraction observées dans ce spectre relativement à la calcite sont respectivement de $27.24^{\circ}2\theta$, $29.98^{\circ}2\theta$, et $42.33^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $29.53^{\circ}2\theta$.

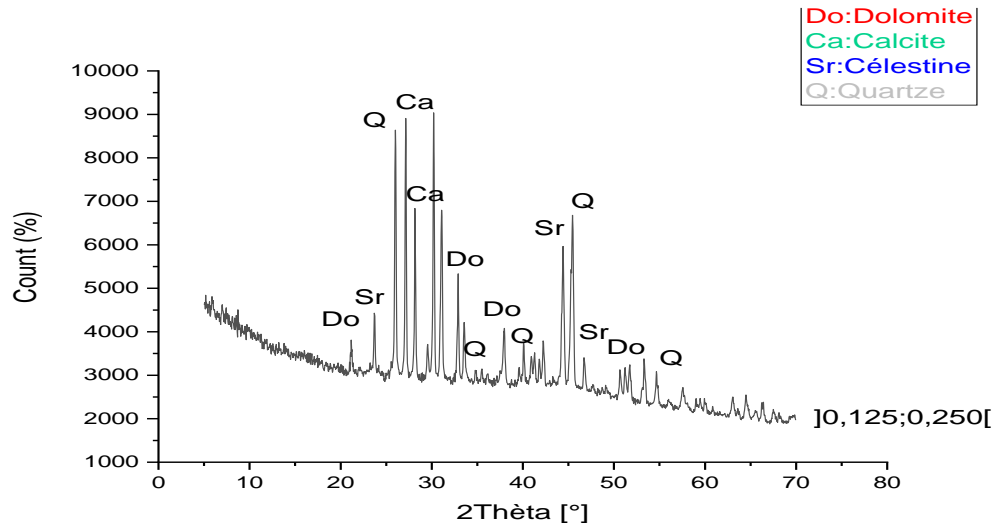


Figure V.03: Diffractogramme par rayon X pour la fraction]0.125mm ; 0.250mm[.

Le diffractogramme (DRX) nous montre que la Fraction]0.125mm ; 0.250mm[est composé essentiellement de la Dolomite (Do), de la Célestine (SrSO_4), et de la calcite (CaCO_3) et de Quartz (Q). Selon les résultats de l'analyse quantitative, la Dolomite est la principale phase de l'échantillon, elle représente 41% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX de la Fraction]0.125mm ; 0.250mm[de la Célestine nous montre les réflexions de la Dolomite vers $21.18^{\circ}2\theta$, $37.94^{\circ}2\theta$ et $53.32^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $30.22^{\circ}2\theta$. La Célestine est la phase visée dans cette analyse elle représente un pourcentage plus élevé que celle enregistré dans le fond de tamis avec une quantité de 26% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX de la Fraction]0.125mm ; 0.250mm[de la Célestine (SrSO_4) nous montre les réflexions de la Célestine vers $23.71^{\circ}2\theta$, $37.94^{\circ}2\theta$, et $46.71^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $44.41^{\circ}2\theta$. En plus des phases minérales observées dans le fond de tamis, le quartz SiO_2 représente 17% de cette fraction, le spectre DRX de cette phase donne des réflexions vers $20.81^{\circ}2\theta$, et $26.64^{\circ}2\theta$, et $34.82^{\circ}2\theta$. La Calcite (CaO) est la phase mineure dans notre échantillon avec une

quantité de 16%. Le spectre DRX du fond de tamis de La Célestine nous montre les réflexions de la Calcite vers $27.14^{\circ}2\theta$, $29.54^{\circ}2\theta$, et $40.92^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $29.54^{\circ}2\theta$.

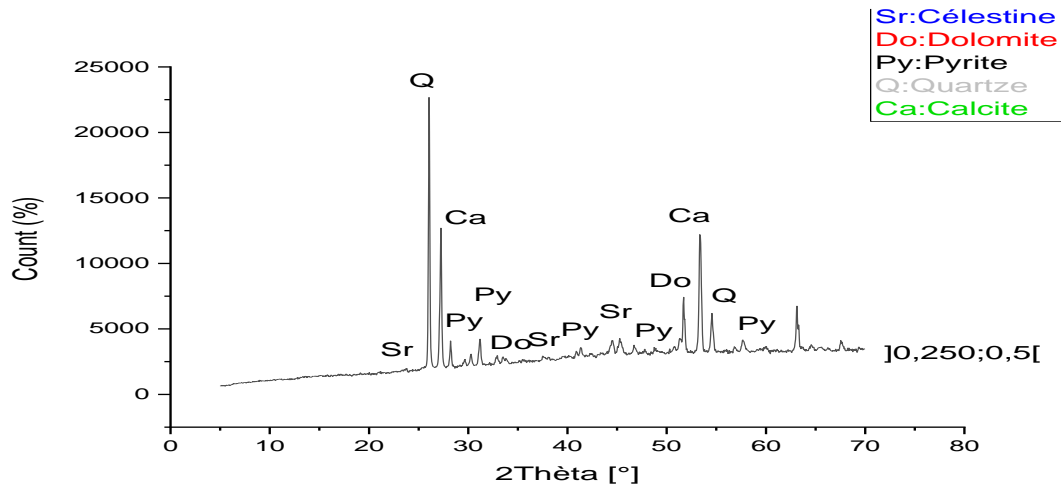


Figure V.04: Diffractogramme par rayon X pour la fraction]0.250mm ;0.5mm[.

Le diffractogramme (DRX) nous montre que la Fraction granulométrique]0.250mm ;0.5mm[est composé essentiellement de la Dolomite (Do),de la Célestine(SrSO_4) et de la pyrite (Py) . Selon les résultats de L'analyse quantitative, la Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) est la principale phase de l'échantillon, elle représente 51% de la totalité de l'échantillon . Le spectre DRX du fond de tamis de La Célestine nous montre les réflexions de la Dolomite vers $21.30^{\circ}2\theta$, $33.61^{\circ}2\theta$, et $37.81^{\circ}2\theta$ et $57.76^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $32.79^{\circ}2\theta$. La Célestine (SrSO_4) est la phase visé dans cette analyse elle représente 30% de la totalité de l'échantillon , Le spectre DRX du fond de tamis de ,cette fraction montre , montre les réflexions de la Célestine (SrSO_4) vers $23.56^{\circ}2\theta$, $38.52^{\circ}2\theta$, et $46.89^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $44.46^{\circ}2\theta$.La pyrite(FeS_2) 5 est la phase mineure dans notre échantillon avec une quantité de 19%. Le spectre DRX de la fraction]0.250mm ;0.5mm[montre les réflexions de la pyrite(FeS_2) vers $28.34^{\circ}2\theta$, $23.98^{\circ}2\theta$, et $48^{\circ}2\theta$ et $I=100\%$ vers $34.95^{\circ}2\theta$.

