

REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TERRE
DÉPARTEMENT DES MINES

Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement



THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Mines et Environnement

Option : Valorisation des Ressources Minérales et Environnement

THÈME

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE D'UNE VALORISATION DES DÉCHETS
MINIERS, CAS DES STÉRILES FRANCS DE LA MINE DE BOUKHADRA
- TÉBESSA**

Présentée par :

ROUAIGUIA Issam

DEVANT LE JURY :

Président :	CHETTIBI Mohamed	Pr. Université Badji Mokhtar - Annaba
Directeur de thèse :	BOUNOUALA Mohamed	Pr. Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineurs :	IDRES Abdelaziz	Pr. Université Badji Mokhtar - Annaba
	DERAMCHI Karima	Pr. ENP El-Harrach, Alger
	GHEID Abdelhak	Pr. Université M.C.M - Souk Ahras
	BOUKERROUI Abdelhamid	M.C.A Université Abderrahmane Mira-Béjaïa
Membre Invitée :	BABOU ABDELMALIK Chiraz	M.C.A Université de Tunis El-Manar

Année : **2018**

« Les déchets d'hier peuvent devenir les ressources d'aujourd'hui »

(Hitch, M., Ballantyne, S. M., et Hindle, S. R., 2010)

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

*La mémoire de mon cher père que Dieu
préserve son âme dans son vaste paradis.*

*L'être le plus chère au monde : ma mère
qui m'a accompagné durant mes années
d'études que Dieu la bénisse.*

Mes sœurs et mes frères.

Mes amis.

REMERCIEMENTS

Grâce à Dieu, me voilà enfin arrivé au jour tant espéré pour savourer les fruits de mon travail de recherche en thèse de doctorat en Mines et Environnement.

*Un spécial et un immense remerciement à mon Directeur de thèse et Directeur du Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement (LAVAMINE) le **Professeur BOUNOUALA Mohamed** pour l'encouragement, les efforts fournis de m'avoir donné aussi la chance d'être parmi les chercheurs de son laboratoire afin de mener à bien ce travail réalisé sur les déchets miniers.*

*J'exprime ma vive reconnaissance à monsieur **CHETTIBI Mohamed, Professeur** à l'Université Badji Mokhtar - Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.*

Aussi, je tiens à exprimer vivement mes gratitudes et mes reconnaissances aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette thèse :

- ***Professeur DERAMCHI Karima** de l'Ecole National Polytechniques d'El-Harrach, Alger,*
- ***Professeur GHEID Abdelhak** de l'Université Mohamed Cherif Messaadia - Souk Ahras,*
- ***Docteur BOUKERROUI Abdelhamid** Maitre de conférences « A » de l'Université Abderrahmane Mira – Béjaïa,*
- ***Professeur IDRES Abdelaziz** de l'Université Badji Mokhtar – Annaba.*

*Il m'est particulièrement agréable de remercier vivement le **Docteur BABOU ABDELMALEK Chiraz** de l'Université de Tunis El-Manar (Tunisie) d'avoir acceptée de participer à cette soutenance en tant que membre invitée.*

Et enfin, mes remerciements vont à tous les responsables, les enseignants, les travailleurs, les doctorants et les étudiants de l'Université Badji Mokhtar - Annaba, sans oublier l'ensemble des travailleurs de la mine de Boukhadra et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer ce travail.

RESUME

La mine de Boukhadra utilise une méthode d'exploitation minière combinée (à ciel ouvert et souterraine) caractérisée par un relief montagneux. Elle exploite le minerai de fer de type hématite avec une teneur moyenne de 50 % par contre, elle génère annuellement des milliers de tonnes de déchets miniers en roches stériles qui sont déposés à proximité du village minier situé en aval de la mine. Cependant, ces rejets miniers peuvent nuire à l'environnement et en particulier à la santé humaine, ce qui nécessite des solutions urgentes. Pour résoudre ce problème environnemental, une gestion intégrée par la valorisation des déchets miniers est exigée d'une part à réduire le volume des stocks et d'autre part à minimiser leurs impacts environnementaux. Les travaux menés sur les déchets miniers de fer de Boukhadra ont permis de déduire que les stériles francs sont constitués de calcaire, d'hématite, de marnes grises et jaunes, d'une teneur moyenne de 20 % en Fe_2O_3 , les analyses minéralogique et granulométrique effectuées ont permis de révéler que la classe riche en fer (27,67 % Fe_2O_3) se situe entre -0,5 + 0,25 mm. En se basant sur les propriétés physiques de ces déchets miniers, la susceptibilité magnétique a été prise en compte pour l'enrichissement des minéraux de fer faiblement magnétiques par séparation magnétique à haute intensité en voie sèche (SMHI). Lors de la séparation, nous avons tenu compte de la granulométrie et de l'intensité du courant électrique. Des essais par (SMHI) montrent que la fraction (-0,5 + 0,25 mm) testée à 12 A offre un concentré de fer de 40 % Fe_2O_3 contre un rejet de 43 % CaO, 15 % SiO_2 , 8 % Al_2O_3 et 2 % Fe_2O_3 . Le procédé par SMHI nous a permis d'une part la récupération d'un produit commercialisable et d'autre part, les rejets issus de la séparation magnétique peuvent être utilisés dans d'autres domaines tels que les cimenteries, les céramiques, matériaux de construction, etc. En outre, et selon les caractéristiques naturelles des déchets, nous préconisons la valorisation des déchets miniers par tri optique qui se base sur la différence de couleur (RVB) des minéraux à séparer en utilisant trois (3) trieurs optiques équipés de caméras couleurs. Le procédé suggéré est très efficace, il permet de récupérer des particules de taille supérieure à 10 mm et il génère par conséquent peu de poussière. De ce fait, la valorisation et la gestion intégrée des déchets miniers sont les préoccupations majeures d'un développement durable de l'industrie minière Algérienne.

Mots clés : Mine de fer, Boukhadra, déchets miniers, séparation magnétique, tri optique, gestion, valorisation, développement durable.

ABSTRACT

The Boukhadra mine uses a combined mining method (open pit and underground) characterized by mountainous terrain. It exploits hematite iron ore with an average grade greater than 50% however, it generates annually thousands tons of mine wastes in waste rocks which are deposited near the mining village located downstream of the mine. In fact, these mining discharges can harm the environment and in particular human health, which requires urgent solutions. To solve this environmental problem, an integrated management by the valorization of the mining wastes is necessary to reduce the volume of the stocks on the one hand and on the other hand to minimize their environmental impacts. The studies carried out in the Boukhadra iron mining wastes made it possible to deduce that the Boukhadra waste rocks are constituted of limestone, hematite, gray and yellow marl, with an average content of 20% in Fe_2O_3 . Mineralogical and chemical-granular analysis have made it possible to conclude that the iron-rich class (27.67% Fe_2O_3) is situated between $-0.5 + 0.25$ mm. On the basis of the physical properties of these mining wastes, magnetic susceptibility was taken into account for the enrichment of weak magnetic iron minerals by dry high intensity magnetic separation (DHIMS). When separating the waste, we took into account the grain size and the intensity of the electric current. Tests by (DHIMS) show that the experiment carried out in the class ($-0.5 + 0.25$ mm) at 12 A offers an iron concentrate (40% Fe_2O_3) against a rejection of (43% CaO, 15% SiO_2 , 8% Al_2O_3 and 2% Fe_2O_3). The HIMS method makes it possible on the one side to recover a marketable product and on the other side, the discharges resulting from the magnetic separation can be used in various fields: cement works, ceramics, construction materials, etc. In addition and taking into account the natural characteristics of the wastes, we recommended their valorization by optical sorting according to the color difference (RGB) of the minerals to be separated by using three (3) optical sorters equipped with colors cameras. This proposed process is very efficient, it allows the recovering of the grain size (> 10 mm) and it generates little dust. Therefore, the valorization and the integrate management of the mining wastes are a major concern for the sustainable development of Algerian mining industry.

Keywords: Iron mine, Boukhadra, mining wastes, magnetic separation, optical sorting, management, valorization, sustainable development.

ملخص

يستخدم منجم بوخضرة طريقة استغلال مشتركة (حفرة مفتوحة وتحت الأرض) ويتميز بالتضاريس الجبلية، هذا المنجم يستغل خام الحديد (الهيماتيت) بمعدل متوسط يزيد عن 50٪، وفي موازاة ذلك فالمنجم يخلف سنويا آلاف الأطنان من النفايات المنجمية في شكل صخور تودع بالقرب من القرية المنجمية التي تقع في سفح المنجم.

لكن هذه النفايات المنجمية يمكن أن تؤدي إلى الإضرار بالبيئة، ولا سيما صحة الإنسان، الأمر الذي يتطلب حولا عاجلة، ولحل هذه المشكلة البيئية، التسيير المتكامل عن طريق تثمين النفايات المنجمية مطلوب من جهة من أجل تخفيض حجم المخزونات ومن ناحية أخرى للحد من آثارها البيئية.

الدراسات التي أجريت على النفايات المنجمية للحديد لبوخضرة سمحت لنا من الاستنتاج بأن صخور النفايات تتكون من الحجر الجيري (كلكار) والهيماتيت والمارل الرمادي والأصفر، بمعدل 20 ٪ من Fe_2O_3 ، كما مكن التحليل المنرولوجي والحبيبي الكيميائي من الاستنتاج بأن الطبقة الغنية بالحديد (Fe_2O_3 27,67٪) تقع بين -0,5 + 0,25 مم.

واستنادا إلى الخصائص الفيزيائية لهذه النفايات المنجمية، أخذت الحساسية المغناطيسية في الحسبان لإثراء معادن الحديد الضعيفة مغناطيسيا بواسطة فصل مغناطيسي جاف عالي الشدة (ف م ج ع ش).

عند فصل النفايات، أخذنا بعين الاعتبار حجم الحبيبات وشدة التيار الكهربائي، أظهرت الاختبارات التي أجريت عن طريق (ف م ج ع ش) أن التجربة التي أجريت على الطبقة (-0,5 + 0,25 ملم) في 12 أ تنتج حديد تركيزه (Fe_2O_3 40٪) مع نفايات تركيزها (CaO 43٪، SiO_2 15٪، Al_2O_3 8٪ و Fe_2O_3 2٪).

تسمح طريقة (ف م ج ع ش) باسترداد منتج قابل للتسويق من ناحية، ومن ناحية أخرى، يمكن استخدام النفايات الناتجة عن الفصل المغناطيسي في مختلف المجالات: صناعة الإسمنت والخزف ومواد البناء وما إلى ذلك.

بالإضافة إلى ذلك، وبالأخذ بعين الاعتبار للخصائص الطبيعية للنفايات، أوصينا بإثراء النفايات المنجمية لبوخضرة باستعمال الفرز البصري والذي يركز على الفرق في اللون (احمر اخضر ازرق) للمعادن التي سيتم فصلها، وذلك باستخدام ثلاثة (3) أجهزة فرز بصرية مجهزة بكاميرات، الطريقة المقترحة جد فعالة، فهي تسمح باسترجاع حبيبات حجمها ($0 < 1$ مم)، كما أنها تخلف القليل من الغبار.

لهذا الامر، فإن التثمين والإدارة المتكاملة للنفايات المنجمية هما مصدر قلق رئيسي للتنمية المستدامة للصناعة المنجمية الجزائرية.

الكلمات المفتاحية: منجم حديد، بوخضرة، نفايات منجمية، فصل مغناطيسي، فرز بصري، تسيير، تثمين، تنمية مستدامة.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
TABLES DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
ABREVIATIONS ET SIGLES UTILISES.....	xvi
AVANT-PROPOS	xix
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Analyse des conditions géologiques et minières de la mine de Boukhadra	
1.1. Introduction	6
1.2. Le minerai de fer	6
1.3. Marché international du minerai de fer	6
1.4. Ressources minérales en Algérie.....	7
1.5. Production du minerai de fer en Algérie	8
1.6. Contexte géologique de la région de Tébessa	9
1.7. Hydrogéologie de la ville de Tébessa	10
1.8. Situation géographique de la mine de fer de Boukhadra.....	11
1.9. Historique de la mine	12
1.10. Géologie de la mine de Boukhadra	13
1.11. Données climatologiques et hydrographiques.....	15
1.12. Réserves du gisement	15
1.13. Minéralisation du gisement	17
1.14. Exploitation de la mine de la mine de Boukhadra	17
1.14.1. À ciel ouvert	17
1.14.2. Souterraine	18
1.15. Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra

2.1. Introduction	21
2.2. Cycle de vie d'une mine.....	21
2.3. Notions sur les déchets.....	22
2.3.1. Déchets ménagers et assimilés	22
2.3.2. Déchets spéciaux.....	22
2.3.3. Déchets inertes	22
2.4. Besoin de l'exploitation des ressources minérales.....	22
2.5. Teneur de coupure.....	24
2.5.1. Types de teneur de coupure.....	24
2.5.1.1. Teneurs de coupure de planification	24
2.5.1.2. Teneurs de coupure d'opération.....	24
2.6. Les déchets miniers	25
2.6.1. Types déchets miniers	25
2.6.1.1. Les roches stériles	25
2.6.1.2. Les déchets de traitement du minerai	25
2.6.1.3. Les déchets liquides	26
2.7. La pollution	27
2.8.1. Pollution ponctuelle.....	27
2.8.2. Pollution diffuse	27
2.8. Impacts environnementaux des déchets miniers	28
2.8.1. Pollution due à l'exploitation minière.....	28
2.8.2. Pollution due aux installations de gestion des résidus	28
2.8.3. Pollution des sols par les métaux issus des déchets solides	29
2.8.4. Le drainage minier	29
2.9. Le développement durable	30
2.9.1. Les enjeux économiques	30
2.9.2. Les enjeux environnementaux.....	31
2.9.3. Les enjeux sociaux	31
2.10. Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra.....	31
2.11. Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Caractérisation physico-chimique et minéralogique des stériles francs

3.1. Introduction	36
3.2. Généralités sur l'échantillonnage	36
3.2.1. Types d'échantillonnage	36
3.2.2.1. Echantillonnage géologique	36
3.2.2.2. Echantillonnage minier	36
3.2.2. Types d'échantillon	36
3.2.2.1. L'échantillon ponctuel.....	36
3.2.2.1. L'échantillon composite.....	37
3.3. Protocole d'échantillonnage des stériles francs	38
3.4. Caractérisation minéralogique des stériles francs	40
3.4.1. Analyse pétrographique.....	40
3.4.1.1. Calcaire gris.....	40
3.4.1.2. Minerai de fer	40
3.4.1.3. Marnes grises.....	41
3.4.1.4. Marnes jaunes.....	42
3.4.2. Analyse qualitative des stériles francs par diffraction des rayons X.....	43
3.4.3. Analyse des haldes stériles par Microscope Electronique à Balayage.....	44
3.5. Caractérisation physico-chimique des stériles francs.....	46
3.5.1. Analyse granulométrique	46
3.5.2. Analyse granulo-chimique des stériles francs	48
3.5.3. Analyse par SAA des stériles francs de la mine de Boukhadra	52
3.6. Caractérisation des stériles d'exploitation.....	53
3.6.1. Analyse chimique des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra.....	56
3.6.2. Analyse par SAA des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra.....	56
3.7. Etude environnementale sur les déchets miniers de Boukhadra	56
3.7.1. Analyse des eaux de drainage minier de Boukhadra.....	57
3.7.2. Analyse des sols	58
3.7.3. Impacts des déchets miniers de Boukhadra.....	59
3.7.3.1. Types des rejets miniers	59
3.7.3.2. Classification des métaux.....	60
3.7.3.3. Définition des métaux lourds	61
3.7.3.4. Maladies dues à l'exposition à certains minéraux.....	62

3.8. Conclusion.....	64
----------------------	----

Chapitre 4 : Tests de valorisation des déchets miniers de la mine de Boukhadra

4.1. Introduction	66
4.2. Séparation gravimétrique	66
4.2.1. Procédés de concentration gravimétrique	66
4.3. Séparation par flottation	67
4.3.1. Réactifs de flottation	67
4.4. Séparation électrostatique	68
4.5. Séparation magnétique	69
4.5.1. Magnétisme de la matière	70
4.5.2. Boucle d'hystérésis	71
4.5.3. Paramètres déterminants l'efficacité d'une séparation magnétique.....	72
4.5.4. Méthodes de la séparation magnétique	72
4.6. Séparation optique.....	73
4.6.1. Principe de tri optique	74
4.6.2. Généralités sur le système de collecte des données optiques.....	75
4.6.3. Types des trieurs optiques	76
4.7. Gestion et valorisation des déchets miniers	79
4.7.1. Généralités.....	79
4.7.2. Revue de littérature sur la gestion et la valorisation des déchets miniers	81
4.8. Valorisation des déchets miniers de Boukhadra	92
4.8.1. Séparation magnétique	92
4.8.2. Tri manuel	97
4.8.2.1. Analyse par DRX des déchets miniers de la mine de Boukhadra.....	97
4.8.2.2. Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra	99
4.8.3. Séparation optique.....	100
4.8.3.1. Détermination de RVB des images des roches de Boukhadra	100
4.8.3.2. Algorithmes du tri optique	101
4.8.3.3. Avantages de méthode proposée	104
4.9. Domaines d'utilisation des produits triés	105
4.9.1. Minerai de fer	105
4.9.2. Marnes	106
4.9.3. Calcaire.....	107

4.9.4. Essais mécaniques sur des échantillons de la mine de Boukhadra.....	108
4.10. Conclusion.....	110
Conclusion Générale	111
Références Bibliographiques	113
Annexes	132

LISTE DES FIGURES

<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
1	Principaux flux du minerai de fer à travers le monde en 2009	7
2	Carte de répartition des principaux gisements en Algérie	8
3	Tébessa dans l'Atlas Saharien oriental	10
4	Situation géographique de la zone d'étude	11
5	Les mines Algériennes en 1968	12
6	Position des extrusions triasiques par rapport aux fossés d'effondrement	13
7	Colonne stratigraphique des monts du Mellègue	14
8	Morphologie du gisement de Boukhadra	15
9	Représentation 3D - Boukhadra	16
10	Cycle d'exploitation de la mine de fer de Boukhadra	18
11	Déroulement d'une opération minière	21
12	Schéma général de l'élaboration des métaux	23
13	Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants	26
14	Pollution ponctuelle	27
15	Pollution diffuse	27
16	Le drainage minier	29
17	Modélisation du développement durable	30
18	Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra	32
19	Vue générale sur les déchets miniers de Boukhadra	33
20	Exemple sur le phénomène de lessivage du minerai de fer de Boukhadra à la sortie de concasseur	33
21	Organigramme de préparation et caractérisation physico-chimique d'un minerai	37
22	Opérations de quartage et homogénéisation des stériles francs de Boukhadra	38
23	Points de prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de Boukhadra	39

24	Analyse pétrographique du calcaire gris	40
25	Analyse pétrographique du minerai de fer	41
26	Analyse pétrographique de la marne grise	41
27	Analyse pétrographique de la marne jaune	42
28	Opérations de quartage et homogénéisation des stériles francs de Boukhadra	42
29	Exemple de diffractomètre de laboratoire	43
30	Analyse par DRX d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra	43
31	Microscope Electronique à Balayage	44
32	Observation par microscope électronique à balayage d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra (a : X 400, b : X 3000) et les spectres associés	45
33	Tamiseuse électrique de type RITSH	46
34	Courbe de distribution granulométrique d'un échantillon des stériles francs de Boukhadra	47
35	Analyseur FX	48
36	Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques qui constituent les stériles francs de la mine de Boukhadra en fonction de la granulométrie	50
37	Vue à la loupe binoculaire de la classe -1 + 0,5 mm	50
38	Vue à la loupe binoculaire de la classe -0,5 + 0,25 mm	51
39	Vue à la loupe binoculaire de la classe -0,25 + 0,125 mm	51
40	Spectromètre d'Absorption Atomique	52
41	Points de prélèvement des échantillons des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra	53
42	Schéma illustrative des différentes voies d'exposition aux polluants	60
43	Tableau périodique de Mendeleïev	61
44	Schéma d'un séparateur électrostatique à tambour	69
45	La boucle d'hystérésis d'un minerai ferromagnétique	71
46	Principe de fonctionnement des séparateurs magnétique à haute intensité (SMHI)	73
47	Principe de fonctionnement d'un trieur optique	74

48	Types des séparateurs optiques	77
49	Séparateur magnétique à haute intensité en voie sèche	92
50	Influence de l'intensité du courant électrique sur la teneur en fer	95
51	Influence de l'intensité du courant électrique sur la récupération du fer	95
52	Schéma proposé de gestion et valorisation des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra	88
53	Tri manuel des déchets miniers de Boukhadra	97
54	Spectres DRX du calcaire	98
55	Spectres DRX du minerai de fer	98
56	Spectres DRX de la marne grise	98
57	Spectres DRX de la marne jaune	99
58	Diagramme du tri optique des déchets miniers de la mine de Boukhadra	101
59	Différentes utilisations du minerai de fer	105
60	Diagramme ternaire de Keil-Rankin	106
61	Schéma de la fabrication du ciment Portland	107

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
1	Production de minerai de fer : durée 2008 - 2009	9
2	Réserves géologiques et exploitables de la mine de Boukhadra	16
3	Composition chimique du minerai de fer de Boukhadra	17
4	Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra	39
5	Résultats de l'analyse granulométrique d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra	47
6	Analyse granulo-chimique des stériles francs de la mine de Boukhadra	49
7	Analyse par Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA) des déchets miniers de la mine de Boukhadra	53
8	Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra (Zone 1)	54
9	Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra (Zone 2)	55
10	Analyse chimique par FX des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra	56
11	Analyse par SAA des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra	56
12	Analyse des eaux de drainage minier de Boukhadra	57
13	Analyse chimique des sols du village de Boukhadra	58
14	Analyse par SAA des sols du village de Boukhadra	59
15	Technologie de tri des minerais	76
16	Classification des procédés et des machines de traitement	78
17	Exemples des voies de réutilisation et de recyclage des déchets miniers	80
18	Tests de séparation magnétique à haute intensité des stériles francs de la mine de Boukhadra	93
19	Analyse chimique de la classe riche (-0,5 + 0,25 mm) testée à 12 A	94
20	Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra	99
21	RVB des images provenant des déchets miniers de Boukhadra	100
22	Résultats des essais mécaniques sur des échantillons de la mine de	109

Boukhadra

23	Résultats des essais mécaniques sur des échantillons de Ballast 25/50 de la mine de Boukhadra	109
----	--	-----

ABREVIATIONS ET SIGLES UTILISES

<i>Notation</i>	<i>Désignation</i>
A	Ampère
AFNOR	Association française de normalisation
Amec	Bureau d'étude étranger (en anglais : association of mining & exploration companies)
ATC	Atelier des camions
BIMG	La couleur bleue de l'image
BK	Boukhadra
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CA	Courant alternatif
Cc	Calcaire
CCD	Un dispositif à transfert de charge (en anglais : charge coupled device)
CETIM	Centre d'études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction
COL	Couleur
C.O	Ciel ouvert
D	Densité
DBO₅	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
DMA	Drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
DRX	Diffraction des rayons X
DRG	Dureté relative globale
EM	Electromagnétique
EN	Norme européenne
ENSMM	Ecole nationale supérieur des mines et métallurgie
ES	Echantillon du sol
FERPHOS	Entreprise national du fer et phosphate
FRX	Fluorescence sous rayons X
H	Humide

Hc	Champ coercitif
Hm	Hématite
HT	Haute tension
IMG	Image
IR	Infrarouge
-J.C	Avant Jésus-Christ
KN	Kilo Newton
LA	Los Angeles
LAVAMINE	Laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement
Li	Limonite
MBIMG	La moyenne de la composante bleue de l'image
MDE	Micro Deval
MEB	Microscope électronique à balayage
MES	Matière en suspension
MO	Micro-onde
MRIMG	La moyenne de la composante rouge de l'image
mT	Mili tesla
Mt	Millions tonne
MVIMG	La moyenne de la composante verte de l'image
M.RO	Matériel roulant
NF	Norme française
ORGM	Office national de recherches géologiques et minières
PIR	Proche infra-rouge
PM	Photométrie
RIMG	La couleur rouge de l'image
RM	Radiométrie
RVB	Rouge, vert, bleu
R/C	Résistance à la compression
S	Sec
SAA	Spectroscopie d'adsorption atomique
SMBI	Séparateur magnétique à base intensité
SMGO	Séparateur magnétique supraconducteur à gradient ouvert
SMHG	Séparateur magnétique à haute gradient
SMHI	Séparateur magnétique à haute intensité

SMIM	Séparateur magnétique à intensité moyenne
SOMIFER	Société des Mines de Fer d'Algérie
SONAREM	Société nationale de recherches et d'exploitation des ressources minières
SPA	Société par action
ST	Souterraine
T	Tonnes
TRX	Transmission à rayon X
UTM	Universel Transverse Mercator
UV	Ultraviolet
VIS	Visible
VIMG	La couleur verte de l'image
VI/PI	Véhicules poids légers

Avant-propos

La valorisation et la gestion des déchets miniers sont les principaux défis de l'industrie minière Algérienne sur le plan écologique, économique et social. On rencontre des millions de tonnes de déchets miniers générés chaque année par les entreprises minières suite à la libération du commerce international et à la modernisation des usines où la demande en matière minérale s'accroît d'une manière exponentielle. L'industrie minière comme toute autre industrie génère des effluents solides, liquides ou gazeux. Selon leur nature, les déchets miniers sont divisés en deux catégories : les stériles francs et les résidus de traitement. Certains entre eux sont considérés comme complexes et difficile à traiter à l'instar des sulfures, les métaux lourds. En fait, tous les objets non économiques résultants des travaux de prospection, de l'exploitation ou du traitement des minerais sont considérés comme des déchets miniers ; stériles miniers, pneus, huiles, ferrailles, batteries et autres.

L'Algérie et par sa grande superficie, dispose de plusieurs gisements de ressources minérales tels que : le minerai de fer, les phosphates, le kaolin, le plomb, le zinc, le cuivre, l'argent, l'or, la baryte, le feldspath, le calcaire et des ressources énergétique tels que ; le gaz naturel, le pétrole, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, etc. L'exploitation de ces substances permet d'améliorer la situation économique du pays.

Actuellement, le site minier de Boukhadra connaît des pollutions à long terme sous l'effet des travaux d'exploitation minière du gisement du minerai de fer et par les déchets miniers qui sont rejetés. Ce travail étudie les stériles francs de la mine de fer de Boukhadra, ces derniers sont connus sous le nom de roches stériles qu'il faut les extraire pour atteindre le minerai de fer. Le gisement étudié est localisé dans le Djebel de Boukhadra avec des réserves exploitables supérieures à 50 millions tonnes, le minerai est exploité à ciel ouvert et en mine souterraine.

En vue d'une meilleure gestion environnementale et dans le cadre de la valorisation des déchets miniers, plusieurs méthodes ont été utilisées citons par exemple : la séparation gravimétrique, la flottation, la séparation électrostatique et dans certains circonstances on fait appel à l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie. Pour la gestion des déchets miniers, certaines techniques sont proposées telles que : le tri mécanique, le tri magnétique, le tri électrique, le tri radiométrique et le tri optique. Quelques solutions critiques sont aussi

suggérées voire l'emploi des stériles miniers pour le remblayage des mines (en fosse ou souterrain), comme des granulats ou pour les travaux de restauration et de réhabilitation des sites miniers.

Introduction générale

L'exploitation minière représente l'activité économique la plus importante pour la plupart des pays du monde (Yellishetty, M., Ranjith, P., et Kumar, D., 2009). L'installation d'une mine et l'extraction réelle de ses ressources peut contribuer au développement durable en optimisant le bien-être des riverains (Gomes, R., Tomi, G., et Assis, P., 2015). D'après Da Gama, C., 2013, cette activité minière est gouvernée habituellement par la maîtrise de trois disciplines scientifiques à savoir ; la géologie, l'ingénierie minière et l'économie.

Le minerai de fer par exemple est un élément largement demandé ; industrie automobile, outils divers, construction, il représente, de ce fait, un moteur pour l'économie mondiale (Araújo, I., et Costa, M., 2013), c'est la raison pour laquelle les grands pays industriels renforcent l'exploitation de cette substance minérale et cela par l'augmentation des travaux de prospection et d'extraction.

Cependant, la gestion des déchets miniers demeure une préoccupation majeure pour l'exploitant où la demande en matière minérale ne cesse pas de croître. Narrei, S., et Osanloo, M., 2015, estiment que les déchets miniers à l'échelle mondiale atteindront plus de 56 milliards de tonnes en 2030.

Au niveau national, l'Algérie possède plusieurs gisements des minerais de fer qui sont localisés à l'Est du pays à proximité de la frontière Algéro-Tunisienne. L'oxydation partielle de la sidérite (carbonate de fer) a donné naissance à l'hématite qui affleure à la surface, on rencontre là-bas une minéralisation complexe contenant le Plomb, le Zinc, le Cuivre, le Baryte et le Fluor. En conséquence les gisements de fer de l'Ouenza, Boukhadra et de Djerissa possèdent des concentrations importantes de galène, de sphalérite, de baryte et de fluorite, alors que des couches de Plomb-Zinc renferment des concentrations mineures de sidérite à savoir ; Slata, Bou Jabeur, Mesloulia qui se trouvent en Tunisie (Bouzenoune, A., et Lécolle, P., 1997).

Dans le Nord-Est Algérien, Le gisement de Boukhadra est l'une des principales sources d'approvisionnement en minerai de fer dans le pays avec des réserves exploitables s'élevant à 50 millions de tonnes. L'exploitation s'effectue par deux méthodes : à ciel ouvert et souterraine. La mine à ciel ouvert produit des quantités considérables de déchets miniers, leur taille varie de quelques mètres aux millimètres contrairement aux mines souterraines

(Lamontagne, A., 2001). Le minerai de fer extrait de la mine de Boukhadra est de type hématite se distinguant par une teneur supérieure à 50 %, il est ensuite transporté au Complexe Sidérurgique d'Annaba pour la production de la fonte et l'acier.

Concernant les stériles francs, ce sont les roches extraites autour ou à l'intérieur du corps du minerai pendant l'exploitation minière, ils sont caractérisés par une faible teneur en minéraux utiles. La teneur de coupure est un facteur important qui peut changer avec le temps, il différencie les stériles francs par rapport au minerai (Bellenfant, G., et al., 2013). D'après Hitch, M., Ballantyne, S., et Hindle, S., 2010, chaque mine génère des déchets qui, pour la protection de l'environnement, nécessitent le contrôle, la caractérisation, le traitement et l'élimination. L'étude menée sur la valorisation des déchets miniers de fer de Boukhadra a pour objectif une gestion des stériles francs qui posent réellement de gros problèmes à l'environnement et à la société civile.

Les déchets miniers sont connus par leurs impacts environnementaux à long terme tels que : la contamination du sol, de l'eau, de l'air, glissement des terrains, occupation du sol naturel, ils gênent le processus minier, etc. D'après Pastore, E., 2003, la nature des stériles francs et en particulier les rejets sulfurés contenant des sulfures de fer, de plomb, de zinc peuvent être à l'origine de minéraux générateurs du drainage minier acide (DMA).

D'autre part, ces déchets miniers peuvent faire l'objet de nouveaux gisements pour les générations futures et des réserves considérables ce qui nécessite une mise en valeur de ces déchets miniers par revalorisation et recyclage. Ils peuvent être utilisés pour le remblayage des vides souterrains, comme matériaux de construction, ajout dans les produits cimentiers, peinture,...

Pour se faire, des études de caractérisation par lames minces, sections polies, DRX, FX, MEB, SAA ont été menées sur des échantillons représentatifs des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra pour la reconnaissance et l'identification de la composition minéralogique et la composition chimique ainsi que les propriétés physico-chimiques.

Les résultats obtenus à partir d'un prélèvement des échantillons montrent que les déchets miniers de la mine de Boukhadra renferment deux (2) types minéralisés selon leur nature et leur qualité la première catégorie riche titre en moyenne 40 % Fe_2O_3 tandis que la deuxième est d'une teneur ne dépassant pas 20 % Fe_2O_3 .

Des essais de valorisation sont réalisés en tenant compte d'une part des caractéristiques naturels des stériles francs et d'autre part des propriétés spécifiques ainsi que la maille de libération des minéraux utiles voire une granulométrie appropriée.

A cet effet, nous avons testé plusieurs échantillons représentatifs par séparation magnétique à haute intensité (SMHI), au niveau de Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement (LAVAMINE) de l'Université Badji Mokhtar – Annaba. Également, Ces échantillons ont fait l'objet d'une séparation optique pour trier les stériles francs en quatre (4) blocs selon leur couleur, cela facilitera leur recyclage et réutilisation. En vue de mettre en évidence les impacts des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra sur l'environnement, des analyses chimiques sur des échantillons des eaux et des sols ont été effectués.

Les travaux de recherche menés sur les stériles francs de la mine de fer de Boukhadra située à l'Est du pays ont fait l'objet d'une valorisation et d'une gestion de ces déchets miniers. Cependant, les objectifs attendus visent d'une part à réduire les effets néfastes (poussières, érosion du sol, détérioration de l'écosystème, pollution des eaux) et protéger l'environnement que représente pour Seghir, K., 2008 une préoccupation primordiale des scientifiques et industriels, d'autres parts de trouver des solutions adéquates par la revalorisation et le recyclage des déchets miniers.

Cette thèse se fixe comme tâche : La caractérisation des stériles francs de la mine de Boukhadra, la valorisation des stériles francs de la mine suscitée et l'élaboration d'un schéma de traitement pour les stériles en question.

Ce document est structuré en quatre chapitres, en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre nous donnons un aperçu générale sur la mine de Boukhadra, la géologie du gisement ainsi que la minéralisation et les méthodes d'exploitation y employées.

Le deuxième chapitre décrit d'une façon détaillée les déchets miniers en particulier et les stériles francs de la mine de Boukhadra.

La caractérisation minéralogique et physico-chimique des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra est présentée dans le troisième chapitre, ce chapitre fait appel à des techniques d'observation et d'analyses récentes.

Le dernier chapitre aborde l'application des tests de valorisation pour les stériles francs de la mine de Boukhadra.

En fin nous complétons par les annexes et la liste des références bibliographiques desquels cette thèse a été menée.

Chapitre 1 : Analyse des conditions géologiques et minières de la mine de fer de Boukhadra

Sommaire :

- 1.1. Introduction
 - 1.2. Le minerai de fer
 - 1.3. Marché international du minerai de fer
 - 1.4. Ressources minérales en Algérie
 - 1.5. Production du minerai de fer en Algérie
 - 1.6. Contexte géologique de la région de Tébessa
 - 1.7. Hydrogéologie de la ville de Tébessa
 - 1.8. Situation géographique de la mine de fer de Boukhadra
 - 1.9. Historique de la mine
 - 1.10. Géologie de la mine de Boukhadra
 - 1.11. Données climatologiques et hydrographiques
 - 1.12. Réserves du gisement
 - 1.13. Minéralisation du gisement
 - 1.14. Exploitation du gisement
 - 1.15. Conclusion
-
-

1.1. Introduction

L'exploitation minière a pour but essentiel d'atteindre une extraction maximale des minéraux en prenant en considération des aspects économiques, environnementaux et l'emplacement des gisements (Rout, M., et Parida, C. K., 2007).

Eu égard à ses caractéristiques, le fer est un minerai largement demandé, il se trouve dans l'écorce terrestre sous différentes formes : hématite, magnétite, goethite, limonite, sidérite, etc. Le gisement de Boukhadra dans l'Est Algérien représente un appui capital pour l'approvisionnement en minerai de fer hématitique de qualité, il est destiné à la sidérurgie, la fabrication des ciments et les pigments rouges.

1.2. Le minerai de fer

D'abord, le fer est l'un des métaux les plus abondants de la nature. On le rencontre partout, seul ou combiné à certains éléments, sous forme du minerai. En Europe, la sidérurgie du fer date à 1700 -J.C. Dès les Hittites jusqu'à la fin du moyen âge, la préparation du fer demeura la même : on chauffait des couches alternées du minerai et du bois (ou bien du charbon du bois) jusqu'à le recevoir d'une masse pâteuse du métal qu'il fallait ultérieurement marteler à chaud afin de la libérer de ses inclusions et obtenir subséquemment du fer, capable à être forgé (Broussaud, A. 1977).

1.3. Marché international du minerai de fer

Selon Gouin, J., 2008, la consommation excessive des métaux par les pays émergents à l'instar de la Chine, l'Inde ou le Brésil a entraîné une augmentation des coûts des métaux pendant la dernière décennie, ce qui nécessite, subséquemment, à exploiter de nouveaux gisements, c'est bien que l'exploitation du minerai de fer en Algérie a pris, dès lors, une large essor.

Après la deuxième guerre mondiale, la production de l'acier a été conçue spécialement en vue de la reconstruction en Europe et afin de satisfaire la demande excessive des biens (accessoires, automobiles, matériels, électroménagers,...) auquel le monde a vécu. Après et à partir des années 2000, la production s'est encore forcée du fait de la puissante requête d'acier par les pays industriels (Afanga, K., 2014).

En fait, l'entretien du coût du minerai de fer s'effectué entre les producteurs (les exploitants des mines) et les clients (les producteurs d'acier en Asie et en Europe (figure 1),

une fois qu'un certain nombre d'accords et de contrats annuels ont été signés, le reste des exploitants arrangent la démarche et un coût du marché est fixé. De nos jours, la plupart du minerai de fer employé par l'industrie de Chine découle de sources chinoises ou de sources qui ne sont pas soumises à des conventions basées sur un coût de référence. L'adaptation d'un prix de référence a pour but crucial de diriger les accords qui doivent accompagner la première convention annuelle sur la valeur. En Amérique du Nord, le coût du minerai de fer est discuté selon les conventions du marché Nord-Américain (Dumont, M., 2008).

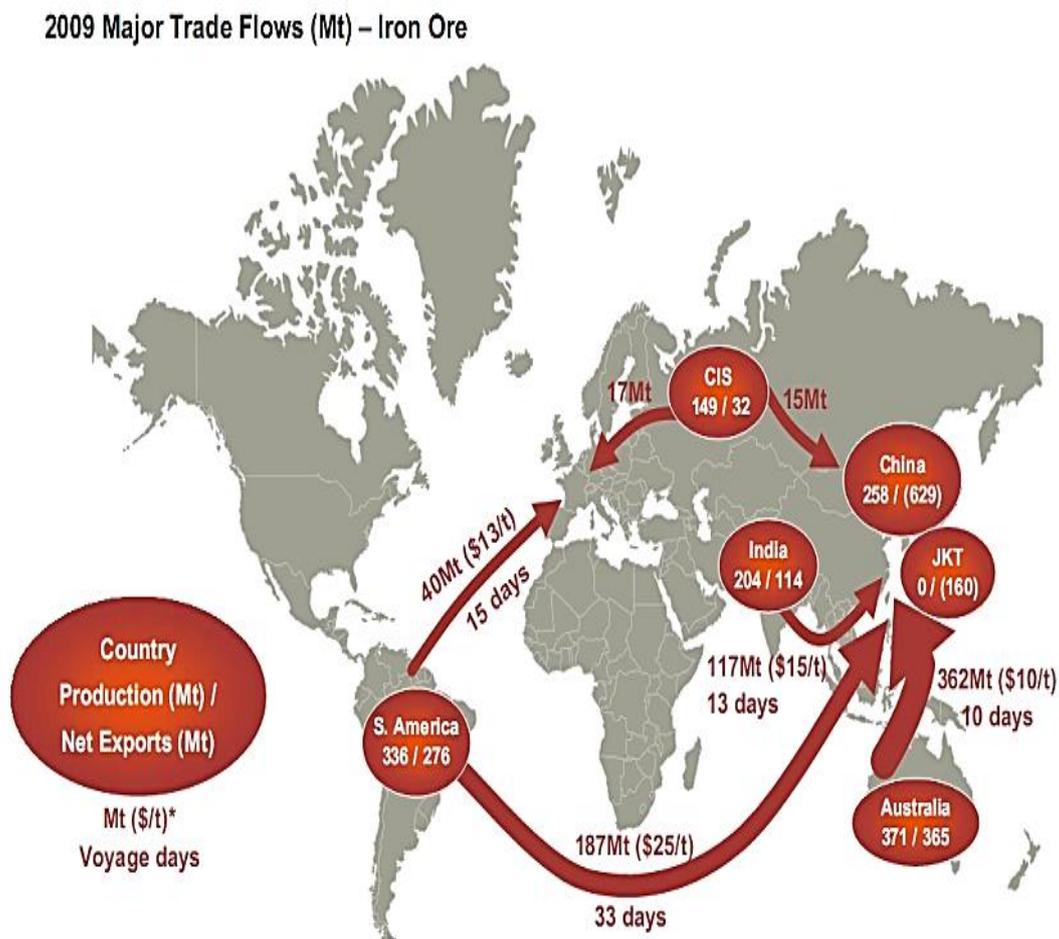


Figure 1. Principaux flux de minerai de fer à travers le monde en 2009 (Source : présentation BHP BILITION (2010) in (Duport, O., 2012)

1.4. Ressources minérales en Algérie

L'Algérie est un pays connu par sa richesse en ressources énergétiques (hydrocarbures, gaz naturel, énergie nucléaire, énergie solaire, énergie éolienne) et minières (fer, or, argent, cuivre, plomb, zinc, baryte, phosphates, feldspath, terres rares, granulats...), la figure 2 montre les principaux gisements des minerais en Algérie.

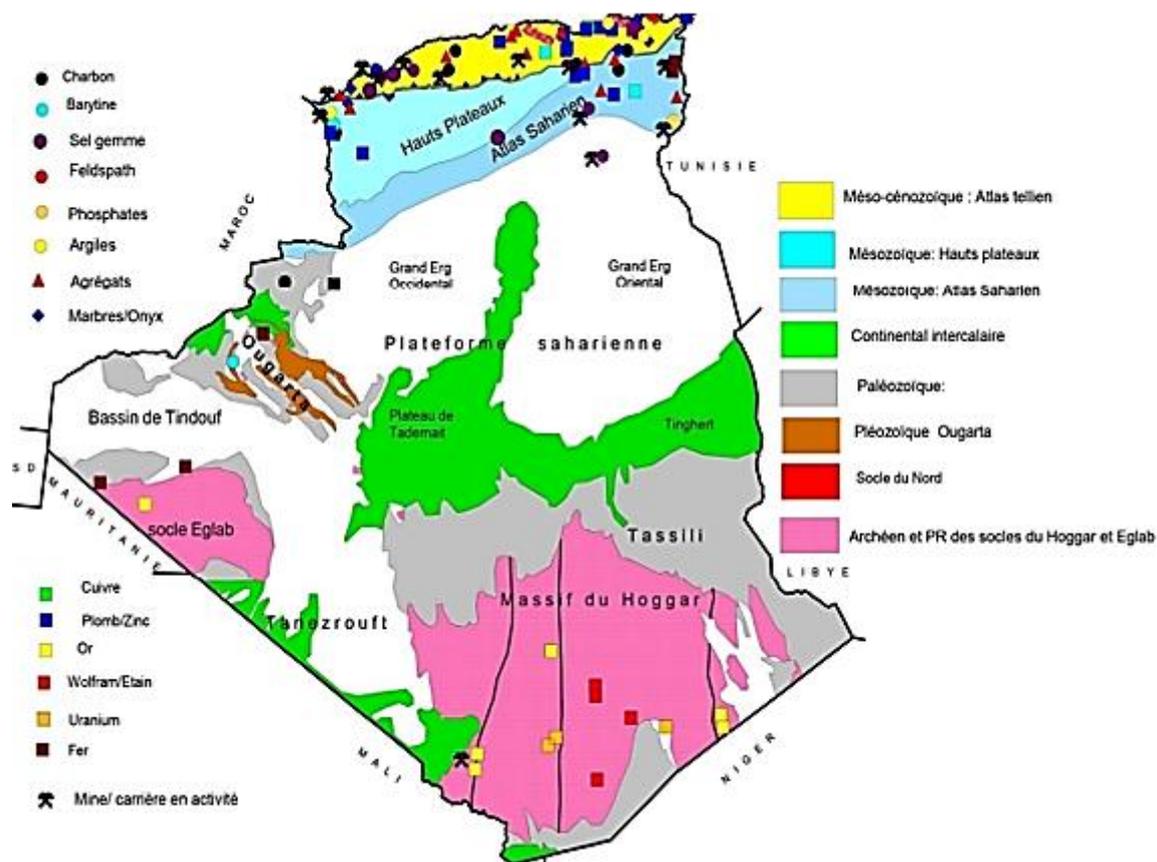


Figure 2. Carte de répartition des principaux gisements en Algérie (Ministère de l'Industrie et des Mines, 2015)

1.5. Production du minerai de fer en Algérie

En Algérie, la production du minerai de fer en cours de l'année 2009 a été effectuée par cinq (5) mines de fer desquelles quatre (4) sont situées à l'Est et une (1) au Centre du pays.