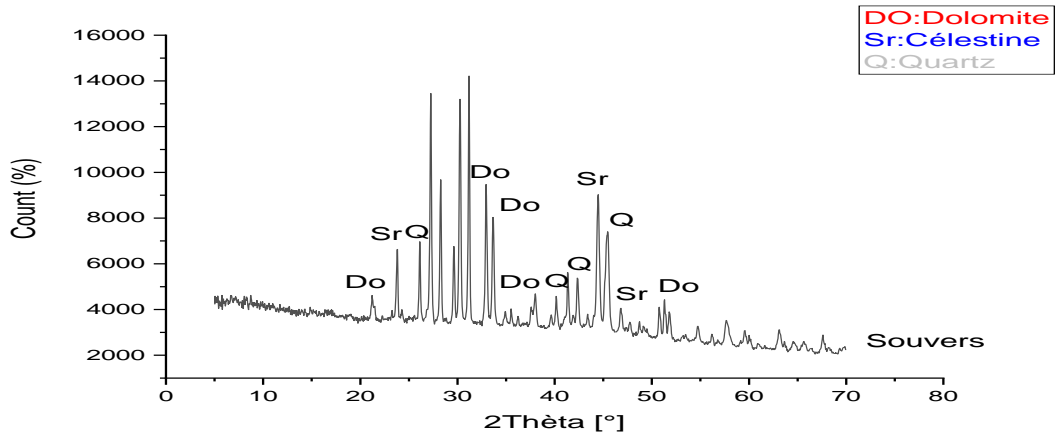


Figure V.05: Diffractogramme par rayon X pour la souverse.

Le diffractogramme (DRX) nous montres que le Sous-verse est composé essentiellement de la Dolomite (Do), de la Célestine($SrSO_4$) et de la calcite ($CaCO_3$). Selon les résultats de L'analyse quantitative, la Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), est la principale phase de l'échantillon, elle représente 61% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX de la Sous-verse montre les réflexions de la Dolomite vers $21.30^\circ 2\theta$, $33.61^\circ 2\theta$, et $37.81^\circ 2\theta$ et $57.76^\circ 2\theta$ et $I=100\%$ vers $32.79^\circ 2\theta$. La Célestine($SrSO_4$) est la phase visé dans cette analyse elle représente 21% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX du fond de tamis de La Célestine nous montres les réflexions de la Célestine vers $23.40^\circ 2\theta$, $38.22^\circ 2\theta$ et $46.79^\circ 2\theta$ et $I=100\%$ vers $44.41^\circ 2\theta$. Le quartz SiO_2 représente 18 % de cette fraction, le spectre DRX de cette phase donne des réflexions vers $20.81^\circ 2\theta$, et $26.64^\circ 2\theta$, et $34.82^\circ 2\theta$,

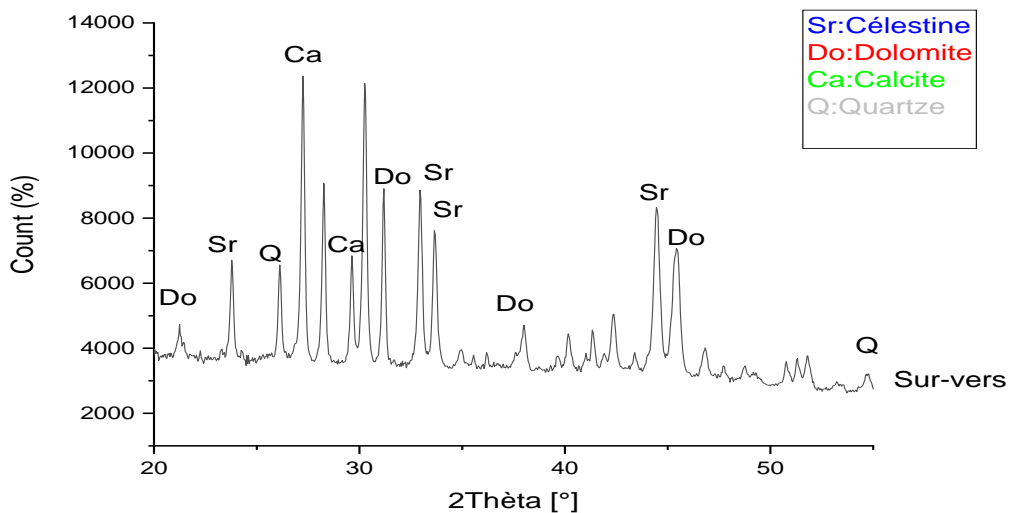


Figure V.06: Diffractogramme par rayon X pour la sur-verse.

Le diffractogramme (DRX) nous montre que les Fractions de la sur-verse est composé essentiellement de la Dolomite (Do), de la Célestine(SrSO_4) et de la calcite (CaCO_3) et de Quartz (Q). Selon les résultats de L'analyse quantitative, la Dolomite est la principale phase de l'échantillon, elle représente 50% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX de la la sur-verse montre les réflexions de la Dolomite vers $21.3^\circ 2\theta$, $29.54^\circ 2\theta$, et $33.61^\circ 2\theta$ et $53.32^\circ 2\theta$ et $I=100\%$ vers $32.95^\circ 2\theta$. La Célestine est la phase visé dans cette analyse elle représente un pourcentage plus élevé que celle enregistré dans le fond de tamis avec une quantité de 35% de la totalité de l'échantillon. Le spectre DRX de la sur-verse de la Célestine(SrSO_4) nous montre les réflexions de la Célestine vers $23.71^\circ 2\theta$, $37.94^\circ 2\theta$, et $46.71^\circ 2\theta$ et $I=100\%$ vers $44.41^\circ 2\theta$.,le quartz SiO_2 représente 6 % de l'échantillon analysé. Le spectre DRX de cette phase donne des réflexions vers $20.81^\circ 2\theta$, et $26.64^\circ 2\theta$, et $34.82^\circ 2\theta$, La Calcite(CaCO_3) est la phase mineure dans notre échantillon avec une quantité de 9%. Le spectre DRX du fond de tamis de La Célestine nous montre les réflexions de la Calcite vers $27.14^\circ 2\theta$, $29.54^\circ 2\theta$, et $40.92^\circ 2\theta$ et $I=100\%$ vers $29.54^\circ 2\theta$.

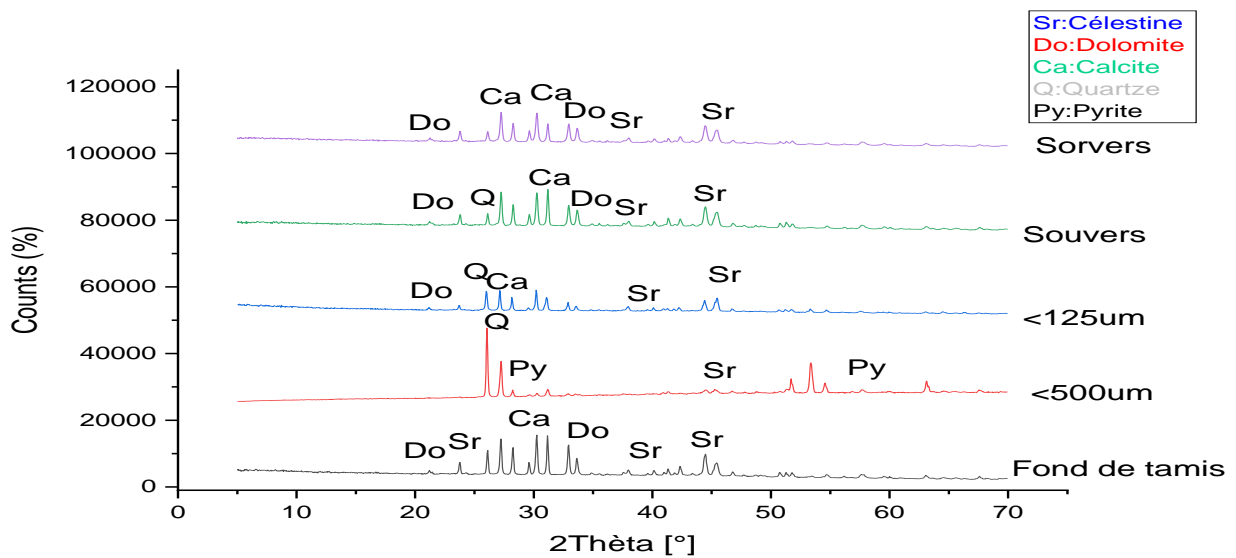


Figure V.07: Diffractogramme par rayon X pour l'ensemble des échantillons de la Célestine.

Le diffractogramme (DRX) nous montre que tous les échantillons caractérisés porte la Célestine (SrSO_4) Comme phase minérale essentiels, elle est a une teneur plus élevée dans la fraction $]0.125\text{mm}; 0.250\text{mm}[$, ce qui veut dire que cette fraction est la plus efficace pour l'enrichissement de minerai de la Célestine de Beni Mansour.

V.4.2. Les résultats de la fluorescence X (FX)

Les résultats de l'analyse chimique pour l'ensemble des échantillons sont montrés dans le tableau V.04, les pourcentages en oxydes pour les différents échantillons sont représentés dans l'histogrammes suivant :

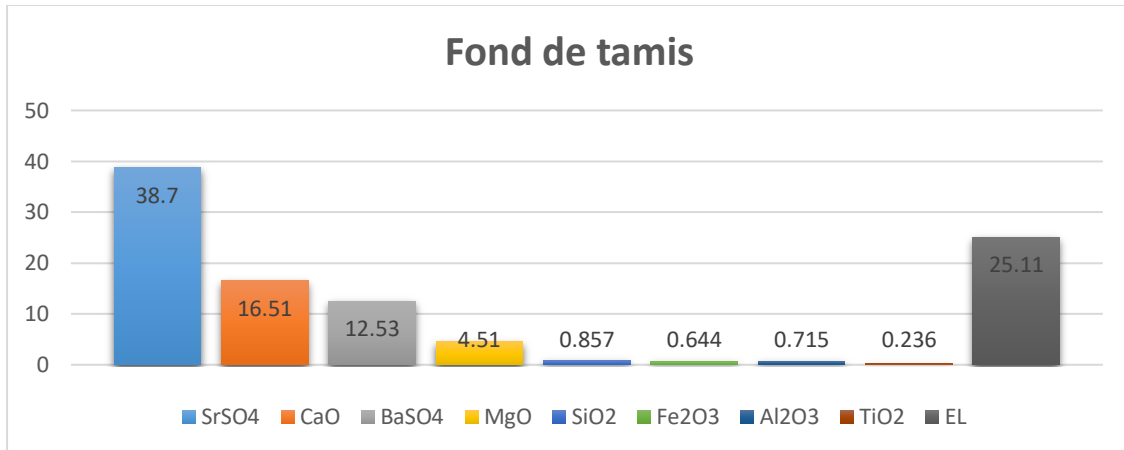


Figure V.07 : Histogramme d'analyse FRX pour fond de tamis.

D'après l'histogramme de la figure V.07. On constate que le SrSO₄, CaO, et le BaSO₄ sont les éléments majeurs avec les pourcentages 38.7%, 16.51% et 12.53 % respectivement, suivie par le MgO comme élément mineur avec un pourcentage de 4.51% et SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ et TiO₂ comme des éléments traces. la matière légère représente 25,11% de l'échantillon.