Durant l'année 2009, la holding privée ArcelorMittal, qui exploite les deux principales mines de fer de l'Ouenza et de Boukhadra dans la ville de Tébessa a produit 1 037 000 tonnes du minerai de fer en diminution de -39,6 % en comparaison avec l'année 2008, plus de détails sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Production du minerai de fer : durée 2008 - 2009.

N°	Opérateur	Gisements	Commune	Wilaya	Production 2008 (milliers de tonnes)	Production 2009 (milliers de tonnes)	Evolution (%)
1	ArcelorMittal	Ouenza	Ouenza	Tébessa	1 192	711	-40,4↓
2		Boukhadra	Boukhadra	Tébessa	525	326	-37,9↓
Somme					1 717	1 037	-39,6↓
3	SPA SOMIFER	Khanguet	Bekkaria	Tébessa	50	60	+20↑
4		Djebel Anini	Djebel Anini	Sétif	170	90	-47,1↓
5		Rouina	Rouina	Ain Defla	140	120	-14,3↓
Somme					360	270	-25↓
Total					2077	1307	-37,1↓

Toute la production de fer de la société ArcelorMittal est destinée à l'alimentation de son complexe sidérurgique d'El-Hadjar à Annaba (Ministère de l'Energie et des Mines, 2010).

1.6. Contexte géologique de la région de Tébessa

Wilaya côtière avec la Tunisie, la ville de Tébessa ou Thevest est localisée au plein Est Algérien, aux portes du désert, à approximativement 230 Km au Sud-Est de la ville d'Annaba (Derias, T., 2013). La figure 3 illustre la localisation de la ville de Tébessa.

En effet, la zone de Tébessa fait partie de l'Atlas Saharien, ce dernier c'est une chaîne montagneuse linéaire, qui se développe d'Ouest en Est de l'Algérie, il continue au-delà de la frontière sous le nom d'Atlas Tunisien. Les séries rencontrées là sont exclusivement sédimentaires, d'une époque conçus entre le Crétacé inférieur (Barrémien) et le Miocène, le tout par emplacement énormément recouvert de couvertures quaternaires, particulièrement dans les plaines. Quelques séries intrusives, triasiques, passent la couche sédimentaire provoquant divers désordres au niveau des séries encaissantes ; diminution d'épaisseur,

changement et éventuellement renversement du pendage (Ruault-Djerrab, M., et Khechid-Benkherouf, F., 2012).

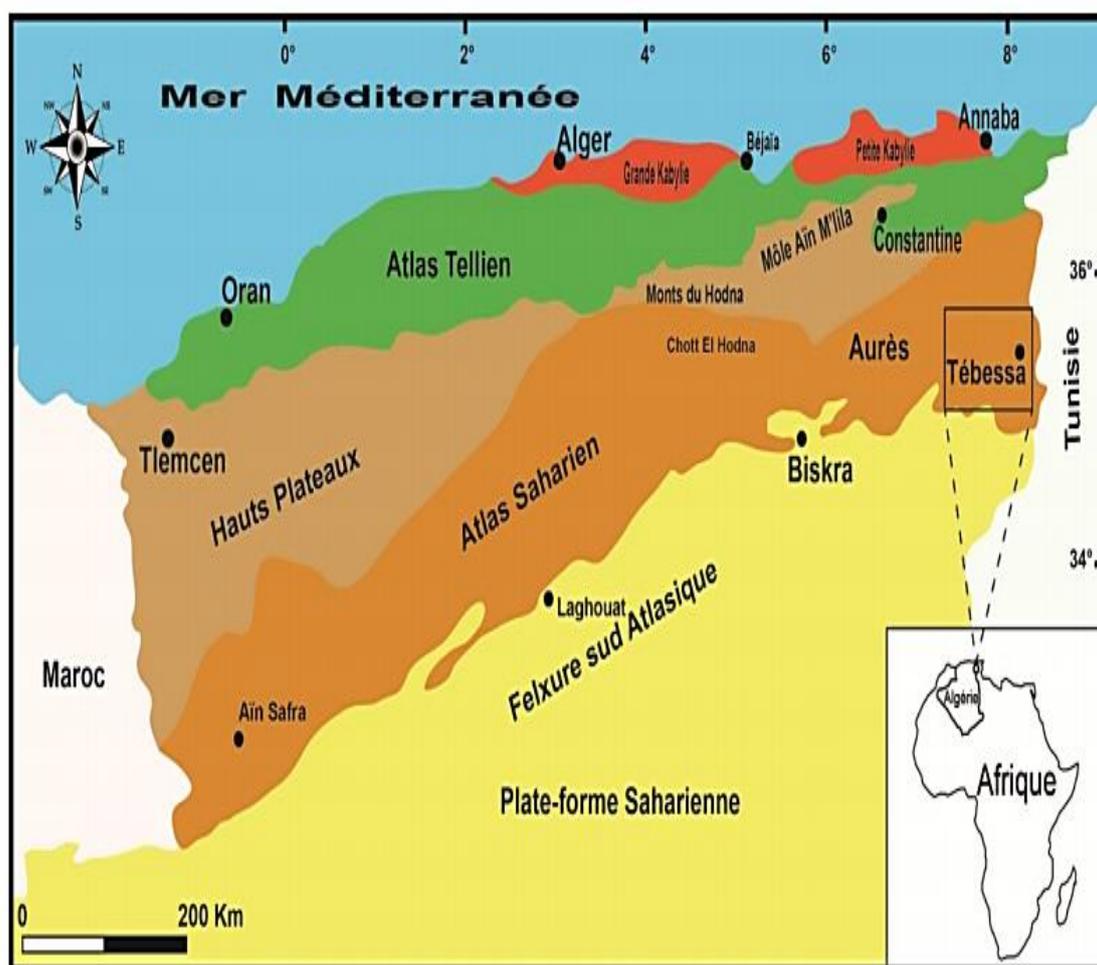


Figure 3. Tébessa dans l'Atlas Saharien oriental (Degaichia et Laouar, 2014)

1.7. Hydrogéologie de la ville de Tébessa

La wilaya de Tébessa passe sur deux systèmes hydrographiques étendus :

1- Le bassin versant de l'Oued Medjerda, ce dernier est partagé en 4 sous bassins versants englobant la côté Nord de Wilaya. Le ruissellement là est exoréique assuré par un nombre important de cours d'eau à l'instar de : Oued Mellégué, Oued Chabro, Oued Serdiess, Oued Ksob et Oued ElKebir.

2- Le bassin versant de l'Oued Melghir qui couvre la côté Sud de la ville. Le ruissellement ici est endoréique, il est pompé par les sources suivantes : Oued Cheria, Oued Helail, Oued Mechra, Oued Safsaf, Oued Gheznet, Oued Djarech et Oued serdiss qui alimentent les régions localisées au Sud (Bouabida, H., 2014).

1.8. Situation géographique de la mine de fer de Boukhadra

Le Djebel de Boukhadra est localisé sur l'Atlas Saharien, à l'Est Algérien (figure 4). La mine de Boukhadra se trouve à une élévation de 850 m, le point éminent du Djebel est de 1463 m. Le village de Boukhadra fait partie de la Wilaya de Tébessa. Il s'installe à 45 Km au Nord-Est de celle-ci, à 200 Km au Sud de la ville côtière d'Annaba et à 18 Km de la frontière Tunisienne, le minerai de fer est acheminé au complexe sidérurgique d'El Hadjar par deux voies : route ou transport ferroviaire (ArcelorMittal Tébessa, 2011).



Figure 4. Situation géographique de la zone d'étude (Source : Google Earth)

1.9. Historique de la mine

L'exploitation de la mine de Boukhadra fut entamée pendant l'époque Romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic. Ensuite, l'exploitation est menée sur le zinc et autres polymétaux.

À partir de 1926 à 1966, date de nationalisation des mines, c'était la société de l'Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra. Cette dernière avait effectuée de la recherche par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de Boukhadra.

Pendant la période de 1967 à 1984, la SONAREM était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères de l'Ouenza et Boukhadra.

De 1983-1984 et après la restructuration des entreprises, c'était FERPHOS qui gérât, exploitait et développait des recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national.

À partir de la date du 18/10/2001 et dans le cadre de coopération avec l'étranger, le holding L.N.M.N.V a signé l'accord de partenariat avec HADID Ouenza - Boukhadra.

Le 01/01/2005 la nomination a été changée par Mittal Steel Tébessa.

Le 18/08/2007 la nomination a été changée par ArcelorMittal Tébessa (ArcelorMittal Tébessa, 2012). La figure suivante montre les mines Algériennes en 1968.

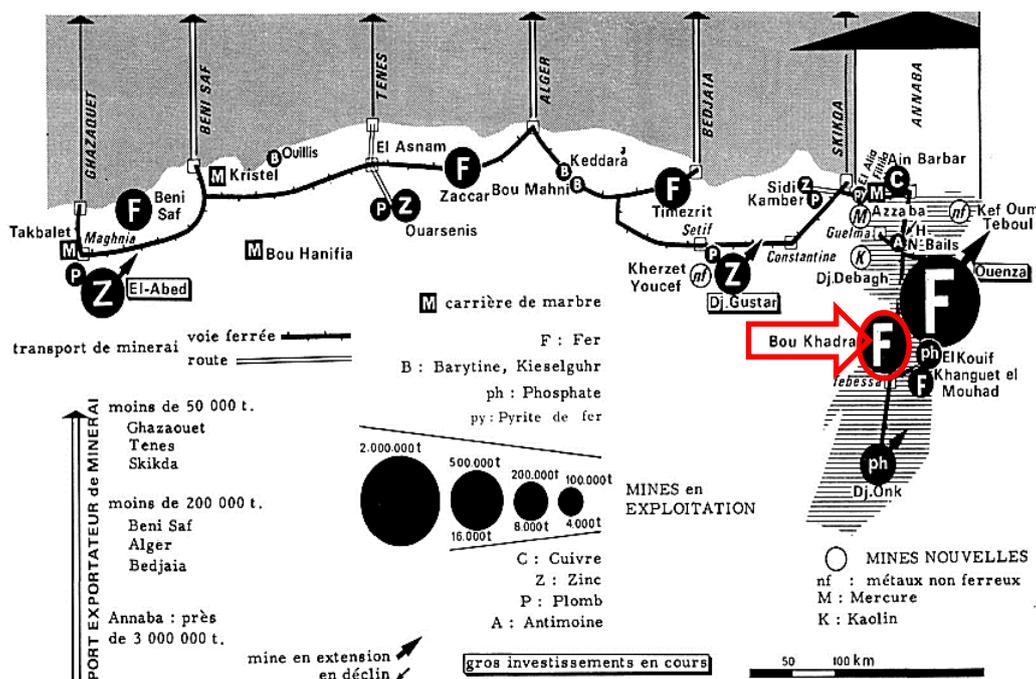


Figure 5. Les mines Algériennes en 1968 (Tomas, F., 1970)

1.10. Géologie de la mine de Boukhadra

La mine de Boukhadra est localisé entre 8° 01' et 8° 04' Est et entre 35° 40' et 35° 50' Nord. Le Djebel Boukhadra est une structure anticlinale constituée essentiellement par des sédiments mésozoïques et tertiaires en compagnie d'une couverture mince de quaternaire (Gadri L., et al., 2012). Plus d'informations sont indiqués dans la figure 6.

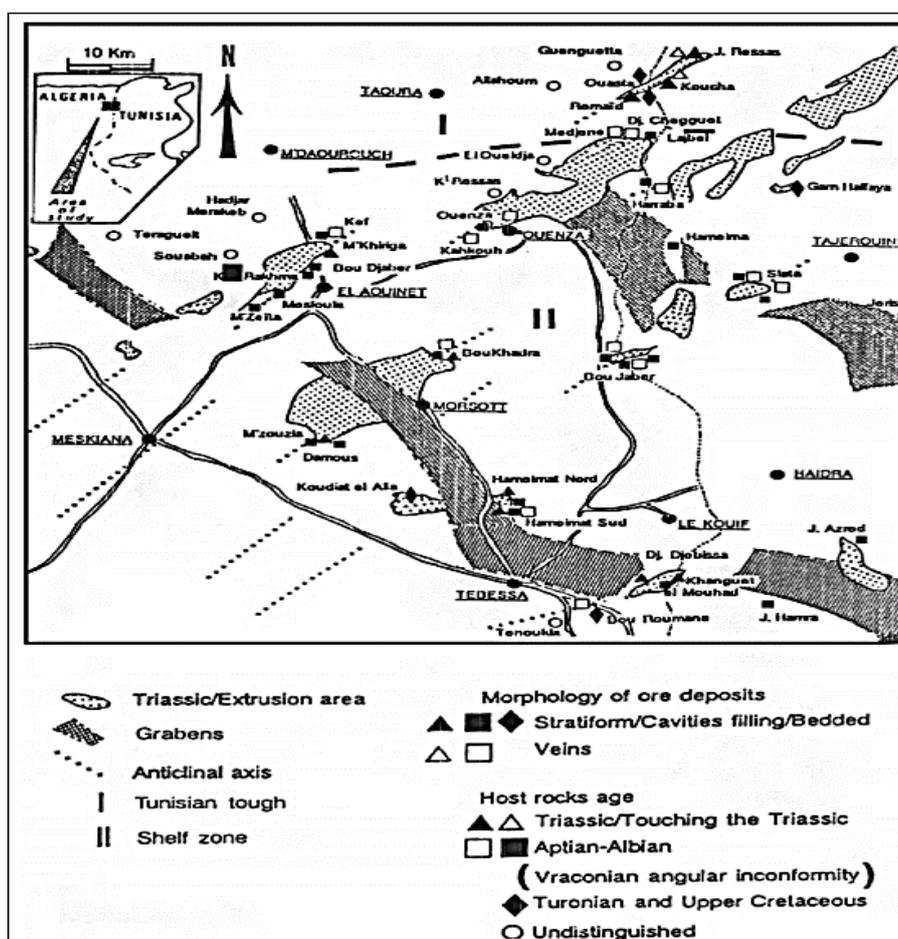


Figure 6. Position des extrusions triasiques par rapport aux fossés d'effondrement (Aoudjehane M., 1991)

D'après Parthusiot et al., 1998, sur la coté orientale de l'Afrique du Nord (Atlas Tunisien en Tunisie, monts du Mellègue et la frontière Algérienne-Tunisienne) se trouve de nombreux couches de Trias qui s'étendent sur une emplacement irrégulière sous l'effet de l'inclinaison tectonique régionale en comparaison avec la disposition du bassin salifère triasique, ils sont localisés dans des conditions structurales variées, dans l'avant-pays Nord Saharien peu plissé, dans la chaîne Atlasique moyennement plissée et écaillée et dans l'édifice Tellien dans lequel se réunissent les unités Allochtones, la figure 7 montre la colonne stratigraphique des monts de Mellègue.

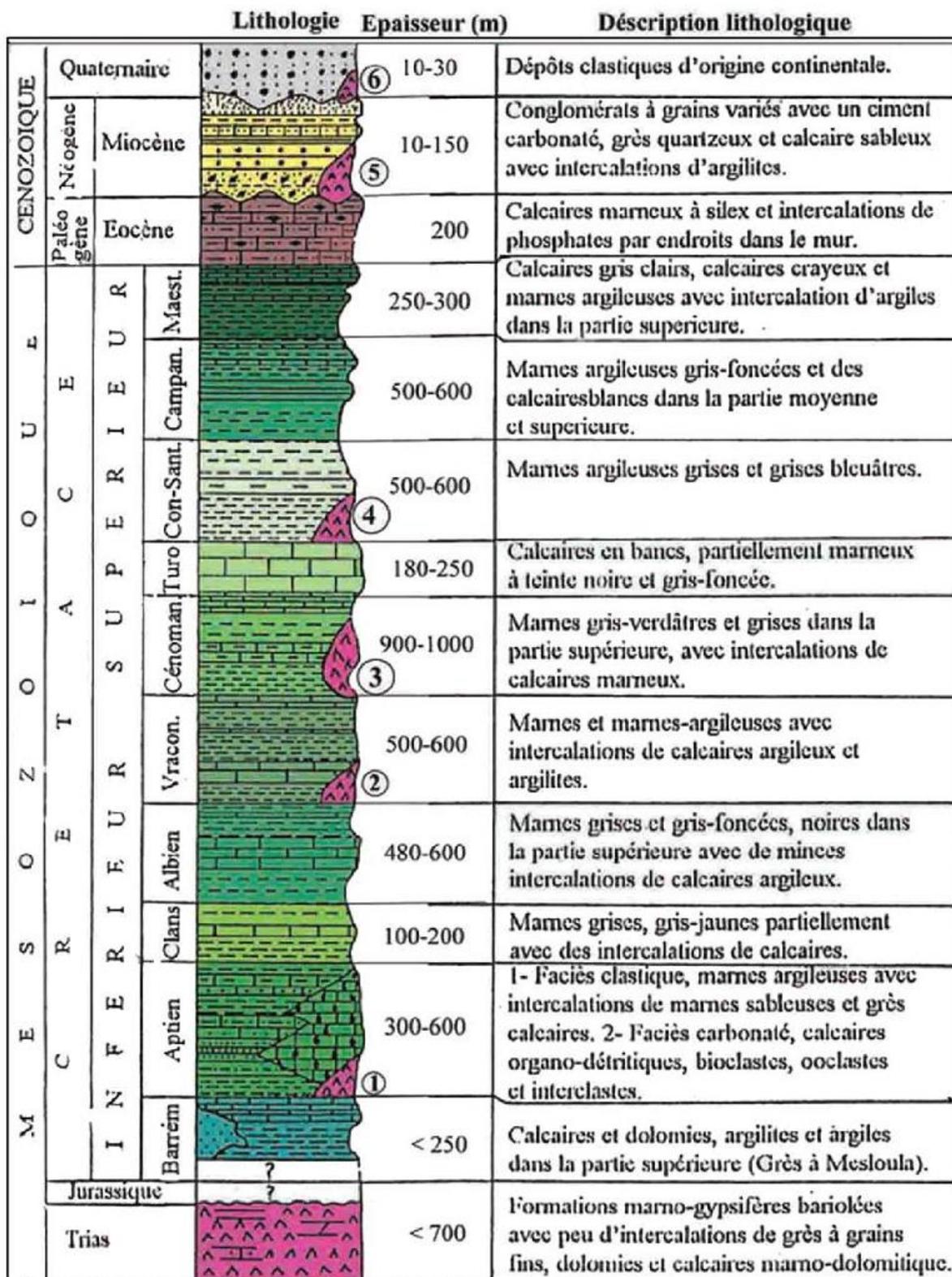


Figure 7. Colonne stratigraphique des monts du Mellègue

(D'après : Dubourdiou 1956, 1959 ; David 1956 ; Madre 1969 ; Fleury 1969 ; Thibieroz et Madre 1976 ; Chikhi, 1980 ; Otmanine 1987, Bouzenoune 1993 et Vila et al., 2000 in Sami, L., et Kolli, O., 2011)

1.11. Données climatologiques et hydrographiques

Le village de Boukhadra se distingue par une alternance d'une saison chaude et sèche et une saison froide et humide avec une pluviométrie moyenne annuelle faible variable de 300 à 400 mm, la température moyenne annuelle de la région est de (+15 °C) avec un minimum de (-5 °C) en hiver et un maximum allant jusqu'à (+ 45 °C) en été.

Le réseau hydrographique de Boukhadra est constitué de Oued El Harcha et Oued El Melali qui traversent Kharoubet el harcha et le Douar el khiana sur la direction NE-SW à l'extrémité Nord de Djebel Boukhadra. Les études hydrogéologiques menées par la Direction des Ressources Hydrauliques de la wilaya de Tébessa ne dévoilent aucune nappe aquifère en eau potable utilisable dans le village minier de Boukhadra (ArcelorMittal Tébessa, 2014).

1.12. Réserves du gisement

Quatre (04) corps minéralisés constituent le gisement du minerai de fer de Boukhadra avec des grandes et des petites veines de moindre importance : le corps principal, le corps nord, le corps médian et le corps Sud (figure 8).