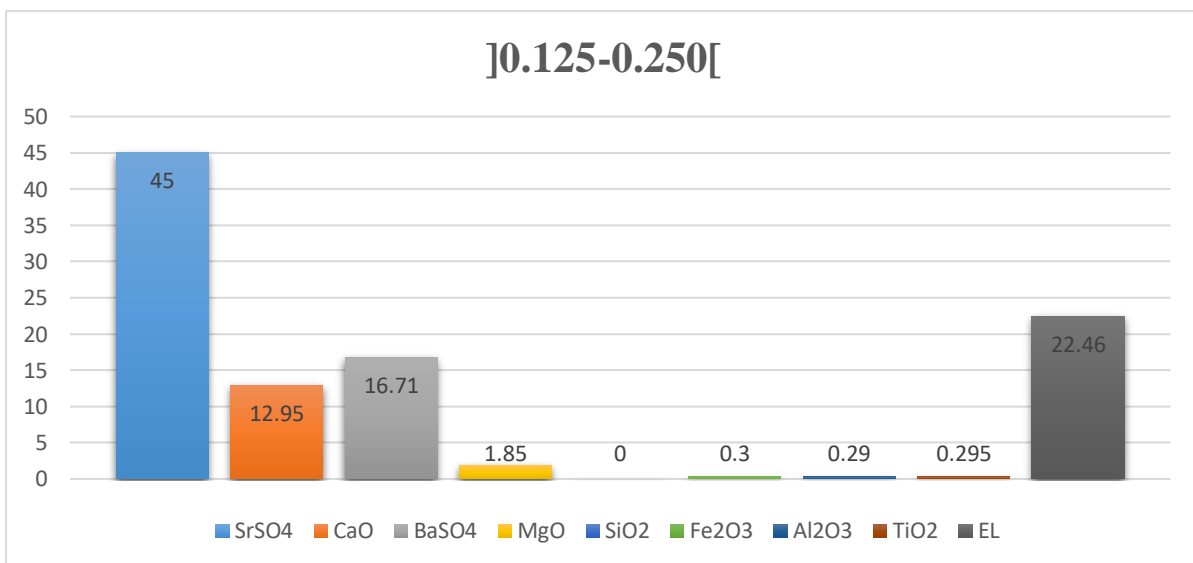


Figure V.08. : Histogramme d'analyse FRX pour la fraction]0,125mm ;0.250mm[.

D’après l’histogramme de la figure V.08. On constate que le SrSO₄, CaO, et le BaSO₄ sont les éléments majeurs à des pourcentages 45%,12.95% et 16.71 % respectivement suivie par le MgO comme élément mineur avec un pourcentage de 1.85 %. Le SiO₂ n’existe pas dans cette fraction, le Fe₂O₃, Al₂O₃ et TiO₂ comme des éléments traces .la matière légère représente 22,46% de l’échantillon .

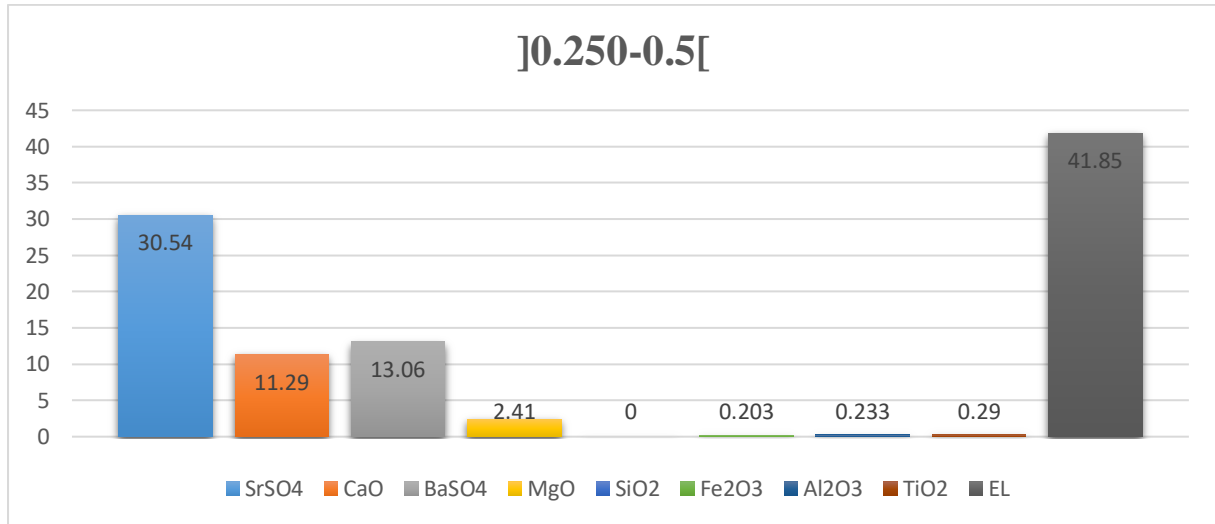


Figure V.09.: Histogramme d’analyse FRX pour]0.250mm ;0.5mm[.

D’après l’histogramme de la figure V.09. On constate que le SrSO₄, CaO, et le BaSO₄ sont les éléments majeurs avec les pourcentages 30.54%,11.29% et 13.06 % respectivement suivi par le MgO comme élément mineur avec un pourcentage de 2.41%. Le SiO₂ a totalement disparu dans cette fraction, le Fe₂O₃ ,Al₂O₃,et TiO₂ comme des éléments traces la matière légère représente 41.85% de l’échantillon.

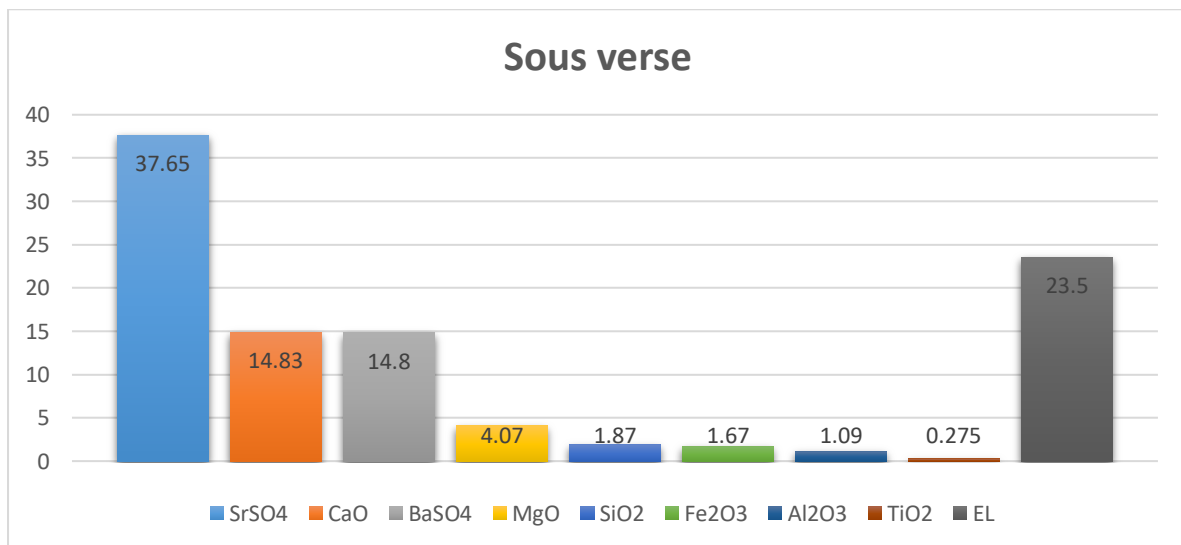


Figure .V.10 : Histogramme d’analyse FRX pour sous verse <0 ,125.