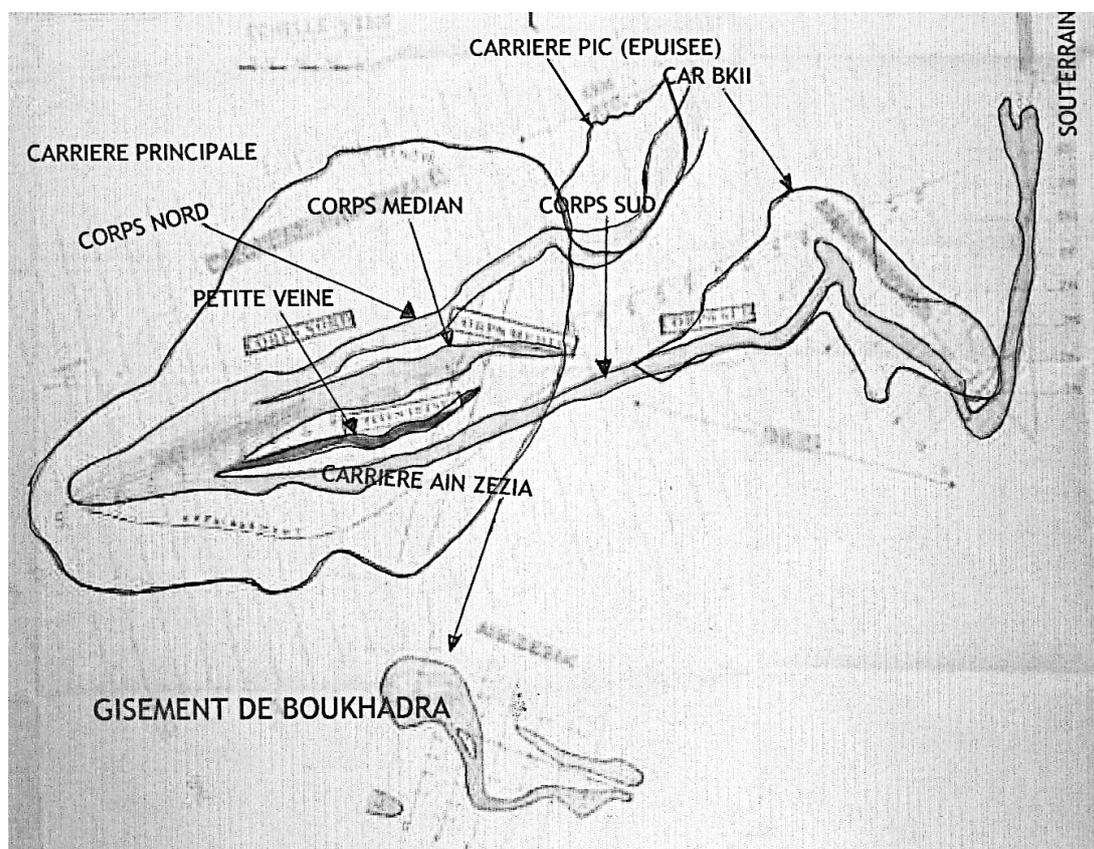


Figure 8. Morphologie du gisement de Boukhadra (ArcelorMittal Tébessa, 2012)

La modélisation en 3D du gisement de Boukhadra réalisé par Amec est donnée dans la figure 9.

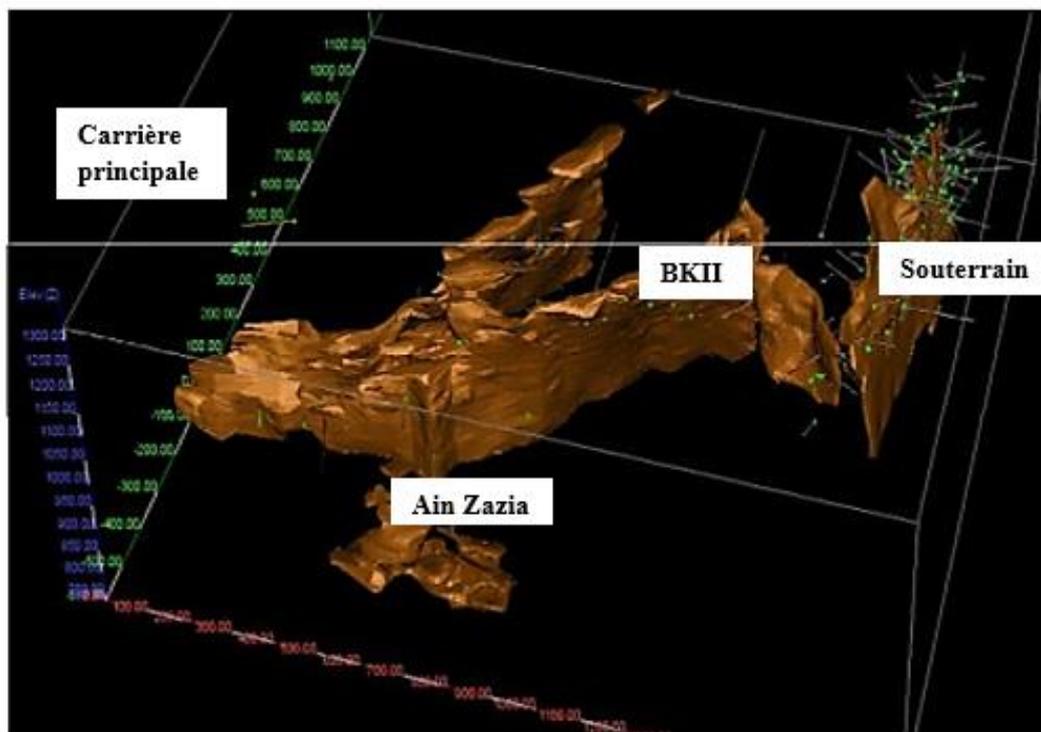


Figure 9. Représentation 3D - Boukhadra

Les réserves géologiques et exploitables de la mine de Boukhadra au 31/12/2013 sont représentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Réserves géologiques et exploitables de la mine de Boukhadra (ArcelorMittal Tébessa, 2012).

Site	Réserves géologique (Tonnes)	Réserves exploitables (Tonnes)
A ciel ouvert	14 637 724	13 459 630
Souterrain	32 535 592	31 181 800
Total mine	47 173 316	44 641 430

Il est à noter aussi que le gisement de Boukhadra qui occupe la seconde position en matière d'approvisionnement en minerai de fer au complexe sidérurgique d'El Hadjar - Annaba (après la mine de l'Ouenza) renferme également une réserve évaluée à peu près à 3 millions de tonnes du minerai de baryte (Benchiheub, O. Drozdov, N. Atoui, L., 1999).

1.13. Minéralisation du gisement

Le gisement du minerai de fer de Boukhadra est de forme lenticulaire de type hydrothermale sédimentaire d'une longueur variable de 900 à 2200 m et d'une puissance allant de 10 à 50 m ; sa minéralisation est de type fer hématite de formule chimique (Fe_2O_3) ; sa teneur moyenne est supérieur à 50 % (ArcelorMittal Tébessa, 2012). Le tableau 3 montre la composition chimique du minerai de fer de Boukhadra (ArcelorMittal Annaba, 2011).

Tableau 3 : Composition chimique du minerai de fer de Boukhadra

Eléments	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	H ₂ O	Soufre	P ₂ O ₅	Alcalins	PAF
Teneurs (%)	50,18	3,94	8,97	0,3	1,58	2,57	6,38	0,033	0,02	0,146	9,82

1.14. Exploitation de la mine de Boukhadra

D'après Gadri L., 2012, l'exploitation de la mine de Boukhadra s'effectuée par deux méthodes : à ciel ouvert et souterraine.

1.14.1. À ciel ouvert

Où l'ouverture est faite par des tranchées communes multiples, la hauteur du gradin est variable 15 m dans les parties amont et BKII, 12 m dans les parties avals et dans la carrière Ain zezia (hormis au site pic, elle est de 10 m).

Le forage se réalise avec des sondeuses, de chariots et de marteaux perforateurs, les diamètres des trous sont respectivement de 160 mm, 80 mm et de 26 mm.

L'abattage s'effectue à l'explosifs par tir électrique ; le chargement est fait au moyen de pelles mécaniques et de chargeuses sur pneus de capacité respectives de : 3,22 m³ ; 5,55 m³ et 6,3 m³.

Le transport est conduit en utilisant des camions de carrière vers le terril extérieur au périmètre d'exploitation sur une distance d'un (01) Km et vers le concasseur pour le minerai de fer sur une distance de quatre (04) Km.

Le traitement mécanique s'effectué avec un concasseur giratoire d'une capacité de 300 T/h et de granulométrie variable de 250 à 300 mm. Le minerai concassé est dirigé par bande transporteuse, jusqu'aux trémies de chargement situé à la gare, sur une distance de

1 Km là où il va être évacué dans des wagons de 60 T de charge utile en destination du complexe sidérurgique Arcelor Mittal - Annaba.

1.14.2. Souterraine

Généralement, les mines souterraines englobent plus de 60 % des réserves globales du gisement de Boukhadra. Actuellement, l'exploitation souterraine est concentrée sur l'axe Nord du 3^{ème} étage (1105/1165), alors que les travaux de développement se réalisent au l'axe Sud Est, l'axe principal et une partie de l'axe Nord du 3^{ème} étage 1105/1165 et du 4^{ème} étage (niveau 1045), des nombreux phases peuvent être rencontré dans le niveau souterrain :

- 1^{ère} phase (épuisée) ;
- 2^{ème} phase (épuisée) ;
- 3^{ème} phase (en exploitation et en développement) ;
- 4^{ème} phase (en projet).

Il est à signaler que, la méthode d'exploitation en sous-niveaux abattues avec une hauteur de 15 m a donnée des résultats satisfaisants (ArcelorMittal Tébessa, 2013).

Le processus d'exploitation de la mine de fer de Boukhadra est schématisé dans la figure suivante.

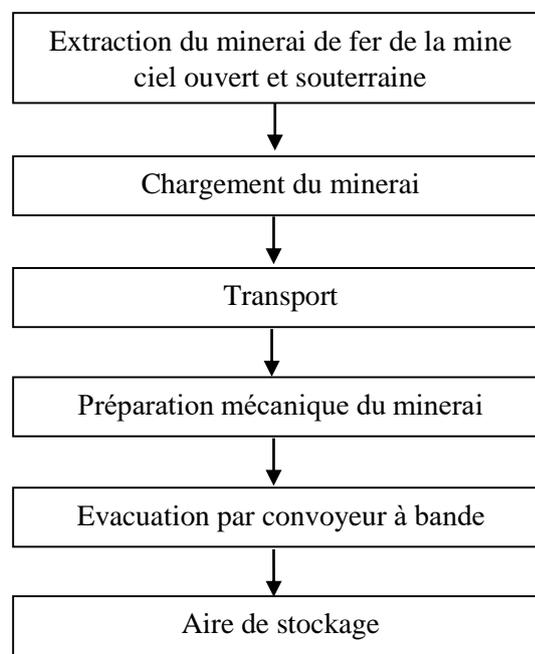


Figure 10. Cycle d'exploitation de la mine de fer de Boukhadra

1.15. Conclusion

Etant donné l'objectif de cette thèse, nous nous sommes focalisés dans ce chapitre sur la présentation générale de la zone d'étude.

L'analyse des conditions géologique et minière de la mine de Boukhadra nous a mené de déduire que ce gisement ferrugineux localisé dans le Djebel Boukhadra est caractérisé par une formation géologique multiple, il est de forme lenticulaire de type hydrothermale sédimentaire. Le minerai y est extrait par deux modes d'exploitation ; à ciel ouvert et souterraine. Ce gîte représente donc une source pour l'extraction du minerai de fer hématitique largement demandé d'après sa teneur.

Chapitre 2 : Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra

Sommaire :

- 2.1. Introduction
 - 2.2. Cycle de vie d'une mine
 - 2.3. Notions sur les déchets
 - 2.4. Besoin de l'exploitation des ressources minérales
 - 2.5. Teneur de coupure
 - 2.6. Les déchets miniers
 - 2.7. Généralités sur la pollution
 - 2.8. Impacts environnementaux des déchets miniers
 - 2.9. Le développement durable
 - 2.10. Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra
 - 2.11. Conclusion
-
-

2.1. Introduction

La mine de fer de Boukhadra appartient aux monts de Mellègue et elle renferme des grandes quantités des déchets qui posent vraiment des problèmes environnementaux. D'après Mlayah, A., et al, 2005, Mellègue est la région minière la plus importante en Algérie. L'exploitation minière y génère des déchets gazeux, liquides et solides qui peuvent contenir également des substances toxiques.

Toutefois, la classification des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra peut contribuer à leur gestion et leur valorisation en respectant les critères établis par le développement durable.

2.2. Cycle de vie d'une mine

Avant la découverte d'un gisement métallique il est obligatoire, le plus souvent, d'entamer des travaux de prospections intenses au début du déroulement du processus minier. Une fois les premières indications constatées, les géologues estiment la rentabilité du gîte à travers des études sur sa dimension et sa concentration. Lorsque le gisement est considéré comme économiquement rentable, l'entreprise commence les travaux de développement et de construction des installations et ce avant la mise en service de l'activité industrielle d'extraction et de traitement de minerais. La clôture des installations (fermeture et abandon) intervient juste au bout du cycle de vie de l'opération minière (Figure 11).

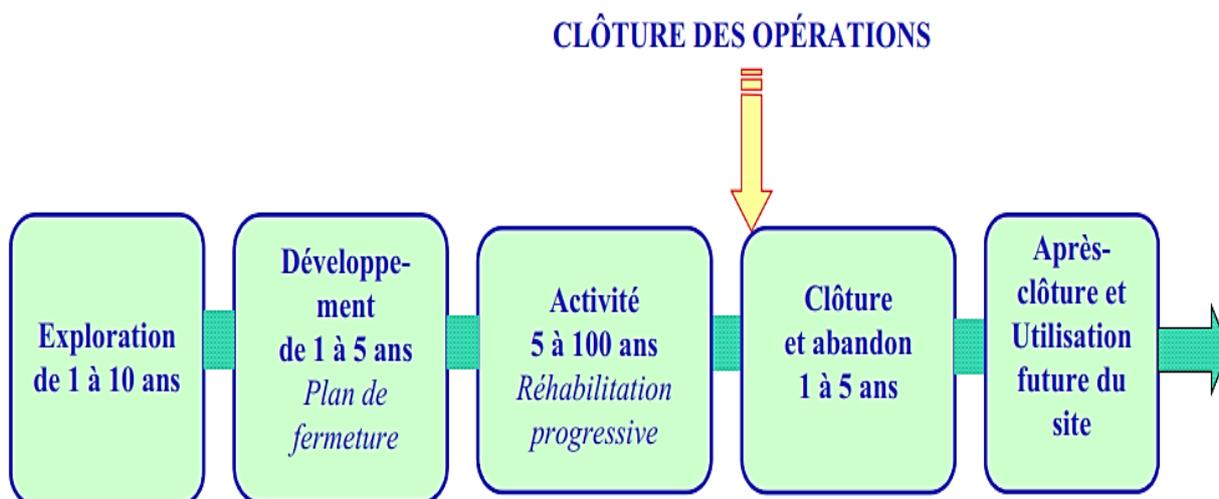


Figure 11. Déroulement d'une opération minière (Artignan D., Cottard F., 2003)

2.3. Notions sur les déchets

Au sens de la réglementation Algérienne, les déchets englobent les trois grandes classes suivantes (Djemaci, B., 2012) :

2.3.1. Déchets ménagers et assimilés

Ce sont tous les déchets proviennent des ménages, des activités industrielles, commerciales, artisanales et autres, qui sont assimilables aux déchets ménagers par leur nature et leur composition à l'instar des déchets de cuisine, les emballages, etc.

2.3.2. Déchets spéciaux

Ce sont les déchets qui ne sont pas assimilés aux déchets ménagers et qui demandent un mode spécifique de traitement en raison de leur nature et de leur composition. La provenance de ces déchets est l'activité industrielle, agricole, les soins, les services et toutes autres activités, qui ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés.

2.3.3. Déchets inertes

Ce sont spécialement les déchets qui ne subissent aucun changement physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge. Ces déchets proviennent de l'exploitation des mines, des carrières, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation. Ils ne sont pas contaminés par des substances toxiques ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles à affecter la santé humaine et à l'environnement.

2.4. Besoin de l'exploitation des ressources minérales

L'objectif principal de l'exploitation des mines est de satisfaire la demande en métaux et en minéraux en vue d'optimiser les infrastructures et d'améliorer le mode de vie des individus (Commission européenne, 2009). En outre, à partir de la naissance de l'humanité, l'exploitation des ressources organiques et minérales ont vigoureusement contribué au développement de populations locales. Le développement et la progression des sociétés est en fonction de ses richesses en ressources naturelles spécialement les métaux et les minéraux au sens large, ce qu'il a rapproché l'homme à la civilisation (âge de cuivre, de bronze et de fer). Parmi les substances minérales qui sont indispensables au développement de la civilisation

moderne on peut rencontrer ; l'acier pour les chemins de fer, le cuivre pour l'électricité, l'aluminium pour les ustensiles, le silicium pour les micro-processeurs, le lithium pour les batteries, etc. (Bouzahzah, H., 2013), le schéma suivant montre les étapes standards à suivre pour obtenir un métal.

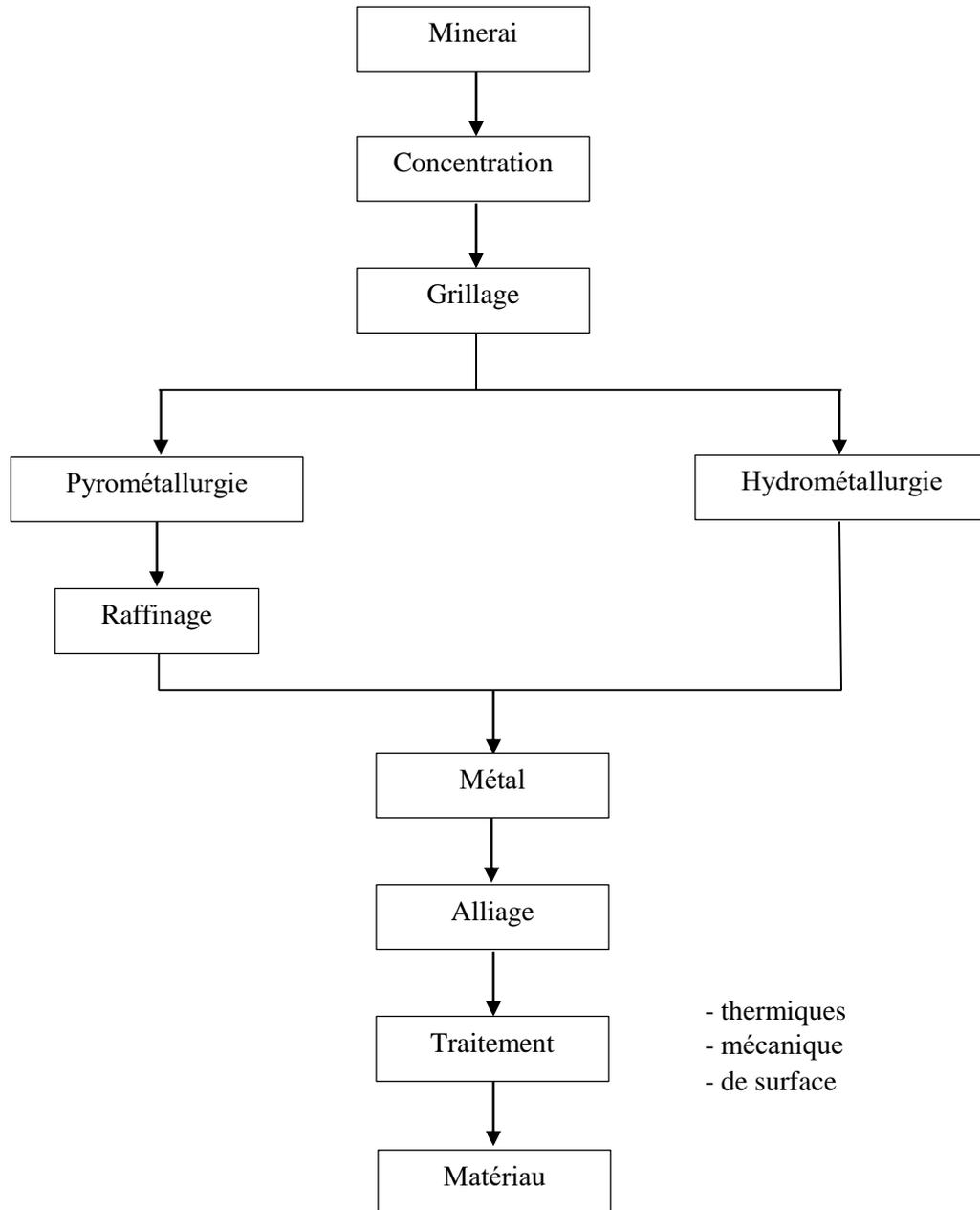


Figure 12. Schéma général de l'élaboration des métaux (Vignes J., et Jehanne Y., 2003).

2.5. Teneur de coupure

C'est un paramètre essentiel qui définit la destination des minéraux prévenants de l'exploitation minière. Quand la teneur moyenne du minerai est supérieure à la teneur de coupure, celui-ci est donc dirigé à l'usine de traitement ; dans le cas inverse, il est conduit à la verse à stérile, sans quoi dans un stock pour une valorisation future (Vega, J., 2012).

2.5.1. Types de teneur de coupure

On peut distinguer les deux types de teneur de coupures suivantes (Taylor, H., 1972) :

2.5.1.1. Teneurs de coupure de planification

Pendant la prospection et aux différentes phases de la planification de l'exploitation d'un gîte, une teneur de coupure est indispensable pour déterminer géographiquement et quantitativement les limites du minerai. Vu que zéro information exacte sur l'exploitation minière probable n'est encore éprouvée au début de la prospection d'un gisement, la teneur de coupure de planification à ce stade est semi-quantitative : elle a pour but de prédire la valeur du minerai qui pourra vraisemblablement être exploité ou traité.