D'après l'histogramme montré par la figure V.10. On distingue que le SrSO_4 , CaO , et le BaSO_4 sont les éléments majeurs avec les pourcentages de 37.65%, 14.83% et 14.8 % respectivement, suivi par le MgO comme élément mineur avec un pourcentage de 2.41% . Le SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , et TiO_2 sont des éléments traces. La matière légère représente 23.5% de l'échantillon.

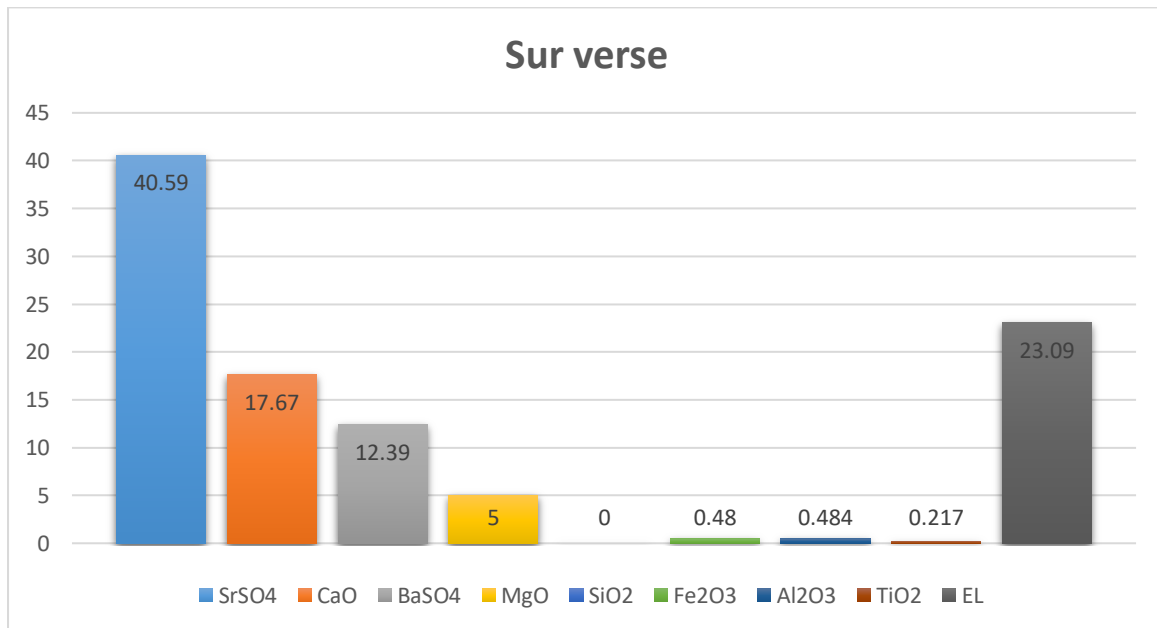


Figure .V.11.: Histogramme d'analyse FRX pour sur-verse <0 ,125.

D'après l'histogramme montré par la figure V.11, on remarque que le SrSO_4 , CaO , et le BaSO_4 sont les éléments majeurs avec les pourcentages de 40.59%, 17.67% ,et 12.39 % respectivement, suivi par le MgO comme élément mineur avec un pourcentage de 5% .Le Fe_2O_3 , Al_2O_3 , et TiO_2 comme des éléments traces. La matière légère représente 23.09% de l'échantillon.

D'après le Tableau V.04, on constate que la fraction]0.125mm ;0.250mm[donne une concentration plus élevée en SrSO_4 avec un pourcentage de 45% suivi par 40.59% dans la sur-verse, la concentration la plus faible en SrSO_4 à était observée dans la fraction]0.250mm ;0,5mm[. Cependant, le SiO_2 est totalement absent dans les fractions]0.250mm ;0,5mm[,]0.125mm ;0.250mm[et la sur-verse, et que CaO a atteint sont sommet dans le fond de tamis et la sur-verse avec les pourcentages 16,51%et 17.67% respectivement .

Tableau V.04 : Les résultats d'analyse chimique (FRX) pour l'ensemble des échantillons.

Les oxydes	Les échantillons			<0,125	
	0,125	]0.125 ;0.250[	]0.250 ;0,5[	Sous-verse	Sur-verse
SrSO₄	38,70	45	30.54	37.65	40.59
CaO	16,51	12.95	11.29	14.83	17.67
BaSO₄	12,53	16.71	13.09	14.80	12 .39
MgO	4..51	1.85	2.41	4.07	5
SiO₂	0.857	/	/	1.87	/
Fe₂O₃	0.644	0.300	0.203	1.67	0.480
Al₂O₃	0.715	0.290	0.233	1.09	0.484
TiO₂	0.236	0.295	0.290	0.275	0.217

Les compositions chimiques des échantillons sont très riches en SrSO₄, CaO, BaSO₄, MgO à des taux plus au moins différents par rapport à chaque fraction.

On remarque que la teneur en SrSO₄ dans la fraction <0,125 est dominante à celle de toutes les fractions. En outre, l'élément de quartz SiO₂ est inexistant dans trois fractions (<0,125 et <0,5 et sur verse)

V.5. Discussion de résultats

Les diffractogrammes présentent des phases minéralogiques différentes selon la granulométrie à savoir :

- Une proportion non négligeable de sulfates sous forme de Célestine, il existe aussi des carbonates associés à la dolomite et la calcite et de la silice sous forme de quartz.
- On conclut qu'au cours du traitement par classification par dimension (voie humide) la présence de particules carbonatées sous forme de dolomite et calcite.
- La présence fréquente de gangue carbonatée, associée aux particules de Célestine est complètement dissociées lors de l'opération de préparation mécanique.
- D'après ces analyses, le minerai est constitué d'élément majeurs tels que la Célestine, accompagnée avec d'autre minéraux comme la dolomite et calcite. Le quartz est présent sous forme de trace dans quelques fractions seulement. La meilleure teneur en

SrSO_4 se trouve dans la fraction]0.125mm ;0.250[, ce qui concorde avec les résultats de l'analyse par DRX.