2.5.1.2. Teneurs de coupure d'opération

La teneur de coupure d'opération est indispensable au début de l'exploitation afin de préciser exactement quelle section du minerai peut être conservée en stock et quelle section peut être transportée, cette teneur est subdivisée en trois classes :

a) Teneur de coupure à la mine

Le minerai au-dessus de cette teneur est exploité, celui en dessous demeure sur place.

b) Teneur de coupure au concentrateur

Le minerai extrait au-dessus de cette teneur est transporté vers l'usine d'enrichissement pour être concentré. Le minerai en dessous de la coupure est jeté ou déposé pour un traitement postérieur (mis sur des haldes séparées).

c) Teneur de coupure à la fonderie

Le concentré au-dessus de cette teneur est purifié et vendu. Elle peut également être appliquée à des inclusions existantes dans le concentré. Les décisions sur les teneurs de

coupure sont entreprises en cours de production, même si ces teneurs ont reçu déjà une évaluation préalable à l'étape de la planification à l'instar de teneur optimale de phosphate admissible dans un concentré de fer.

2.6. Les déchets miniers

L'exploitation des mines représente l'ensemble des travaux d'extraction des substances minérales de la terre afin d'en tirer profit, ces substances peuvent être des minerais métalliques à savoir le fer et le cuivre, les minéraux non métalliques comme le sable et le gravier et les combustibles fossiles tel que le charbon (Espinoza, D., et al., 2012).

Pour Aubertin, M., et al., 2002, l'exploitation minière et le traitement des minerais génèrent des différents genres de déchets, qui doivent être managés de façon rationnelle, intelligente et sécuritaire en vue de préserver l'environnement. Néanmoins, Les déchets miniers, que ce soit les stériles francs, les stériles de sélectivité ou les résidus de traitement des minerais représentent un risque direct et une source sérieuse de contamination qui peuvent affecter le biotope (Itard Y., Bosc R., 2001).

Les déchets miniers représentent l'ensemble des matériaux ou bien dépôts découlant de la recherche, de l'exploitation ainsi que de traitement du minerai (figure 13). Ils peuvent être naturels comme les stériles francs et la gangue ou artificiels résultants de l'enrichissement tel que les rejets de concentrateur (Mijno, V., 2007).

2.6.1. Types déchets miniers

Pendant l'exploitation d'un gîte, la mine génère une énorme quantité de déchets solides et liquides qui peuvent être classés comme suit (Ghorbel, M., 2012) :

2.6.1.1. Les roches stériles

Ce sont les roches qui doivent être enlevé pour accéder au minerai recherché, la gangue qui a été séparée du minerai contient peu de métaux. Ces haldes stériles sont généralement très étendues, ils sont constitués de fractions d'une granulométrie variant de l'ordre du mètre jusqu'à des grains de quelques micromètres.

2.6.1.2. Les déchets de traitement du minerai

Les déchets de concentrateurs sont composés de la portion non économique du minerai obtenue après la récupération des minéraux à prix commercial. Ils découlent habituellement du broyage du minerai et sont très fins (plusieurs dizaines à quelques centaines de microns),

ils se présentent sous forme d'une pulpe à leur sortie de l'usine de traitement. Les rejets de concentrateur sont déposés sous forme de terrils stabilisés par des digues ou bien par le relief du terrain.

2.6.1.3. Les déchets liquides

Ils sont généralement composés de l'eau découlant du pompage de la mine et celle employée en cours du traitement du minerai. Cette dernière peut être infectée en réactifs de l'enrichissement (cyanure, moussants, collecteurs), en matière en suspension et en métaux. Les déchets liquides renferment aussi les eaux qui circulent à travers les surfaces d'entreposage des rejets solides (haldes à stériles ainsi que les terrils de déchets de laverie).

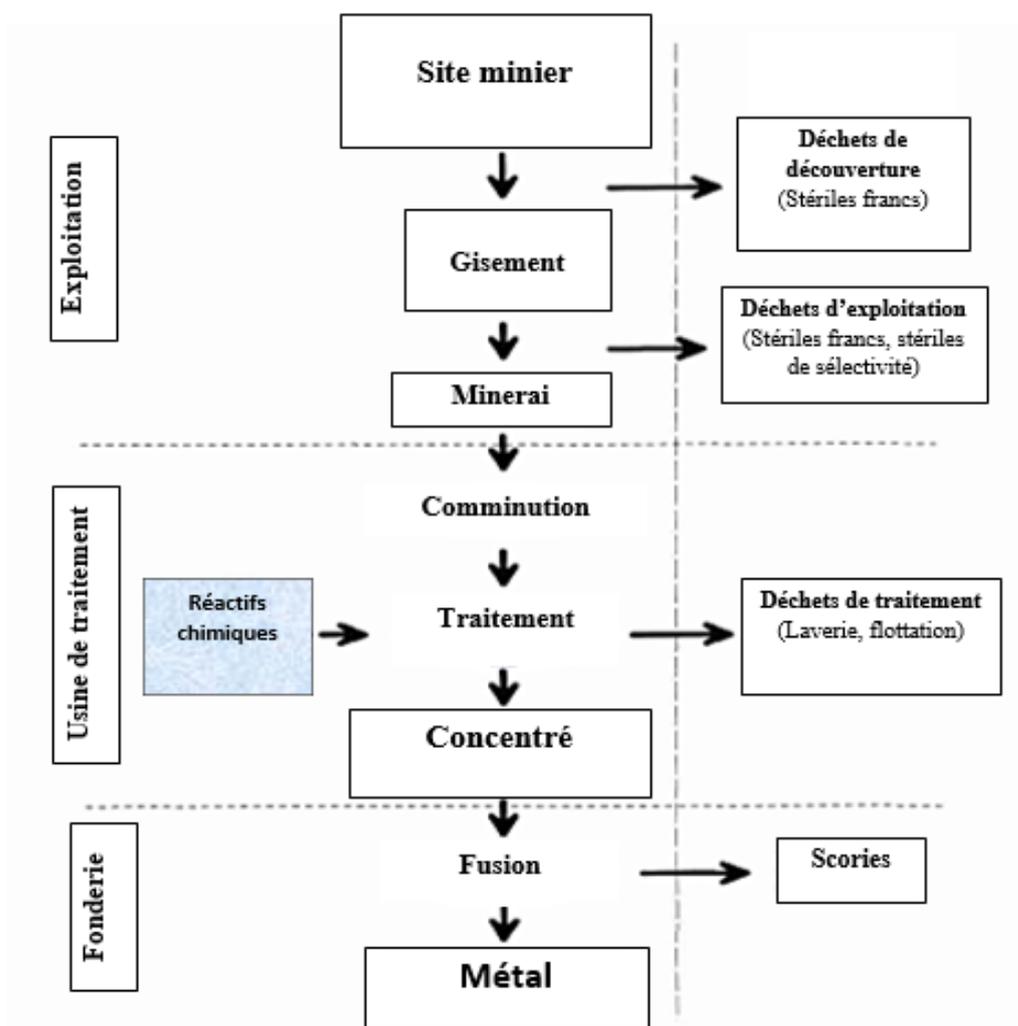


Figure 13. Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants (BRGM, 1997)

2.7. La pollution

On dit qu'il y a une contamination quand une substance potentiellement dangereuse est introduite artificiellement dans un milieu naturel, quelle que soit sa teneur (contaminant). On dit qu'il y a une pollution si la teneur est potentiellement dangereuse, ou bien lorsqu'elle touche les valeurs limites établies par les normes, le contaminant est donc un polluant.

Ces substances sont rejetées vers les milieux de transfert et d'exposition ; l'air, l'eau et le sol, deux catégories de pollution du sol peuvent être distinguées (BRGM, 2000) :

2.7.1. Pollution ponctuelle

Les pollutions ponctuelles c'est le jet ou l'épandage de polluants sur une aire étroite, que l'on peut considérer une source comme le montre cette figure ;

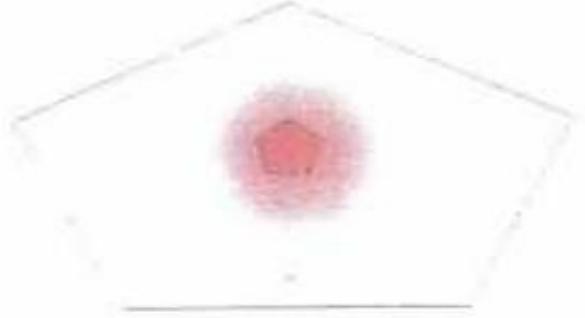


Figure 14. Pollution ponctuelle

2.7.2. Pollution diffuse

Les pollutions diffuses autrement dit l'épandage ou la retombée de polluants sur une grande surface comme indiqué dans la figure suivante.

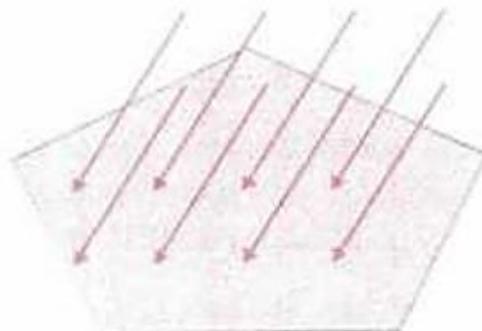


Figure 15. Pollution diffuse

Pour chacune de ces catégories de pollution, les deux provenances suivantes peuvent être distinguées :

a) Les pollutions accidentelles

C'est le dépôt ou l'épandage ponctuel de polluants, dans lequel une quantité importante de polluant est déversée en fonction du temps.

b) Les polluants chroniques

Ou bien l'apport continu de polluants par fuite ou par lixiviation, duquel les impacts cumulés peuvent être très significatifs que ceux d'une pollution accidentelle

2.8. Impacts environnementaux des déchets miniers

2.8.1. Pollution due à l'exploitation minière

Les opérations minières troublent la nappe phréatique dans le zone en exploitation, celles-ci auraient des impacts direct sur les riverains avoisinages de la mine à travers la contamination des eaux superficielle et souterraines (Deb, P., 2014).

Il est évident que les roches et les minéraux exposés aux différentes conditions climatiques subissent des altérations intenses représentées par une fracturation mécanique, sous l'effet de la température et du gel-dégel de l'eau incluse dans les roches, la dissolution de quelques minéraux, sous l'effet de l'eau ou d'une attaque chimique via plusieurs éléments contenus dans l'eau. L'altération mène à la libération et la dissolution des composants des minéraux et à leur mobilisation pour le transport, de temps en temps sur de longue distance. C'est le drainage des roches ainsi que des minéraux (Mermillod-Blondin, R., 2005).

2.8.2. Pollution due aux installations de gestion des résidus

Les rejets et la poussière provenant des installations de mangement des résidus et des stériles qui sont subis ou non une surveillance, peuvent apparaitre dangereux à divers niveau pour l'homme, les animaux et les plantes. Les effluents peuvent être acides ou bien alcalins et renfermer des métaux dissous et/ou des composants organiques complexes solubles et insolubles entraînés lors du traitement du minerai comme des substances organiques probablement présentes à l'état naturel, tel que les acides humiques et carboxyliques à longue chaîne résultant de l'exploitation minière. Les matériaux qu'englobent les émissions, leur pH, leur teneur en oxygène dissous, leur température et leur dureté peuvent tous être des aspects

déterminants dans la nocivité des émissions pour l'écosystème récepteur (Commission européenne, 2009).

2.8.3. Pollution des sols par les métaux issus des déchets solides

Les sols peuvent être atteints par l'épandage ou bien le dépôt de matériaux solides comportant de fortes concentrations en métaux. Ces rejets solides représentent une source puissante de pollution, ils peuvent subir autres altérations physiques et/ou chimiques et dégager des métaux dans la phase liquide du sol. Les polluants dissous peuvent être transportés par les eaux d'infiltration vers le sol naturel adjacent et les eaux souterraines. La libération des métaux provenant des déchets solides vers l'environnement immédiat s'effectue de manière hétérogène (Dermont, G., 2008).

2.8.4. Le drainage minier

Le drainage minier c'est la génération d'effluents dont la qualité autre que celle de l'eau d'origine en cours de l'exploitation minière et/ou à son abandon.

Sur l'aspect chimique, l'ennoyage provoque la mise en solution des minéraux néoformés pendant l'exploitation, couramment riches en métaux et à la reprise des ruissèlements naturels, l'eau présente souvent une composition chimique autre que celle d'origine et a une qualité inadéquate avec ses emplois précédents (figure 16).

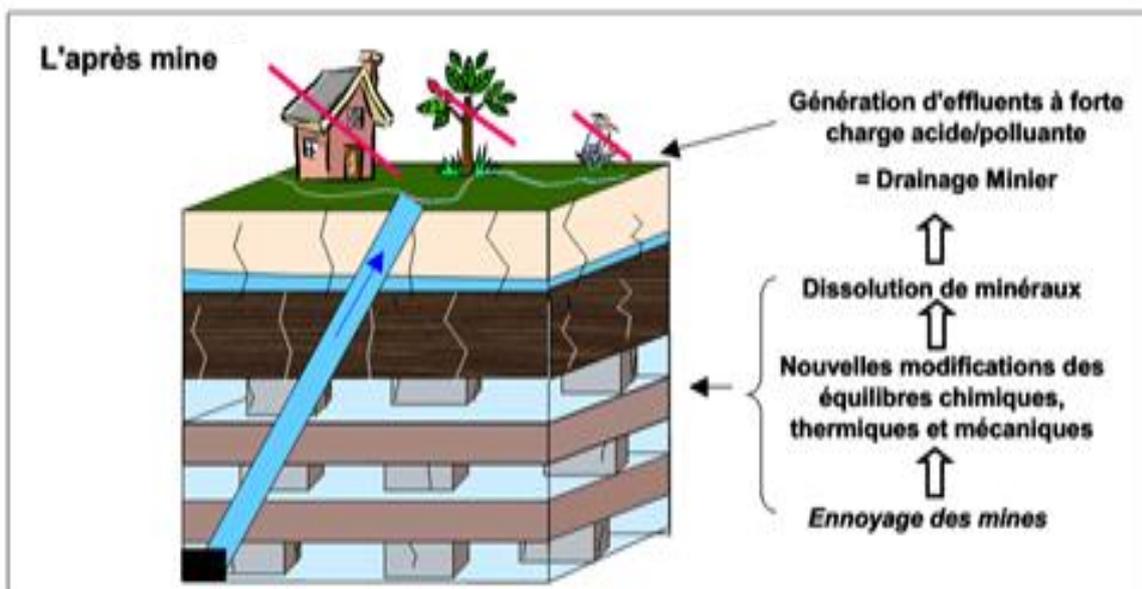


Figure 16. Le drainage minier (Collon, 2004)

2.9. Le développement durable

Le développement durable peut être défini comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins (Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, 1989).

Le développement durable repose subséquemment sur le principe de la subsidiarité et s'effectue au niveau le plus proche de la base à l'intersection entre les impératifs écologique, social et environnemental, c'est la raison pour laquelle ce concept a été modélisé sous la forme de trois boules (figure 17).

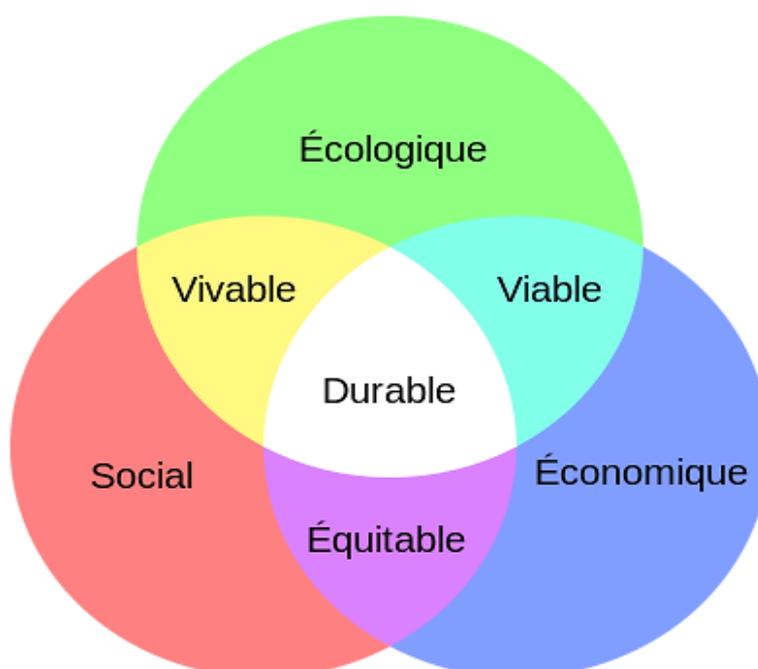


Figure 17. Modélisation du développement durable

Source de figure :

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Sch%C3%A9ma_du_d%C3%A9veloppement_durable.svg (page consultée le : 08/06/2018)

Baumann E., (2011) classe les enjeux du développement durable en trois types à savoir :

2.9.1. Les enjeux économiques

Le développement durable devrait permettre d'intégrer des préoccupations autres que financières dans le fonctionnement des acteurs économiques. Du fait de la distribution

irrégulière de la richesse produite entre les pays et entre les couches sociales d'un même pays, l'enjeu économique consisterait à redonner à l'économie sa place dans la société.

2.9.2. Les enjeux environnementaux

Ils concernent fondamentalement les points suivants :

- Le réchauffement climatique et ses conséquences : montée du niveau de la mer, augmentation de la fréquence et de la puissance d'évènements climatiques violents ; tempêtes, inondations, canicules, etc. Les scientifiques prévoient une augmentation de la température de 1,4 à 5,8 degrés d'ici 2100.
- L'usure de la biodiversité : on considère que le rythme d'extinction des espèces est plusieurs centaines de fois plus rapide depuis l'époque contemporaine que celui couramment observé à l'échelle géologique.
- L'épuisement des ressources naturelles et pollution : le calcul de l'empreinte écologique de l'humanité, par exemple la surface nécessaire pour produire toutes les ressources essentielles à son fonctionnement, montre que l'homme exploite la terre au-delà de ses capacités (si tous les habitants du monde vivaient comme un européen, il faudrait l'équivalent de deux autres terres pour satisfaire leurs besoins).

2.9.3. Les enjeux sociaux

Ils concernent généralement, l'augmentation des inégalités au niveau international (20 % de la population concentre 80 % des richesses produites par an), la pauvreté et l'accès aux besoins nécessaires (eau potable, aliment, logement, travail, soins, enseignement, etc.). Par exemple, aussi qu'un milliard de personnes vivent avec moins de 1 (un) dollar par jour et sont privées d'accès aux besoins fondamentaux et un européen sur six vit dans la pauvreté, les maladies hydriques provoquent 2,2 millions de morts par an (desquels 1,5 million d'enfants), etc.

2.10. Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra

Généralement, les déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra se composent des roches stériles (stériles francs), les stériles de l'exploitation (minerai de fer pauvre) en plus des stériles résultants du concassage, du transport des minerais par convoyeur ou par camion et de station d'homogénéisation (figure 18).

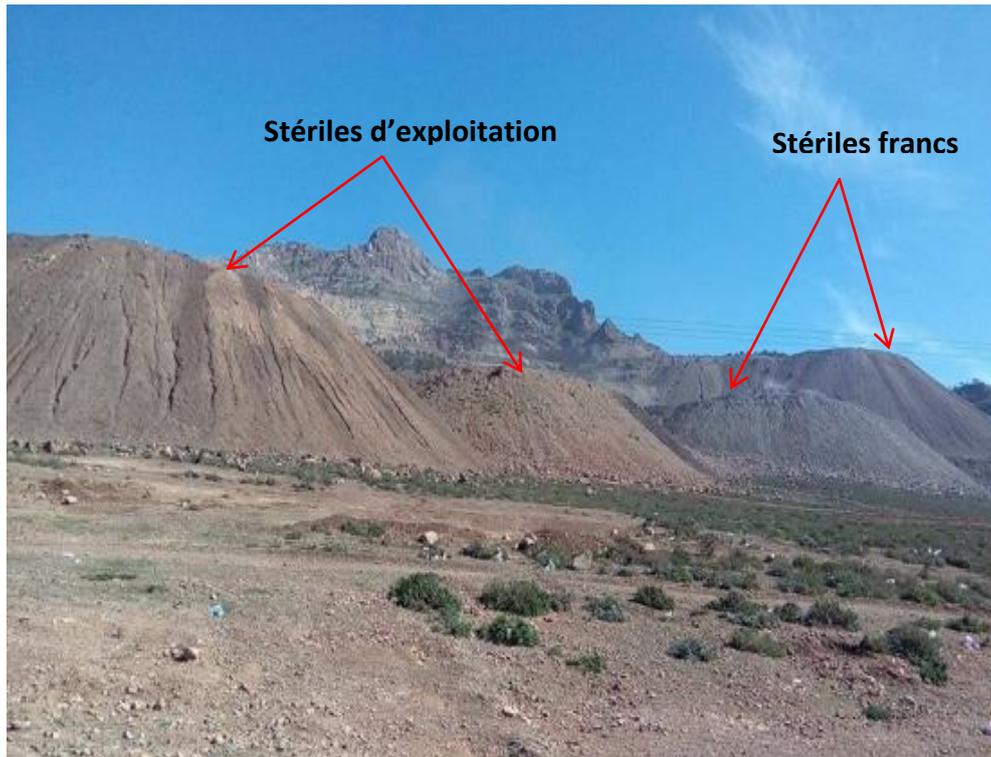


Figure 18. Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra

Selon le mode d'exploitation, il y a deux types des déchets miniers stockés dans la mine de Boukhadra :

- Déchets miniers générés par la mine à ciel ouvert.
- Déchets miniers générés par la mine souterraine.

Il est à noter aussi que la quantité des déchets miniers générés par les mines à ciel ouvert est beaucoup plus importante que celle de la mine souterraine puisque l'exploitation souterraine est effectuée directement dans le corps minier (elle produit peu des déchets miniers). Les experts estiment que les déchets miniers de Boukhadra ont un volume total d'environ 30 millions de tonnes, ils sont répartis sur une superficie d'environ 10 hectares.

Les déchets miniers en question sont stockés dans la partie aval de la mine (figure 19), selon leur nature on peut les classés en trois catégories :

- Déchets liquides (huiles et hydrocarbures, les eaux d'exhaures de la mine).
- Déchets solides (rejets miniers, batteries, pneu, ferrailles).
- Déchets gazeux (poussières, gaz carbonique).



Figure 19. Vue générale sur le site minier de Boukhadra

Ces déchets entravent le processus d'exploitation et gênent les habitants locaux par leurs effets néfastes sur l'environnement ; occupation des sols naturels, glissements des terrains, poussière, contamination de l'eau (figure 20). Comme exemple sur les impacts des déchets miniers ; le 9 décembre 2006, six travailleurs sont tués lors de l'effondrement des tas des décharges de déchets miniers de fer dans les mines de Tollem à Goa, en Inde (Chaturvedi, N., Patra H. K., 2016).



Figure 20. Exemple sur le phénomène de lessivage du minerai de fer de Boukhadra à la sortie de concasseur (CNTTP, 2014).

2.11. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons passé en revue à la théorie des déchets et les enjeux du développement durable. Nous avons présenté aussi les impacts liés à l'exploitation de la mine et le stockage des déchets miniers.

Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des déchets miniers de la mine de Boukhadra et leurs effets sur l'écosystème. Ces déchets miniers, en fait, sont générés beaucoup plus par la mine à ciel ouvert, le volume de déchets miniers stockés sur le carreau de la mine de Boukhadra représente des réserves minérales considérables. Cela provoque plus tard la pollution de l'air, de l'eau et des sols, ce qui nécessite des solutions urgentes pour la bonne gestion de l'environnement.

Chapitre 3 : Caractérisation physico-chimique et minéralogique des stériles francs de la mine de Boukhadra

Sommaire :

-
-
- 3.1. Introduction
 - 3.2. Généralités sur l'échantillonnage
 - 3.3. Protocole d'échantillonnage des stériles francs
 - 3.4. Caractérisation minéralogique des stériles francs
 - 3.5. Caractérisation physico-chimique des stériles francs
 - 3.6. Caractérisation des stériles d'exploitation
 - 3.7. Etude environnementale sur les déchets miniers de Boukhadra
 - 3.8. Conclusion
-
-

3.1. Introduction

D'après Laganière, D., 2002, l'objectif principal de la caractérisation est de définir les caractéristiques physico-chimiques des rejets miniers, en même temps l'identification et la quantification des phases minérales existantes. Ces caractéristiques permettront, en fait, de déterminer les différents facteurs de contamination ainsi que de choisir les approches de valorisation adéquates en vue d'une bonne gestion environnementale.

3.2. Généralités sur l'échantillonnage

On désigne par le terme échantillonnage toute opération qui a pour but de représenter un objet d'une certaine étendue, par une fraction de taille restreinte par le biais d'une grandeur que l'on veut déterminer (Ben Ammar, S., 2006).

3.2.1. Types d'échantillonnage

En fonction de la nature de l'échantillon prélevé, deux grandes catégories d'échantillonnages peuvent être distingués (Deverly, F., 1984) :

3.2.1.1. *Echantillonnage géologique*

Il est employé à un stade très amont d'une prospection. Son but essentiel est de déterminer la zone minéralisée et de donner des informations sur l'ordre de la teneur moyenne de l'indice. Son implantation est couramment préférentielle.

3.2.1.2. *Echantillonnage minier*

Il est utilisé aux divers stades d'une exploration (analyse de réserves, faisabilité...) ou d'exploitation. La minéralisation ayant été déterminée précédemment, cet échantillonnage est exécuté d'une façon systématique. Son premier objectif est de réaliser des estimations.

3.2.2. Types d'échantillon

Suivant le but visé par le plan de l'étude, on peut rencontrer les deux types des échantillons suivants (Environnement canada, 2002) :

3.2.2.1. *L'échantillon ponctuel*

Il découle d'une station d'échantillonnage unique, il peut être acquit via un ou plusieurs coups de benne.

3.2.2.1. L'échantillon composite

Il résulte de divers endroits, en respectant l'égalité des caractéristiques, les échantillons sont ultérieurement homogénéisés.

Généralement, les échantillons prélevés sont homogénéisés et ils sont par la suite assujettissent aux ensembles des analyses de la caractérisation tel que l'analyse par la Microsonde, DRX, MEB, infrarouge, FX, dont l'objectif principal est de construire la carte d'identité de l'échantillon (Machault J., 2012). La figure 21 illustre l'organigramme des méthodes de caractérisation les plus utilisées.

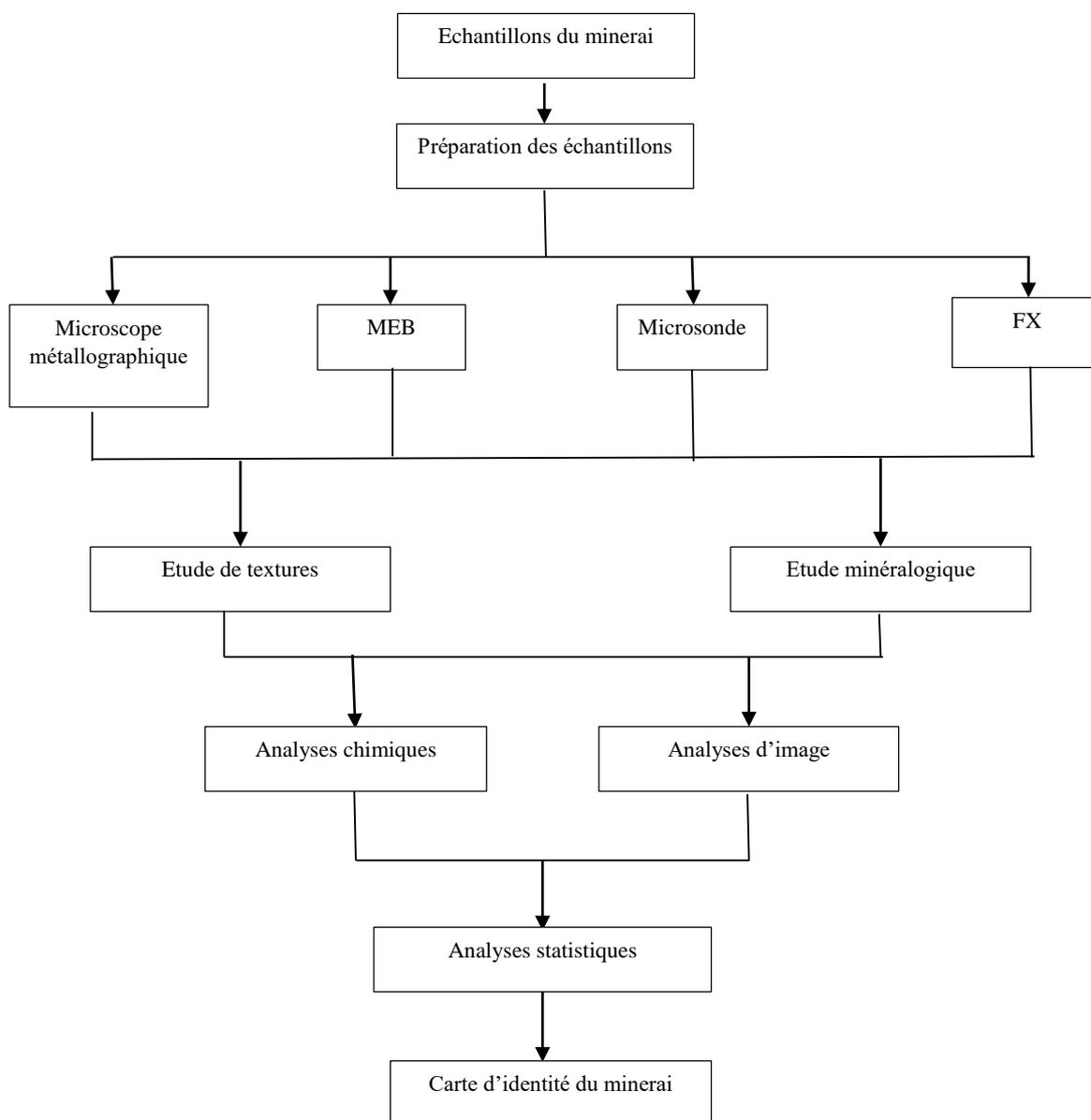


Figure 21. Organigramme de préparation et caractérisation physico-chimique d'un minerai

3.3. Protocole d'échantillonnage des stériles francs

Dans cette étude, des échantillons de roches stériles ont été prélevés de différents points de la zone de stockage des déchets miniers de la mine Boukhadra. Selon Bailey, B. et al., 2016, les stériles francs sont définis comme étant les roches qui ont des teneurs non-économiques extraits en vue d'accéder aux gisements des minerais utiles. Il est à noter aussi que ces déchets miniers découlent principalement de la mine à ciel ouvert. La composition minéralogique des roches stériles en question est : Calcaire, minerai de fer, marnes jaunes et grises, les étapes à suivre pour la caractérisation des déchets miniers de Boukhadra sont récapitulés dans la figure 22.

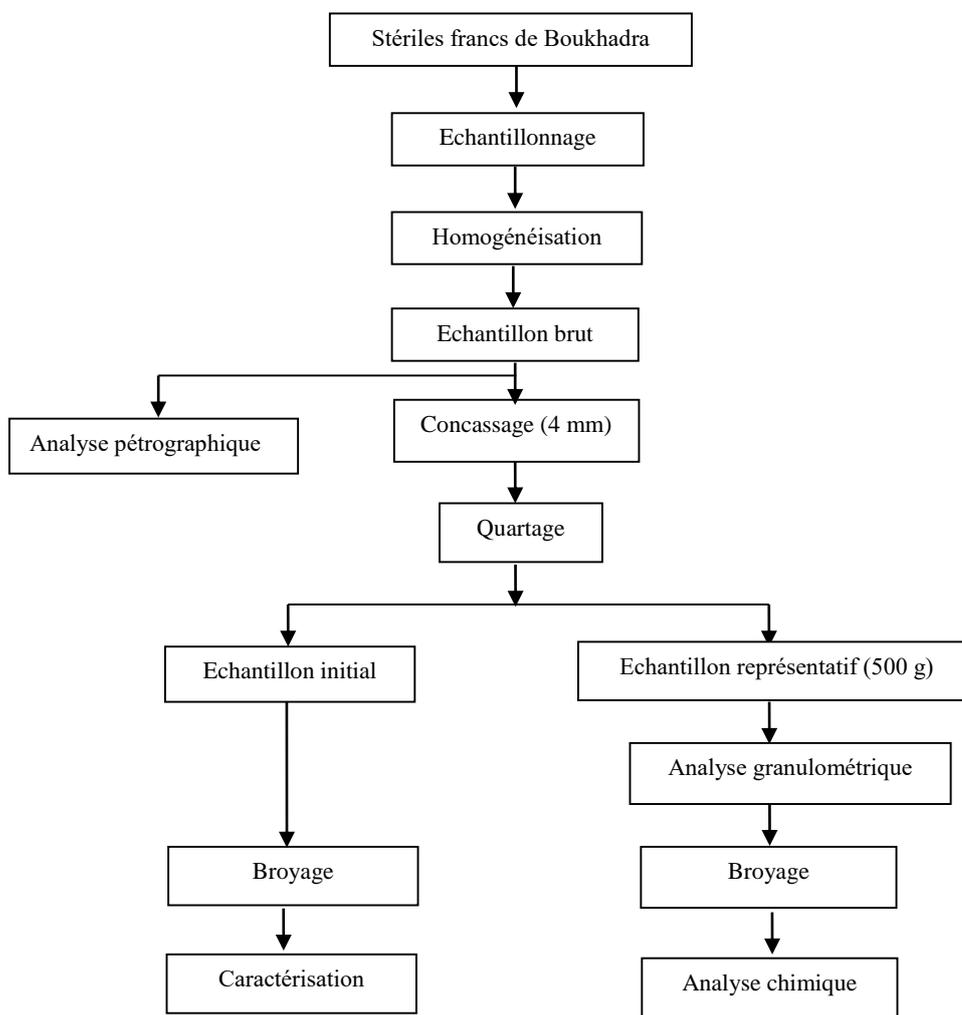


Figure 22. Protocole d'échantillonnage des stériles francs de Boukhadra

La disposition des points de prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra sont indiqués dans la figure 23.



Figure 23. Points de prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de Boukhadra

Le tableau 4 montre les coordonnées UTM des points du prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de Boukhadra.

Tableau 4 : Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra

Echantillon	X	Y	Z
1	413778,63	3956867,16	998
2	413785,06	3956779,52	980
3	413753,81	3956967,07	1014
4	413873,61	3956877,82	1013
5	413666,27	3956867,63	1004
6	413703,41	3956932,68	1003
7	413827,32	3956936,45	1018
8	413870,79	3956820,93	1003
9	413710,01	3956798,16	975
10	413877,06	3956796,38	999
11	413787,20	3956715,08	965
12	413674,15	3956730,74	957
13	413605,37	3956811,93	971

3.4. Caractérisation minéralogique des stériles francs

La caractérisation représente la phase cruciale de la gestion intégrée des déchets miniers de Boukhadra, puisqu'elle identifie ses propriétés et elle donne une prévision relative à ses futures comportements vis-à-vis l'environnement.

3.4.1. Analyse pétrographique

L'examen des lames minces et des sections polies des échantillons représentatifs des stériles francs de la mine de Boukhadra a été effectuée au sein du département de géologie (Université Badji Mokhtar - Annaba) en utilisant un microscope polarisant en lumière transmise équipé d'une caméra couleur. Cette étude a permis d'identifier les catégories des roches suivantes :

3.4.1.1. Calcaire gris

Calcaire gris avec des filonnes de calcite secondaire. L'échantillon est recoupé par la calcite de remplissage (figure 24).

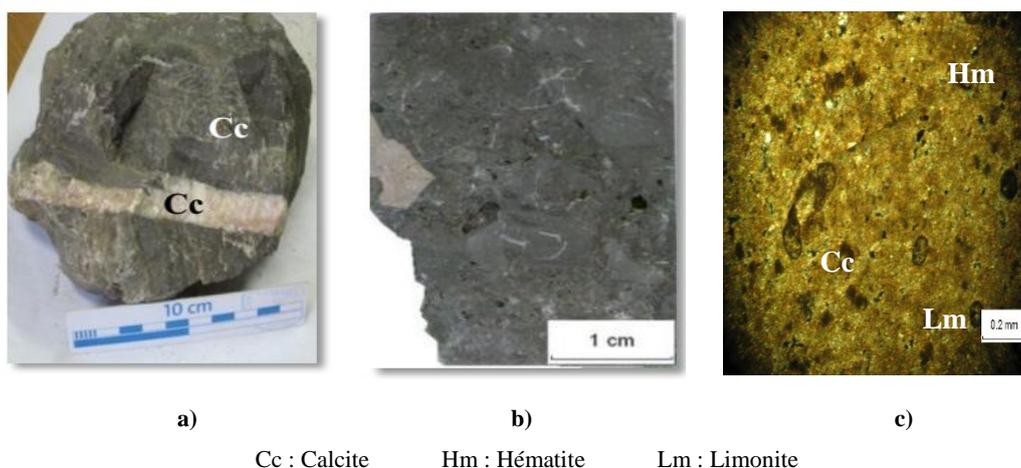


Figure 24. Analyse pétrographique du calcaire gris,

- a) Calcaire gris avec des filonnets de calcite secondaire,
- b) Section polie du calcaire gris,
- c) Microphotographie en lumière polarisée analysée d'un calcaire gris avec des traces d'oxydes et hydroxydes de fer.

3.4.1.2. Minerai de fer

Minerai de fer partiellement altéré en hydroxyde de fer. L'échantillon présente de nombreuses traces d'altération sous forme de veinules de limonites ainsi que de vacuoles de corrosion à remplissage de calcite (figure 25).

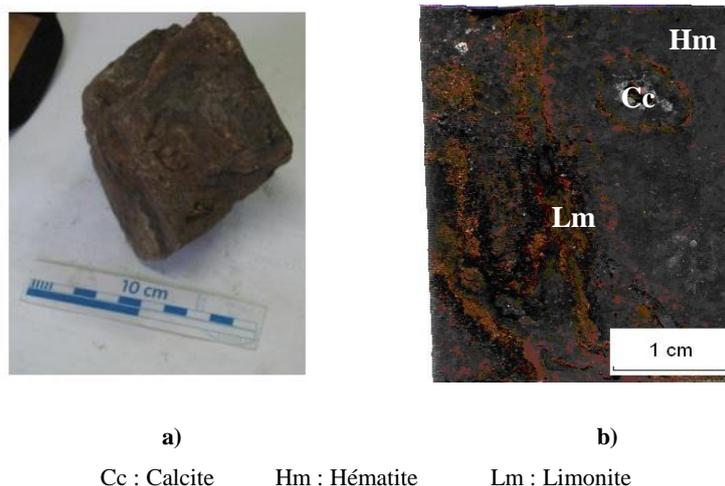


Figure 25. Analyse pétrographique du minerai de fer,

- a) Minerai de fer partiellement altéré en hydroxyde de fer,
- b) La section polie montre de nombreuses traces d'altération.

3.4.1.3. Marnes grises

Marne grise, massive, comportant des enchevêtrements millimétriques de calcite aciculaire. Certains échantillons présentent des vacuoles de lessivages (figure 26).



Figure 26. Analyse pétrographique de la marne grise,

- a) Photo d'une marne grise,
- b) Section polie d'une marne grise montrant des vacuoles de lessivage ainsi que des veinules de remplissage de calcite,
- c) Microphotographie en lumière polarisée d'une marne grise avec des traces de calcite aciculaire.

3.4.1.4. Marnes jaunes

Marne jaune massive avec de rares traces d'hydroxydes de fer (limonite). La roche présente de nombreuses traces d'oxydation et d'altération (figure 27).

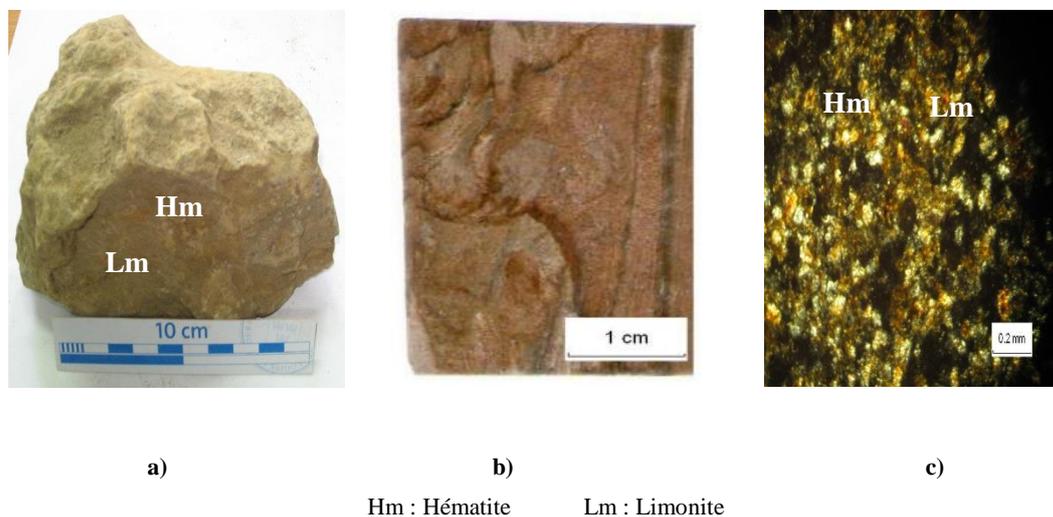


Figure 27. Analyse pétrographique de la marne jaune,

- a) Marne jaune massive avec de rares traces d'hydroxydes de fer,
- b) Section polie avec de nombreuses traces d'oxydes et hydroxydes de fer,
- c) Microphotographie en lumière polarisée analysée d'une marne jaune avec des traces microscopiques d'oxydes et hydroxydes de fer.

La figure 28 montre les opérations de quartage et homogénéisation qui intercalent chaque stade de préparation des échantillons des stériles francs de la mine de Boukhadra.



Figure 28. Opérations de quartage et homogénéisation des stériles francs de Boukhadra

3.4.2. Analyse qualitative des stériles francs par diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique analytique puissante et non destructive qui a comme objectif de caractériser les matières cristallines. Elle donne des informations sur les structures, les phases, la texture ainsi que la dimension moyenne des grains, la contrainte et les défauts cristallins (Bunaciu, A., UdrișTioiu, E., et Aboul-Enein, H., 2015), la figure 29 présente les différents comportements d'un diffractomètre.