Conclusion

Les différentes techniques d'analyse (DRX, FX) utilisées pour la caractérisation de minerais de Célestine et l'analyse granulométrie ont montré :

- L'analyse granulométrie, le classement dimensionnel effectué par tamisage a révélé que les particules majeures de la masse globale des minerais sont représentées par la tranche granulométrique la fraction]0.125mm ;0.250[.
- Sur le plan chimique, l'analyse des échantillons a montré que le bilan matière du minerai de Célestine dans la fraction]0.125mm ;0.250[une teneur de 45% de SrSO_4 , ainsi on remarque la présence de calcite, dolomite et un peu de quartz.

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

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est de faire un traitement et caractérisation pour déduire la capacité et le rendement du procédé de séparation gravimétrique du minerai de Célestine du Beni-Mansour, Bejaia. Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Suivre l'évolution et savoir les caractéristiques minéralogiques, granulométrique et chimiques de minerai de Célestine dans le but de spécifier la meilleure taille des particules utilisée durant ce procédé gravimétrique et déterminer la nature des oxydes (gangues) associés aux particules de notre concentré.
- L'étude minéralogique des 05 échantillons par diffraction des rayons X, nous a permis l'identification des phases minérales principales à savoir : La Célestine, la dolomite, la pyrite, la calcite et le quartz.
- Les résultats des analyses chimiques ont montré des différences appréciables, très importantes dans les tenures en %SrSO₄ et les éléments légers non identifiés que dans les quantités des oxydes liés à la gangue (% MgO, %CaO, %AL₂O₃, %TiO₂, %BaSO₄, etc).
- D'après la classification granulométrique et les analyses chimiques et minéralogiques des 05 tranches granulométriques, on peut confirmer que la meilleure tranche granulométrique et représentative (45% en SrSO₄) est celle]0, 0,125] mm, suivie par la poudre de la sousverse d'hydrocyclone avec un pourcentage approximatif (40,59%). Ces résultats confirment le procédé de traitement choisi pour ce minerai. Donc il est justifiable d'utiliser la séparation gravimétrique pour le traitement de la célestine avec un grand taux de récupération en prenant en considération la taille supérieure à 0 mm et inférieure à 125µm pour diminuer la masse des particules fines.
- En faisant une comparaison entre l'analyse des résultats théoriques et pratiques, on remarque la précision des deux approximations et ainsi la validation de notre démarche.

- Après traitement et caractérisation, des informations très importantes sont apportées sur l'enrichissement de tout-venant du Célestine soit par voie humide ou par voie sèche pour diminuer le taux des indésirables (oxydes (SiO_2) et les particules fines qui réduisent la qualité du concentré. Ceci permettra d'augmenter la qualité de la celestine de Beni Mansour et d'avoir une place importante sur le marché international.

En perspective, nous recommandons de faire une étude environnementale (nuisance sonore, atmosphérique et chimique) sur l'exploitation de la célestine de Beni Mansour-Bejaia, du moment qu'elle contient des sulfures et sulfates. La transformation des sulfates de strontium en carbonates de strontium est une initiative importante à prendre en considération à l'avenir.

- [1] **ADJISSA Massinissa (2019)** . Analyse et caractérisation du minerai de fer de Gara Djebilet. Mémoire de fin d'étude ,mines et géologies .Université de Bejaia .
- [2] :Rapports sur les travaux de recherches et de prospection géologiques effectués sur le gisement de Beni Mansour .SONAREM-DR,Base « A ».
- [3] :**BELAOUSSOUVA.etNEBBAK A.,(1986)**.Etude complémentaire de gisement de Célestine Beni Mansour .EREM unité de Tizi Ouzou
- [4] Rapporte en ligne sur L'élémentarium « sulfate de strontium ». 12em édition 2020. Site Webe (<https://lelementarium.fr/product/sulfate-de-strontium>).
- [5] **AIVAZIA T., DIATCHENKO V., SAVELIEV H., CHERVACHIDZE D., 1971.** Rapport sur les travaux de recherché et de prospection géologique effectués que le gisement de Béni Mansour. SONAREM-DR, Base « A ». Inédit
- [6] **Jean Hameurt.(1967)**Les terrains Cristallins et cristallophylliens de versant occidental des vosges moyennes .Mémoire de magistère .Université de strasbourg .France
- [7] **CORNU ,Alfred ;GAUBERT ,Paul (1902)**, minéralogie .rapport de la Société de paris .france volume 25 ,1902.PP.173-180.site Web :WWW.persee.fr.
- [8] **CAIRE A .,1957**.Etude géologique de la région de biban (Algerie)-Publ.Du serv.de la carte géol.de l'Alg.Bull.n°16,2 tonnes ,818P.
- [9] **HAZEN ,Inc., 1978.** Metallurgical test report onthree samples from Beni Mansour ore deposit .SONAREM, Inédit.
- [10] **FLANDRIN J., 1948.** Contribution à l'étude stratigraphique du Nummulitique Algérien .Bull. Du Serv. De la Carte Géol. de l'Alg. 2^{ème} série strat. n°19.
- [11] **PIERRE BLAZY , Robert JOUSSEMET.(2005)**. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires,tri,et,traitement-des-liquides-et-des-solides-42446210> / concentration par-gravite-j3191.
- [12]**BAGHDZDI, Mohamed Yacine (2015)**.Etude d'enrichissement de minerai de la baryte de gisement de Draissa,Bechar .Mémoire de fin d'étude . Mémoire de fin d'étude ,Génie minier .Université de bejai .
- [13] **BELAOUSSOV A. et NEBBAK A., 1986.** Etude complémentaire du gisement de célestine de Béni Mansour. EREM, Unité de Tizi-Ouzou. Inédit.
- [14] **Brigatti M F, Galli E, Medici L (1997)** Ba-rich célestine ; new data and crystal structure refinement mineralogical Magazine.
- [15] **BATOUCHE ,Toufik (2021)**.Caractérisation et traitement de minerai barytique d'Ain Mimoun pour l'obtention d'un concentré de haute qualité thèse de doctorat en mine . Université Larbi Tebssi à Tbessa.

- [16] **BALADAH Fares (2012)**. Revalorisation des rejets de la Barytines issus des jiges et l'impacte environnementale : Cas de Ain-Mimoun /Khenchela .Mémoire de fin d'étude .Université de Badji Moukhtar Annaba.
- [17] :**DELORME,E,L'HUILLER.r.T(1970)**. Enrichissement des minerais par gravité,Mmoire de fin d'étude de L'université de Rouen .France
- [18] :**FELLOUS. F,(2000)**flottation complexe ,cas d'un échantillon de phosphate , projet de fin d'étude ,université de biskra
- [19] :**HAMDADOUNE.E (1987)**.Caractérisation rénové de minerai de fer de lorraine ,thèse de doctorat, mine et géologie. application à une étude comparative des méthodes de valorisation .Université de lorraine. France .
- [20] :**SALAH boulel** .Laboratoire et méniralogie et cristallographie de l'université de toulouse III. France associé au C.N.R.S (L.A.n°67).
- [21]**FOUTIHA Amira(2018)**.Analyse et caractérisation des rejets de phosphate >1mm de l'unité de traitement de mùnerais de phosphates de Djbel-onk ,tébessa .Mémoire de fin d'étude ,Génie minier .Université de bejaia
- [22] **ASSANAKIVE B., SOUSLOV G., BITAM L., VIRCHILO V., PONOMARIEV B. et LARAB A., 1984**. Rapport final sur les résultats des travaux de lev é et de recherches systématiques à 1/50 000 effectués dans l'anticlinorium des Biban sur les feuilles 89-EL Esnam, 90-Béni Mansour, 110-Berroughia, 111-Souagui et 112-Sopur El ghozlane en 1979-1983 par l'équipe « Berroughia ». EREM, Unité de Tizi-Ouzou.
- [23]Rapporte de Stage sur la Célestine de Beni Mansour .la Synthèse des Données Géologiques Géophysiques Miniers et minéralurgiques .Bureau d'étude en géoscience .Kouba Alger ,rapport N°473972 .2010.
- [24]**DORZOUNOV V, 1982** .Prospection et évaluation industrielle des gisements de substance utiles non-métalliques, « Nedra ».TCHALIK E. Rapport sur les résultats de l'évaluation détaillée du gisement de barytine KOUDJA-SAFIA, 1984.Documentation de l'Unité de Tizi-Ouzou.
- [25] **AURELIEN Davailles (2011)**. Effet de la concentration en solide sur les performances de séparation d'un hydrocyclone (simulations numériques et expériences de références) .thèse Doctorat en Dynamique des Fluides. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) France
- [26] **A.GUPTA AND D.S.YAN 2006**.Miniral processing design and operation. An introduction .Elsevier.

- [27] **Rapport sur le traitement de la Célestine.** bureau d'étude spécialisé en matière (ERMET TRAPPES, France) assure la conception, suivi de montage et la mise en service pour figure et schème de l'ensemble de processus de traitement
- [28] **MOUSSACEB , K(2007)** .optimisation de système de gestions de l'homogénéisation du cru et du processus de fabrication du ciment .(laboratoire de technologie des matériaux et de génien de procédés, thèse doctorat ,UAMB).
- [29]. les essais d'équivalent de sable, Essai C.B.R, Los Angeles, Micro Deval.
- .
- [30] **FARAH Omar ,DEMIA Hamza(2015)**. Etude quantitative et qualitative des rejets du kaolin du complexe SOALKA spa pour une meilleure gestion .Mémoire de Fin d'étude én mines et géologies .université de Bejaia.
- [31]**DJELLAL, S., GUENDOUZEN, S. (2015)**. Valorisation de rejet de minerai de phosphate noir de gisement de kef Es Sennoun de Djebel Onk dans l'élaboration d'une biocéramique (Mémoire de Master, UAMB).
- [32] **BELKACEMI, A ., KACEL, M.,& AYADI,B .(2014)**.Caractérisation et Elaboration D'un Schéma de Traitement de Tuf de Remila (Bejaia)(Mémoire de Master, UAMB).
- [33] **AYADI,B.. (2010)**.Caractérisation et choix d'un schéma de traitement du minerai cuivre-fer de DOUAMIS (Ouenza-Algérie). Mémoire de magister, université d'Annaba.
- [34] **BIANCHINI, A. (2010)**. Activité antifongique des bactéries lactiques: Facteurs influant sur la production et la stabilité des composés antifongiques de *La ctobacillus plantarum* et effets des composés antifongiques sur la croissance et la production d'aflatoxines par *Aspergillus Spp.* Université de Nebraska-Lincoln.
- .

Annexe N°01**Ressources humaine**

La densité de population est assez élevée dans la région .aussi, l'encadrement et la main d'œuvre spécialisée dans la conduite des engins sont disponibles. Les spécialités de mineur de boufeux le sont par contre moins.

La majeure partie du personnel de la mine sera constituée de mineurs, conducteurs d'engins et conducteurs d'installations.La répartition des effectifs fait ressortir que :

- le personnel de production représente 41,0% de l'effectif ;
- la maintenance 20,5%.
- le soutien 30,7%.
- l'encadrement 7,7% [22]

Tableau III.07 : Besoins en personnel, taux d'absentéisme inclus[22].

Phases des postes	Nombre de postes dans l'effectif
Directeur de la mine	01
Installations de traitement	08
Maintenance	08
Soutien	12
Carrière	10
Total général mine	39

Annexe N°02**Sécurité et environnement et remise en état des lieux**

Le risque que présente l'exploitation de cette mine à ciel ouvert sont, classées par ordre de gravité décroissant, proviennent :

- ✓ De l'usage de l'explosif.
- ✓ Des manœuvres et circulations des engins

- ✓ Des risques de chute des blocs des gradins.
- ✓ D'électrocution.
- ✓ De l'entreposage de carburants liquides.
- ✓ Des mouvements des convoyeurs à bande.

Ces risques sont relativement limités car les tirs à l'explosifs ne se font qu'une fois toutes les quinze semaines, le nombre d'engins est réduit et les gradins ont une pente de 80° avec une hauteur de 5m50 seulement les mesures retenues pour faire face aux éventualités sont les suivantes :

- ✓ Le tir proprement dit ne sera déclenché qu'une fois que le bouffeur s'est assuré en personne de la présence d'aucun agent dans les zones de projections et après avoir, par un moyen sonore puissant, signalé à trois reprises l'imminence du tir.
- ✓ La mise en œuvre dès l'explosifs puis de tenir à jour le registre y afférent.
- ✓ Les précautions d'usage, la vulgarisation et le respect de la réglementation en la matière suffisante, risque des marches arrière des engins ...etc.
- ✓ Procéder au nettoyage des gradins sous lesquels évoluent machines et personnes. Les

agents et les machines doivent toujours évoluer à 3 m du talus du gradin qui les surplombe. Les équipements et câblages de l'installation de traitement devront évidemment répondre aux exigences en la matière.

- ✓ Isolement des citernes à carburant qui seront implantées à plus de 25m de toutes constructions passage etc [3].