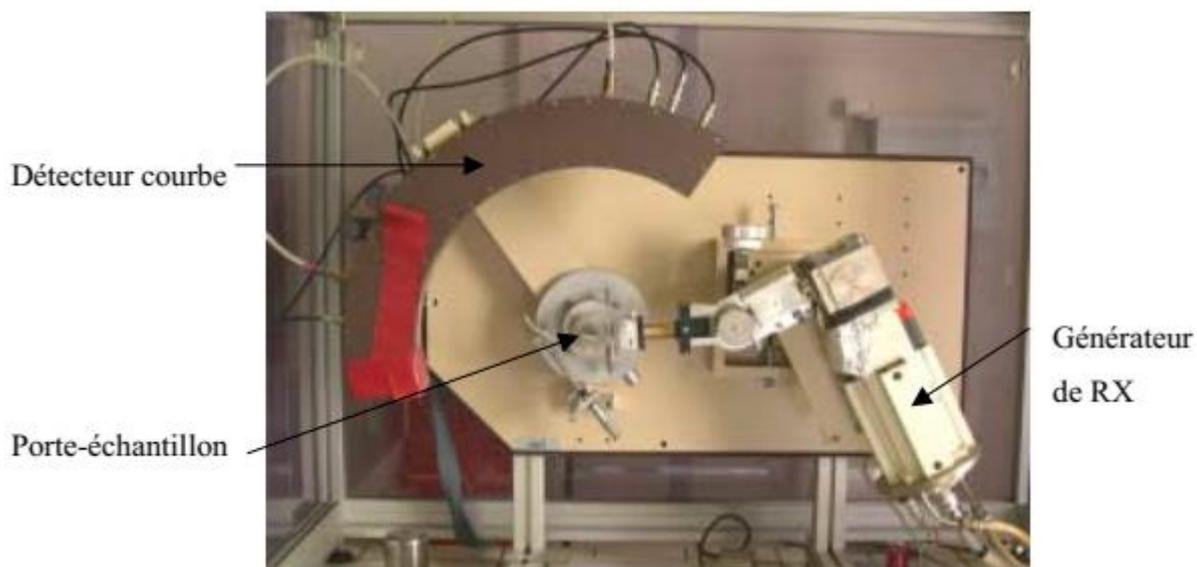


Figure 29. Exemple de diffractomètre de laboratoire (Bertholon, J., 2002)

L'analyse par DRX d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra effectuée dans l'office national de la recherche géologique et minière (ORGM) - Boumerdès a révélé les phases minérales suivantes : Calcite, Quartz, Goethite et Hématite (figure 30).

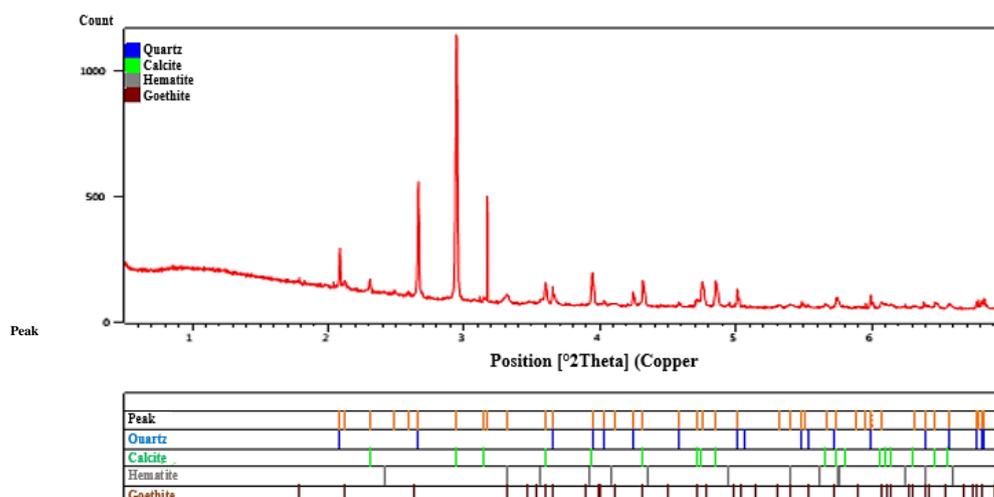


Figure 30. Analyse par DRX d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra

3.4.3. Analyse des haldes stériles par Microscope Electronique à Balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de caractérisation des matières cristallines qui, à partir de l'analyse des signaux émis pendant les interactions électron-solide, permet de représenter tous les aspects du solide tel que la topographie, les liaisons chimiques et la distance entre les atomes adjacents (Le Gressus, C., 1995).

La figure 31 montre un exemple sur les différents compartiments d'un microscope électronique à balayage du laboratoire (Guerba H., 2014).



Figure 31. Microscope Electronique à Balayage.

L'analyse par MEB des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra a été effectuée à l'école nationale supérieure des mines et métallurgie-Annaba (ENSMM). Cette analyse illustre des grains de calcaires découpés (CaCO_3), cela montre que les déchets n'ont pas subi une attaque acide, des microorganismes, des sphérules de silice (SiO_2), des grains d'alumines (bauxite Al_2O_3) sub-arrondis et des débris de cristallites d'hématite (Fe_2O_3) à partir desquelles on peut deviner les formes hexagonales. Les formes des grains témoignent le traitement mécanique préalable car le morcellement est visible par le MEB tout autour des grains, d'autres éléments ont été détectés par le MEB comme : P, Mg, Ba (voir la figure suivante).

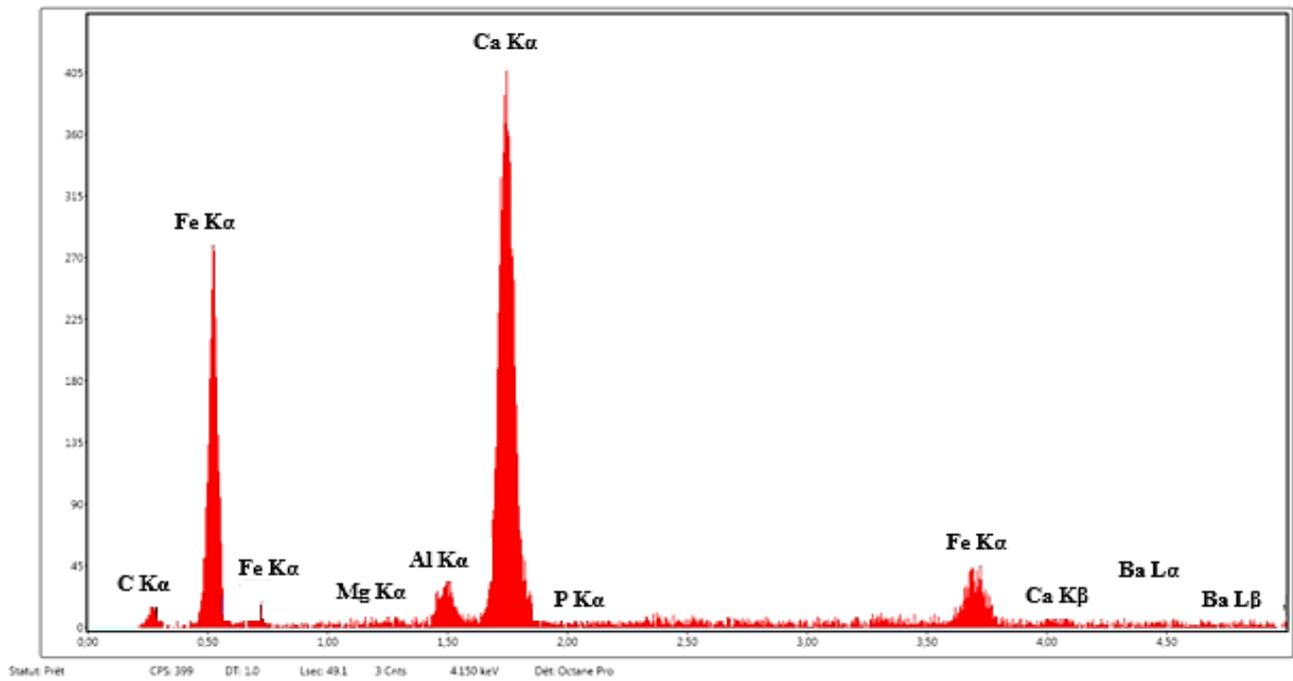
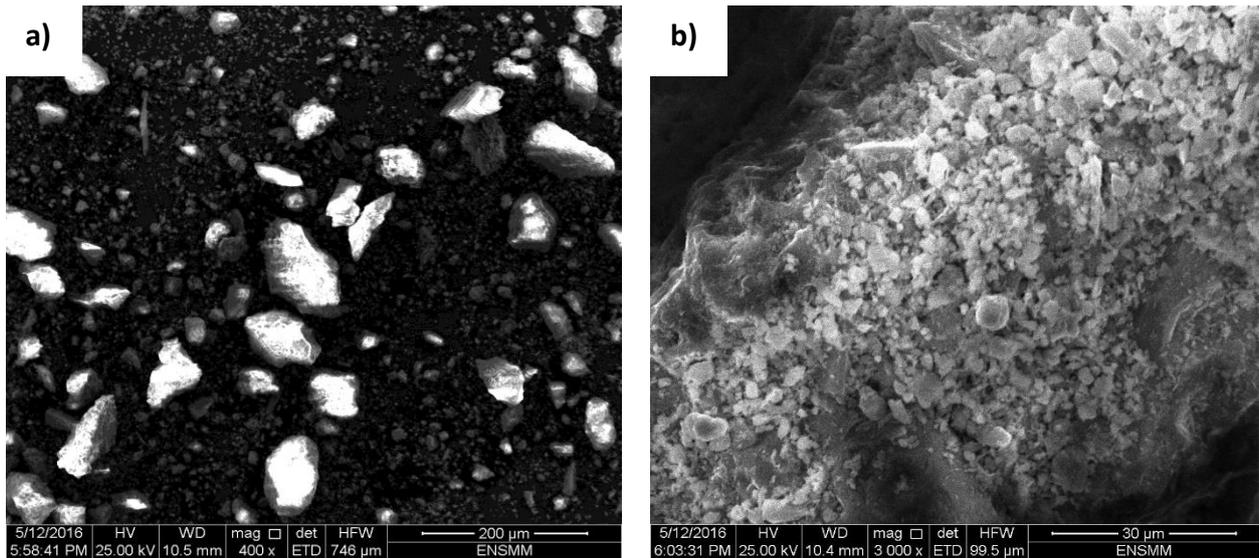


Figure 32. Observation par microscope électronique à balayage d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra (a : X 400, b : X 3000) et les spectres associés

3.5. Caractérisation physico-chimique des stériles francs

3.5.1. Analyse granulométrique

D'après Mériaux, S., 1953, l'objectif principal de l'analyse granulométrique est de déterminer la taille et la distribution des diamètres des grains et cela par l'usage d'une série des tamis normalisés comme il est présenté dans la figure 33.

Aujourd'hui, des différentes séries de tamis sont trouvable dans le marché, elles se différencient selon le rapport de l'ouverture de deux tamis consécutifs tel que (Robert, M., 1982) :

- La série Tyler couramment utilisée, de progression $\sqrt[4]{2}$.
- La série normalisée AFNOR X 11507, de progression $\sqrt[10]{10}$.



Figure 33. Tamiseuse électrique de type RITSH

L'analyse granulométrique menée sur un échantillon des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra concassé à 4 mm montre un rendement élevé de 24,6 %, ce dernier a été enregistré dans la classe -4+2 mm, les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 5 et la figure 34.

Tableau 5 : Résultats de l'analyse granulométrique d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra

Diamètre des grains (mm)	Masse (g)	Pourcentage massique (%)	Refus cumulus (%)
>4	60,3	12,06	12,06
-4+2	123,0	24,6	36,66
-2+1	92,6	18,52	55,18
-1+0,5	71,2	14,24	69,42
-0,5+0,25	69,7	13,94	83,36
-0,25+0,125	42,2	8,44	91,8
-0,125+0,063	21,2	4,24	96,04
-0,063+0,045	13,60	2,72	98,76
<0,045	6,2	1,24	100
Total	500	100	-

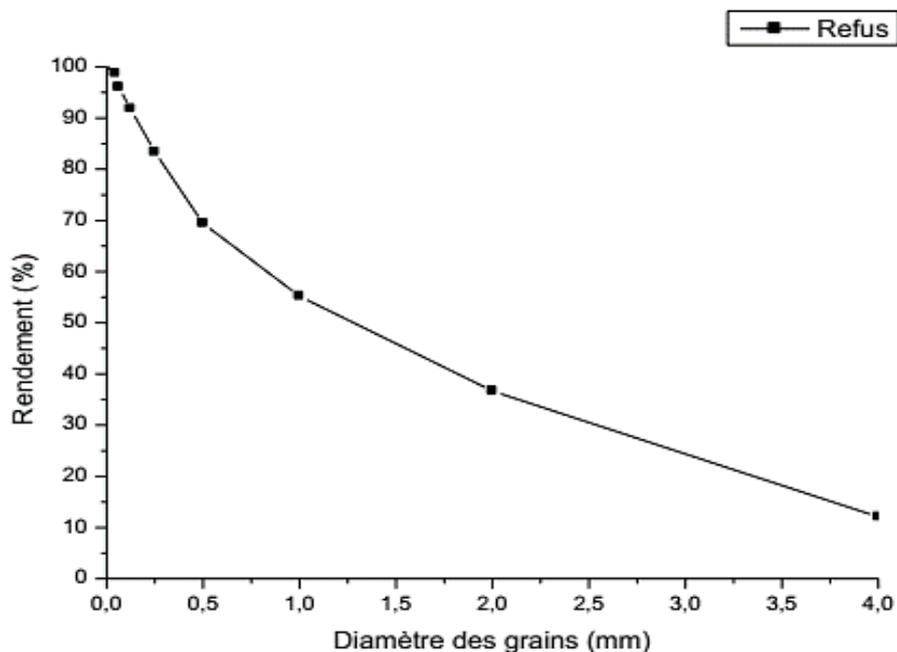


Figure 34. Courbe de distribution granulométrique d'un échantillon des stériles francs de Boukhadra

3.5.2. Analyse granulo-chimique des stériles francs

L'analyse chimique par fluorescence des rayons X (FRX) est fondée sur le principe de l'excitation d'un échantillon par les rayons X. La méthode est rapide, elle permet de d'identifier et de mesurer la composition chimique en éléments majeurs et en éléments de traces d'un échantillon en quelques minutes. Néanmoins, elle est destructrice, car il faut que l'échantillon soumis à l'analyse soit finement broyé (Livingstone Smith, A., et de Maret, P., 2001).

La figure suivante présente un exemple sur un analyseur de fluorescence des rayons X de type ARL QUANT'X.



Figure 35. Analyseur FX (Pete, P., 2010).

La détermination de la composition chimique des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra a été effectuée en utilisant un analyseur FX et cela au niveau du centre d'études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction (CETIM) – Boumerdès, les résultats de l'analyse sont détaillés dans le tableau 37.

Tableau 6 : Analyse granulo-chimique des stériles francs de la mine de Boukhadra

Fraction (mm)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	SO ₃ (%)	TiO ₂ (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	BaO (%)	PAF (%)
Initial	34,56	19,97	15,81	6,12	1,25	0,81	0,57	0,02	0,34	0,01	0,11	0,01	17,59
> 4	32,03	16,58	10,53	3,52	0,50	0,30	0,30	0,01	0,00	0,01	0,07	0,03	29,24
-4 + 2	37,58	21,01	12,80	3,75	0,95	0,43	0,51	0,10	0,01	0,01	0,03	0,01	19,56
- 2 + 1	35,63	19,87	11,75	3,26	0,39	0,54	0,00	0,03	0,18	0,07	0,06	0,00	23,35
- 1 + 0,5	36,95	26,55	16,07	5,08	0,46	0,84	0,00	0,10	0,24	0,10	0,08	0,02	11,29
- 0,5 + 0,25	25,13	27,67	14,36	4,62	0,49	0,91	0,00	0,02	0,26	0,11	0,09	0,00	19,76
- 0,25 + 0,125	27,49	27,41	21,21	5,14	0,59	1,21	0,84	0,05	0,36	0,01	0,09	0,01	13,48
- 0,125 + 0,063	21,31	16,94	20,94	6,51	0,62	1,09	0,86	0,01	0,42	0,01	0,10	0,00	26,82
- 0,063 + 0,045	16,48	17,25	19,17	5,93	0,50	1,03	0,00	0,02	0,33	0,11	0,10	0,00	34,13
< 0,045	11,07	10,63	20,77	6,26	0,61	0,91	1,06	0,04	0,31	0,01	0,11	0,01	39,98

À partir des résultats d'analyse granulo-chimique, il en découle les remarques suivantes :

- Il semble que les stériles francs de la mine de Boukhadra sont riches en CaO (> 34 %) surtout la classe granulométrique : - 4 + 0,5 mm.
- La teneur en fer dépasse 25 % dans les classes granulométriques -1 + 0,125 mm.
- La teneur en SiO₂ et Al₂O₃ évalué dans les classes granulométriques n'excédant pas 21,21 % SiO₂ et 6,26 % Al₂O₃.

En général, l'analyse granulo-chimique et l'observation microscopique ont pour objectif principale d'obtenir des informations relatives à la dureté ainsi que sur la maille de libération du minerai étudié. En ce que concernent les stériles francs de la mine de fer de Boukhadra, nous estimons que la maille de libération du minerai de fer par rapport au reste est située entre les classes granulométriques : -1 + 0,5 mm ; - 0,5 + 0,25 mm ; -0,25 + 0,125 mm. La figure 37 montre l'évolution des teneurs des principaux éléments chimiques qui constituent les stériles francs de la mine de Boukhadra en fonction de leur diamètre.

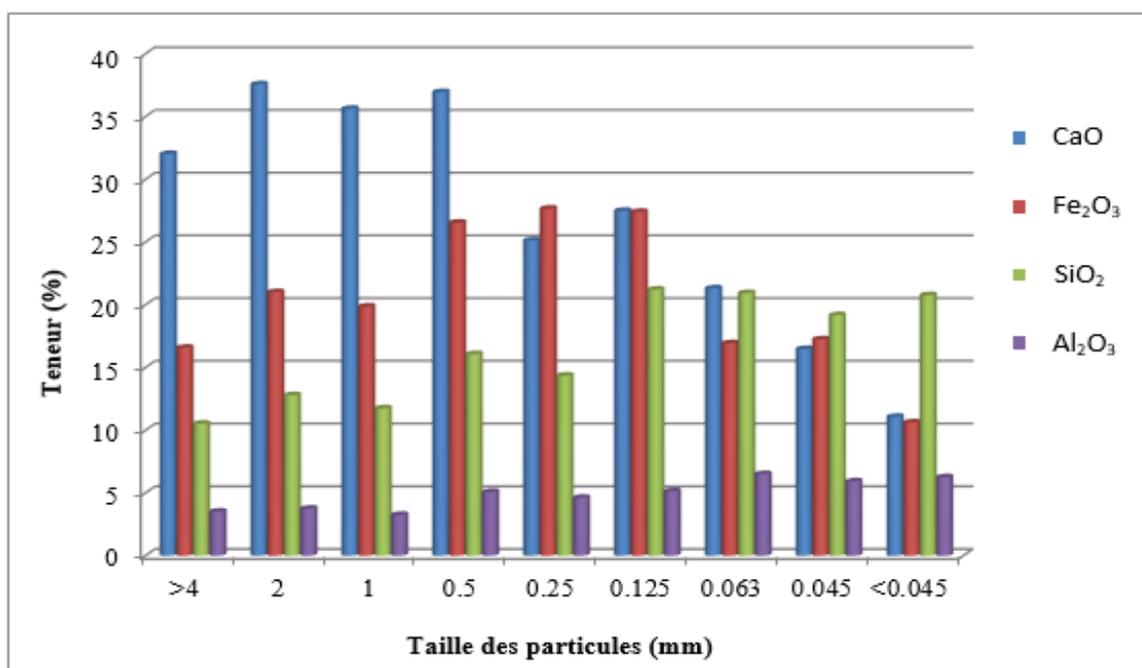


Figure 36. Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques qui constituent les stériles francs de la mine de Boukhadra en fonction de la granulométrie

L'examen en loupe binoculaire des classes granulométriques : -1+0,5 mm ; -0,5+0,25 mm et -0,25+0,125 mm des stériles francs de la mine de Boukhadra a donné les photos suivantes :



Figure 37. Vue à la loupe binoculaire de la classe -1 + 0,5 mm



Figure 38. Vue à la loupe binoculaire de la classe -0,5 + 0,25 mm



Figure 39. Vue à la loupe binoculaire de la classe -0,25 + 0,125 mm

3.5.3. Analyse par SAA des stériles francs de la mine de Boukhadra

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) c'est l'une des méthodes analytiques qui a pour but essentiel de déterminer la quantité des éléments chimiques (métaux) qui existe dans un matériau en mesurant le rayonnement absorbé par ce dernier (García, R., et Báez, A., 2012).

La figure 40 montre les principaux éléments constitutifs d'un spectromètre d'absorption atomique du laboratoire de type Shimadzu AA 6800 (Nait Merzoug A., 2014).