Annexe N°03

Remise en état des lieux

- ❖ **Le gisement** est situé au sommet d'une crête d'un massif montagneux isolé. L'exploitation va engendrer une cuvette dans les flancs seront constitués essentiellement de marnes bien développés dans la région et dans la plus faible proportion de gypses.
- ❖ **La configuration** de gisement ne permet de remettre en place au fur et à mesure de

L'exploitation des roches stériles extraites. Aussi deux aires de stockages vont être mis à contribution et donner des plates-formes en fin d'exploitation.

❖ **Les stériles** qui ont composés de roches naturelles (marnes et gypses) simplement

Déplacées, ne constituent pas une source de pollution.

- L'action à mener, dans le cadre de remise en état des lieux consiste à planter des arbres

sur les bermes de sécurité tout au long des gradins pour d'un côté donner l'aspect adapté à l'environnement et de l'autre à renforcer les talus.

- Les poussières engendrées par la fragmentation de la Célestine ne constituent pas une

source de pollution en raison :

- De l'isolement.
- De faibles débits.
- De poids spécifique élevé de la Célestine qui fait que les poussières retombent près de la source qui les génère [3]

Annexe N°04

Tableau.01 : les résultats de l'analyse granulométrie du minerai tout-venant

Masse tamis (g)	Masse tamis remplis (g)	D en mm	Masse du refus (g)	% rendement pondéral refus	% rendement cumulé de refus	% rendement cumulé de tamisât
401,70	408,9	>2 mm	7,2	1,45	1,45	98,55
378,24	521,19	]2;0,75]	142,95	28,85	30,30	69,70
415,6	547,3	]0,75 ;0,5]	131,7	26,58	56,88	43,12
403	443,25	]0,5 ;0,25]	40,25	8,12	65,01	34,99
378,01	526,91	]0,25 ;0,125]	148,90	30,05	95,06	4,94
340,15	364,65	]0,125 ; 00[	24,50	4,94	100,00	0,00
		Totale	495,5	100		

Annexe N°05 .

Les résultats de la DRX de l'ensemble des échantillons caractérisés .

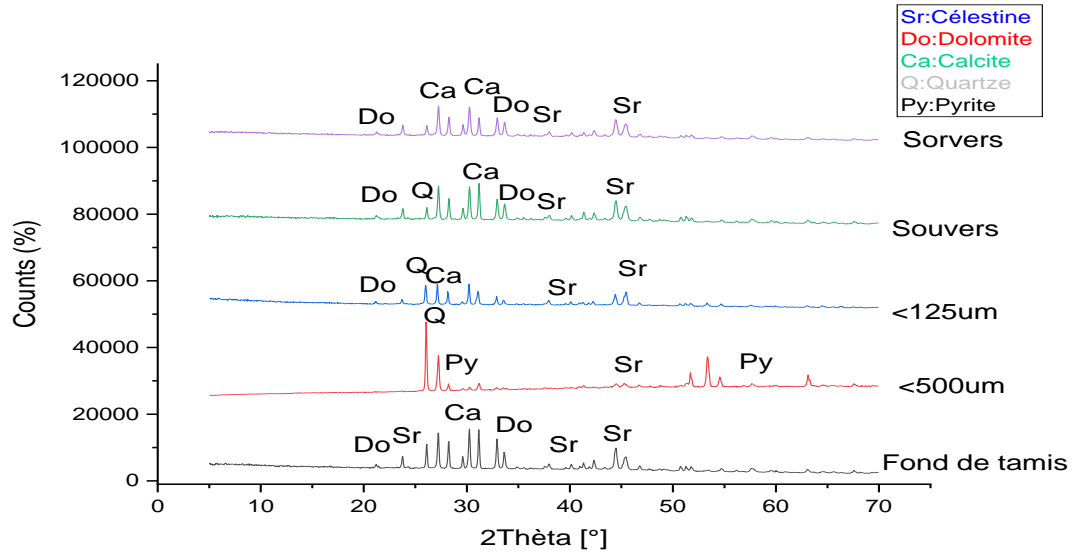


Figure.01: Diffractogramme par rayon X pour l'ensemble des échantillons de la Célestine.

Résumé :

Au cours de cette étude réalisée sur le traitement et la caractérisation du minerai du Célestine du Béni Mansour - Bejaia , il ressort que ce minéral comporte un taux élevé et multiples des éléments légers et particules fines comme gangue, ce qui est engendré par sa faible résistances au chocs et autres propriétés chimiques, physiques et cristallographiques ; Pour cela , un procédé de traitement par voie gravimétrique et une classification granulométrique est donné comme solution pour améliorer le rendement qualitatif, Cette solution ne nuit pas à l'environnement. La caractérisation minéralogique et chimique des fractions granulométriques choisie ont été faites par DRX et Fluorescence X.

Mots clés : Célestine de Beni-Mansour, Maille de libération, Hydrocyclone, Caractérisation Enrichissement, Environnement.

Abstract:

This study focuses on the treatment and the characterization of the Celestine ore situated in Beni Mansour – Bejaia (Algeria), it emerges that this mineral comprises a high rate and multiple of the light elements and fine particles like gangue, which is generated by its weak resistances to the shocks and other chemical, physical and crystallographic properties; For that, a process of treatment by gravimetric way and a granulometric classification was carried out to make solution with this problem with a low economic cost and higher qualitative output, while causing no negative environmental impact. The mineralogical characterization of the fractions was done by XRD and chemical by XRF.

Keywords: Beni Mansour Celestine ore, Liberation mesh, Hydro cyclone, Characterization, Enrichment, and Environment.

ملخص

خلال هذه الدراسة التي أجريت على معالجة وتوصيف خام سلسنتين بني منصور بجاية، يبدو أن هذا المعدن يحتوي على نسبة عالية ومتعددة من العناصر الخفيفة والجزئيات الدقيقة مثل الشوائب التي تسببها المقاومة المنخفضة. الخواص الكيميائية والفيزيائية والبلورية الأخرى؛ لهذا الغرض، تم إجراء عملية معالجة قياس الجاذبية وتصنيف حجم الجسيمات لحل هذه المشكلة بتكلفة اقتصادية أقل وعائد نوعي أعلى، مما لا يسبب أي تأثير سلبي على البيئة. تم إجراء التوصيف المعدني للكسور بواسطة XRD وXRF الكيميائي.

الكلمات المفتاحية : شبكة الإطلاق ، الهيد وسيكلون ، التوصيف ، الإثراء ، السلسنتي