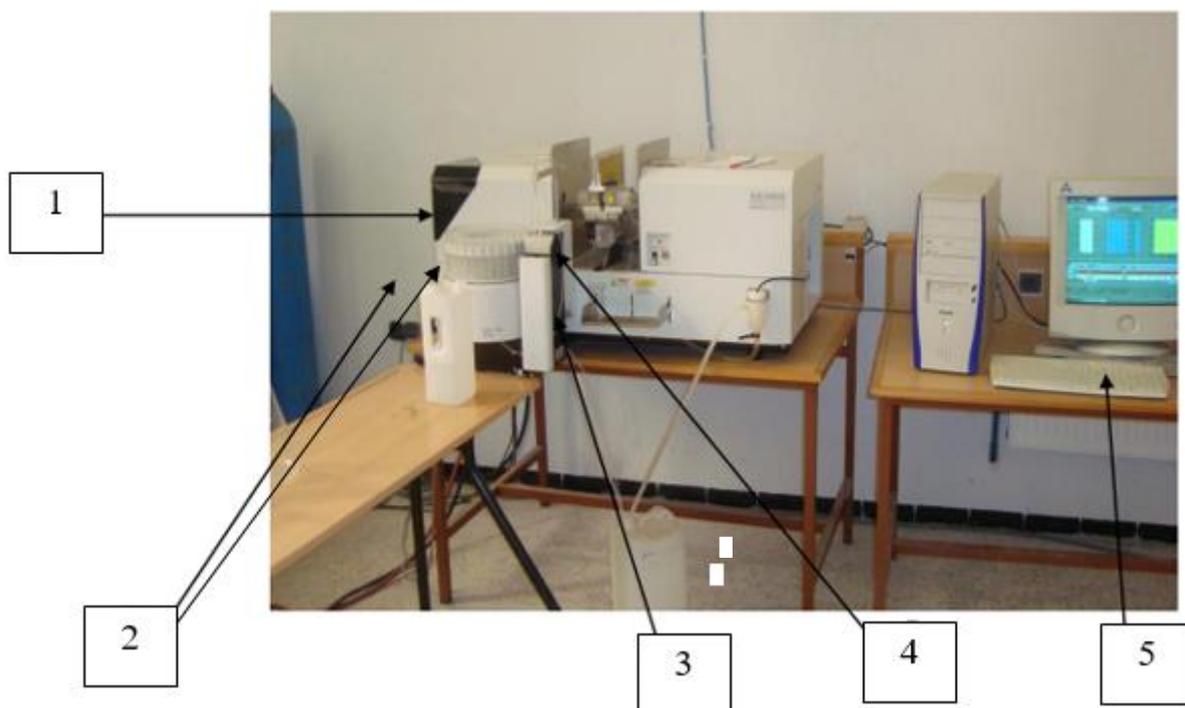


Figure 40. Spectromètre d'Absorption Atomique

- 1) Position de la lampe.
- 2) Passeur automatique d'échantillon pour le dosage au four graphite.
- 3) Position des échantillons pour le dosage à flamme.
- 4) Atomiseur (Flamme ou four graphite).
- 5) Un micro-ordinateur équipé d'un logiciel pilotant le SAA, traitement de données et enregistrement

Les résultats de l'analyse par SAA des stériles francs de la mine de Boukhadra effectué à l'ORGM - Boumerdès sont montrés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Analyse par Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA) des déchets miniers de la mine de Boukhadra

Elément (%)	Ni	Cu	Zn	Pb
Echantillon				
Stériles francs	0,010	<0,005	0,012	<0,005

- Généralement les résultats du tableau précédent montrent que les stériles francs de la mine de Boukhadra sont composés de faible proportion des métaux lourds à savoir ; le Nickel, le Cuivre, le Zinc et le plomb.

3.6. Caractérisation des stériles d'exploitation

La disposition des points de prélèvement des stériles d'exploitation de la mine de fer de Boukhadra est montrée dans la figure 41. Au cours de prélèvement, on a divisé le site d'échantillonnage en deux zones : zone 1 et zone 2.



Figure 41. Points de prélèvement des échantillons des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra

Les tableaux suivants présentent les coordonnées UTM des points de prélèvement des échantillons des stériles d'exploitation (zone 1 et 2) de la mine de fer de Boukhadra.

Tableau 8 : Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra (Zone 1)

Echantillon	X	Y	Z
i	413367,69	3956811,24	957
ii	413370,82	3956741,10	942
iii	413354,76	3956863,33	959
iv	413314,62	3956803,33	948
v	413421,38	3956819,27	964
vi	413473,06	3956784,39	956
vii	413489,09	3956762,67	949
viii	413420,36	3956763,34	950
ix	413433,81	3956716,71	938
x	413367,05	3956688,92	929
xi	413324,54	3956756,04	943
xii	413280,02	3956719,99	929
xiii	413259,47	3956783,79	938
xiv	413296,84	3956855,09	950
xv	413245,08	3956827,50	940
xvi	413267,49	3956901,25	950
xvii	413201,71	3956893,36	938
xviii	413352,97	3956890,86	959

Tableau 9 : Coordonnées UTM des points de prélèvement des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra (Zone 2)

Echantillon	X	Y	Z
a	413164,60	3956760,70	931
b	413211,42	3956691,10	923
c	413119,83	3956825,71	932
d	413217,86	3956761,95	937
e	413075,40	3956768,99	918
f	413190,59	3956797,91	933
g	413143,34	3956710,65	922
h	413158,72	3956828,09	935
i	413078,86	3956817,68	923
j	413228,31	3956725,28	930
k	413258,86	3956718,84	928
l	413227,62	3956634,32	911
m	413092,80	3956663,30	902
n	413037,14	3956743,08	909
o	412989,16	3956832,27	908
p	413046,58	3956886,50	923
q	413013,20	3956893,55	918
r	413169,60	3956851,64	936
s	413206,26	3956825,99	935
t	413242,65	3956772,76	937

3.6.1. Analyse chimique des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra

L'analyse chimique des stériles d'exploitation effectuée à CETIM - Boumerdès est donnée dans le tableau 10.

Tableau 10 : Analyse chimique par FX des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra

Elément (%) Echantillon	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	MnO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	PAF
Stériles d'exploitation	1,77	38,57	30,57	3,65	1,27	0,27	0,89	0,01	0,16	0,1	0,06	0,05	18,84

3.6.2. Analyse par SAA des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra

L'analyse par SAA des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra effectuée à l'ORGM-Boumerdès est montré dans le tableau suivant.

Tableau 11 : Analyse par SAA des stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra

Elément (%) Echantillon	Ni	Cu	Zn	Pb
Stériles d'exploitation	0,020	<0,005	0,006	0,010

- En fait, les résultats du tableau précédent montrent que les stériles d'exploitation de la mine de Boukhadra sont constitué de faible proportion des métaux lourds ; Nickel, Cuivre, Zinc et plomb.

3.7. Etude environnementale sur les déchets miniers de Boukhadra

L'étude environnementale représente une phase cruciale pour l'évaluation des impacts des déchets miniers, elle repose généralement sur la caractérisation du polluant (les déchets miniers) ainsi que l'analyse des eaux et des sols qui sont en contact avec ce dernier afin de déduire ses effets sur l'environnement. Pour se faire, des échantillons des eaux et des sols ont été prélevés de différentes zones du village minier de Boukhadra pendant la saison pluviale en vue de les analyser.

3.7.1. Analyse des eaux de drainage minier de Boukhadra

L'eau est un élément essentiel pour la vie de tous les êtres vivants où chacun d'eux surtout l'homme a besoin d'au moins 1,5 litre d'eau potable par jour à boire (Calmet D., 2014). D'après Kadouche, S., 2013, une eau dite potable, elle doit être dans la norme, claire, inodore, de saveur agréable, pauvre en germes microbiens que possible et en matières en suspension, elle ne doit pas aussi contenir des polluants métallifères et surtout les métaux lourds.

Trois (3) échantillons des eaux proviennent de ruissèlement des déchets miniers ont été prélevés de trois zones différentes près de la mine de Boukhadra durant le mois de janvier 2017, le tableau 12 montre les résultats de l'analyse chimique.

Tableau 12 : Analyse des eaux de drainage minier de Boukhadra

Paramètres	Unités	Norme	Echantillon d'eau			Moyenne	
			(1)	(2)	(3)		
Paramètres physico-chimiques	pH	Unité pH	$\geq 6,5$ et ≤ 9	7,05	6,75	7,25	7,01
	DBO ₅	mg/l O ₂	7	8,75	6,25	7,5	7,50
	DCO	mg/l O ₂	30	<u>45</u>	<u>31,5</u>	<u>36,1</u>	<u>37,53</u>
	MES	mg/l	25	27,1	25,4	24,5	25,66
	Sulfates	mg/l SO ₄	400	346	284	297	309
	Température	°C	25	25	25	25	25
	Ammonium	mg/l	4	1,35	2,0	2,32	1,89
Paramètres chimiques	Baryum	mg/l	1	1,62	1,4	0,9	1,3
	Fer dissous	mg/l	1	<u>4,5</u>	<u>7,31</u>	<u>9,6</u>	<u>7,13</u>
	Manganèse	mg/l	1	0,94	1,43	0,64	1,00
	Nitrates	mg/l NO ₃	50	32,2	41,6	26,5	33,43
	Phosphore	mg/l	10	4,54	9,62	10,78	8,31
	Cuivre	mg/l	2	0,53	0,32	0,05	0,30
	Plomb	µg/l	50	22,3	16,3	31,62	23,4
Zinc	mg/l	5	1,43	0,94	1,1	1,15	

Globalement, le tableau précédent présente des valeurs inacceptables par rapport aux normes. Toutefois, certaines concentrations en DCO dépassent le seuil admissible, on peut remarquer également que le rapport : $\frac{DCO}{DBO_5} = \frac{37,53}{7,5} = 5,004 > 3$, celui-ci indique qu'il y en a un taux élevé en matière organique dans les eaux étudiées, ce que fait que ces effluents ne sont pas dégradables (difficile à traiter).

Des concentrations élevées en fer dissous sont encore notées et cela due probablement au ruissèlement et lessivage des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra situé plus haut. Étant donné que la teneur élevée en métaux beaucoup plus dans le traitement biologique de l'eau, elle pose encore un danger direct sur la santé humaine.

En fait, la pollution de l'eau peut entraîner aussi une contamination du sol et cela peut affecter la nappe phréatique (détérioration de la qualité des eaux superficielles et souterraines), ce qui pose un danger direct sur les animaux (végétation polluée) et par conséquent sur la santé humaine (CNTPP, 2014).

3.7.2. Analyse des sols

Le sol représente la couche superficielle de l'écorce terrestre, il provient en général de l'érosion de la roche mère. En tant qu'une ressource vitales non renouvelable, il est soumis le plus souvent à de nombreux troubles anthropiques qui détériorent ses propriétés et peuvent générés des problèmes environnementaux graves (Pey, B., 2010).

A cet effet, des échantillons des sols ont été prélevés de trois sites du village de Boukhadra auprès de la mine, chaque échantillon est composé de cinq sous-échantillons prélevés à une profondeur de 0-5 cm afin d'obtenir un échantillon représentatif, le plus près possible au centre de contamination dans une zone pédologique homogène (Benselhoub et al., 2015). Les analyses chimiques des sols par FX et par SAA effectuées à l'ORGM - Boumerdès sont montrées dans les deux tableaux suivants.

Tableau 13 : Analyse chimique des sols du village de Boukhadra

Elément (%) Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ba	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Pb	S
ES1	31,83	7,62	5,7	23,99	1,13	0,07	0,72	0,64	0,09	0,35	0,01	0,11
ES2	36,63	9,42	17,38	10,4	1,0	0,79	1,29	0,42	0,6	0,16	0,01	0,22
ES3	40,66	11,08	11,57	8,92	0,67	0,74	1,56	0,68	0,41	0,13	0,04	0,21

Tableau 14 : Analyse par SAA des sols du village de Boukhadra

Norme	France (1985) Norme Afnor NF U44-041 (Dhaou-El-Djabine, K., 2005)	Cu	Pb	Zn
			100	100
Echantillon	(1)	<50	<u>100</u>	120
	(2)	<50	<u>120</u>	<50
	(3)	<u>100</u>	90	110

A partir des résultats précédents, on peut constater que le sol de la région minière de Boukhadra est pollué légèrement par des métaux lourds à l'instar du plomb (Pb) et le cuivre dans le troisième (3) échantillon, on peut remarquer également une forte concentration par le fer surtout dans les échantillons 2 et 3, ceci dû généralement à l'infiltration de l'eau contaminée de ruissèlement par le fer dans le sol de Boukhadra, le taux élevé des silices montre que les sols de Boukhadra sont pratiquement acides.

3.7.3. Impacts des déchets miniers de Boukhadra

Comme le cas de toutes les industries, l'exploitation de la mine de fer de Boukhadra produit les rejets miniers suivants (Commission européenne, 2009) :

3.7.3.1. Type des rejets miniers

a) Les rejets dans l'air

Ce sont les poussières, les odeurs ou le bruit. Il est à noter que les deux derniers mots ayants des effets moins dangereux, à l'exception de stockages des déchets toxiques, radioactifs ou métallique voisinages des habitants. Les poussières générées alors peuvent être constituées des matériaux divers à savoir ; silice, fer, plomb, soufre, etc.

b) Les rejets dans l'eau

Représentés souvent par les réactifs résultants de traitement du minerai et du laboratoire d'analyse à l'instar des acides et des bases (modification du pH), les métaux ou les composés métallifères solides et dissous (comme le fer, zinc, plomb), les sels dissous (NaCl), le chlorure (houillères), les matières en suspension, etc.

c) Les rejets dans le sol

Ces derniers peuvent être générés par la sédimentation des poussières ou bien par le lessivage dans le sol des liquides résultants des installations de traitement du minerai. Aussi,

la formation et l'élimination des tas temporaires d'accumulation des déchets miniers représentent une source de pollution massive pour les sols. La figure 42 montre les différentes méthodes d'exposition au polluant.

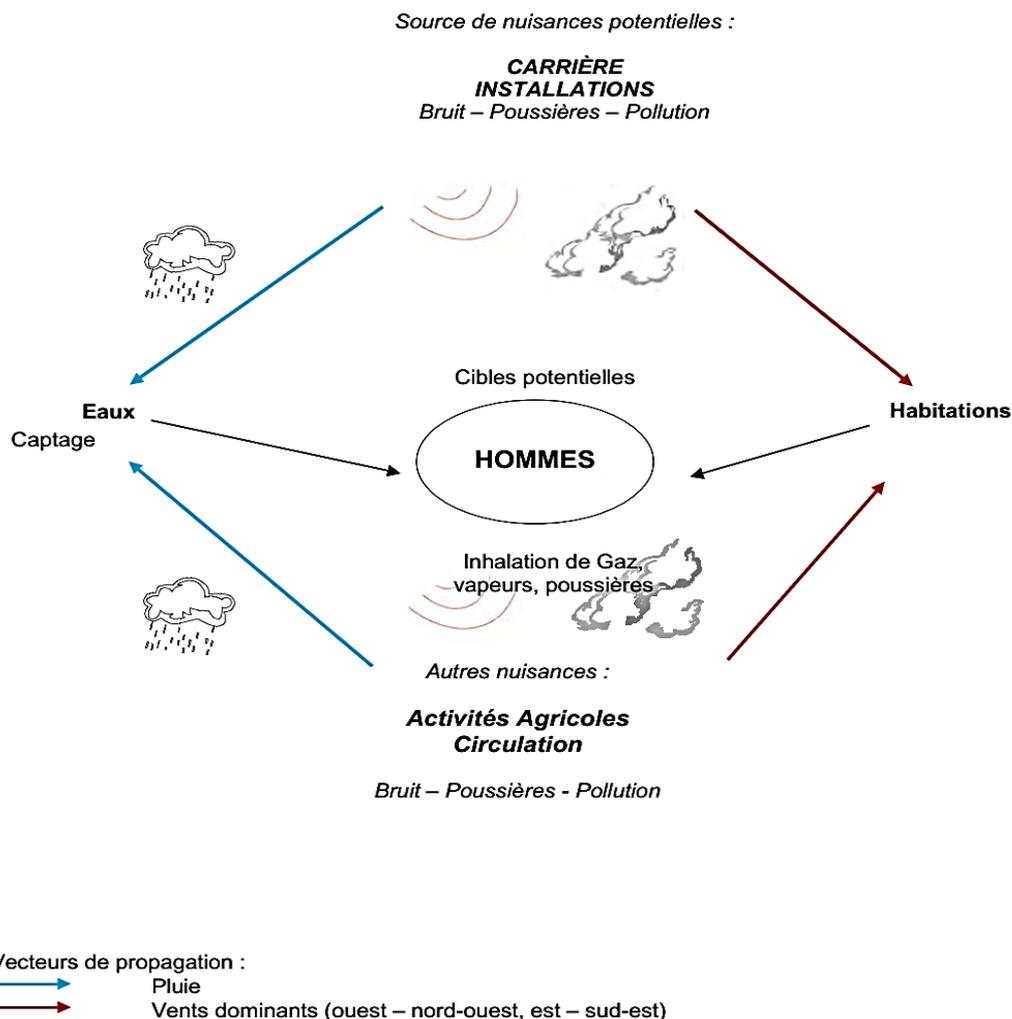


Figure 42. Schéma illustrative des différentes voies d'exposition aux polluants (Carrières ZAGO, 2013)

En général, la propagation des poussières dans l'atmosphère peut affecter les êtres vivants ainsi que les sols en bas. Les sols voisinage des installations de l'industrie minière peuvent également être infectés par le déplacement des sédiments souillés en métaux (fer, baryte, plomb), ces derniers empoisonnent les cultures qu'ils peuvent à son tour affecter l'alimentation du l'homme (Liu et al., 2005).

3.7.3.2. Classification des métaux

D'abord, les métaux lourds par leur présence, ils constituent des ressources économiques importantes, ils proviennent souvent de l'exploitation minière, de l'industrie, des

gaz d'échappement des engins, du sol, de l'alimentation et de l'eau (Abosedo, O. A., et State, O., 2017).

Néanmoins, les dépôts naturels ou anthropiques des déchets contenant des métaux lourds peuvent avoir des répercussions, ces métaux pénètrent dans les eaux souterraines, ils sont transportés le long des cours d'eau et finissent par s'entreposer dans l'aquifère, là où ils sont emportés par ruissellement dans les eaux superficielles, ce qui entraîne la contamination de l'eau et par conséquent la pollution du sol (Mahurpawar, M., 2015). La classification des métaux est détaillée dans la figure 43 (Järup, L., 2003).

Le tableau périodique de Mendeleïev est classé en quatre catégories principales au-dessus des colonnes :

- Light Metals** : Groupes 1 et 2.
- Heavy Metals** : Groupes 3 à 10.
- Nonmetals** : Groupes 14 à 17.
- Inert gases** : Groupe 18.

Le tableau est structuré par périodes (1 à 7) et groupes (1 à 18). Les éléments sont colorés par famille : métaux alcalins (bleu), métaux alcalino-terreux (bleu clair), métaux de transition (rouge), métaux lourds (rose), non-métaux (jaune), gaz nobles (orange), lanthanoides (vert clair) et actinoides (vert foncé).

Source : www.webelements.com

Figure 43. Tableau périodique de Mendeleïev

3.7.3.3. Définition des métaux lourds

Plusieurs définitions ont été employées pour les métaux lourds. Certaines entre eux sont basées sur la gravité spécifique, dans ce que va suivre on donne quelques-unes.

a) Définitions selon la densité

- Selon leurs densité, on peut diviser les métaux en deux classes (Bjerrum, 1936) : les métaux légers (densités < 4) et les métaux lourds (densités > 7). Un métal lourd peut être aussi un :

- Métal d'une densité de 3,5 - 5 (Falbe, 1996)

- Métal ayant une densité égale à 4 (Van Nostrand, 1964)

- Métal de densité > 4 (Grant R, Grant C., 1987)
- Métal d'une densité $> 4,5$ (Streit, 1994)
- Métal d'une densité élevée ou ≥ 5 (Merriam, 1976)
- Métal d'une densité > 6 (Davies B. E., 1987).

b) Définitions selon la masse atomique

Un métal lourd est un :

- Métal de masse atomique $>$ la masse atomique de sodium (Bennet, 1986)
- Élément métallique avec une masse atomique élevé par exemple ; le mercure, le chrome, le cadmium, l'arsenic et le plomb (EPA, 2000).
- Élément métallique d'une masse atomique > 40 .

Les métaux lourds de point de vue de la médecine sont habituellement mal définis et ils renferment tous les métaux toxiques (y compris les métaux légers), l'intoxication par les métaux lourds peut inclure des quantités excessives de fer, de manganèse, d'aluminium, de mercure ou de béryllium (le quatrième élément le plus léger), un semi-métal comme l'arsenic. Cette définition exclut le bismuth, le plus lourd des éléments à peu près stables, à cause de sa faible nocivité (Event, D. P., 2011).

3.7.3.4. Maladies dues à l'exposition à certains minéraux

Une longue exposition au cadmium entraîne le dysfonctionnement rénal. Le cadmium est biopersistant, une fois absorbé, il persiste durant des années. Une exposition élevée peut conduire à des maladies pulmonaires obstructives et au cancer du poumon, il peut encore provoquer des défauts osseux chez les hommes et les animaux.

Une faible exposition au chrome peut irriter la peau et provoquer des ulcères. Une exposition à long terme peut causer des dommages aux reins et au foie. Il peut aussi poser des dommages aux tissus circulatoires et nerveux.

La toxicité de l'aluminium est associée au développement de troubles osseux, y compris les fractures et l'ostéomalacie.

Le mercure provoque des dommages au cerveau et au système nerveux central tandis que l'exposition fœtale et postnatale cause des avortements, des malformations congénitales et des changements de développement chez les jeunes enfants.

L'exposition à des concentrations élevées d'arsenic peut provoquer la mort, il peut causer également des dommages aux reins et au foie et dans l'exposition la plus sévère l'hémolyse érythrocytaire.

Des concentrations élevées de cuivre peuvent provoquer une anémie, des dommages au foie et aux reins et une irritation de l'estomac et des intestins.

Des quantités excessives de nickel peuvent être légèrement toxiques. L'exposition à long terme peut entraîner une diminution du poids corporel, des dommages au cœur ainsi qu'au foie et une irritation de la peau.

Le manganèse entraîne une déplétion de la dopamine. Cela reproduit presque toute la symptomatologie de la maladie de Parkinson (Rajeswari, T. R. et sailaja. N., 2014).

L'exposition à long terme à des niveaux de plomb même relativement bas peut causer le saturnisme. L'exposition aiguë provoque des coliques et des encéphalites accompagnées parfois d'ataxie, de convulsions, de coma et même de décès (IBGE, 2002).

La silicose est une pneumoconiose provoquée par l'inhalation de poussières de silice cristalline. Elle se caractérise par une inflammation et des cicatrices sous forme de lésions nodulaires affectant les lobes supérieurs des poumons. Les signes de la silicose, en particulier dans la forme aiguë, sont : l'insuffisance respiratoire accompagnée de fièvre et de cyanose ou le bleuissement de la peau (Kortum, E., et Bozsoki, K., 2007).

Le fer est l'un des nutriments qu'on retrouve dans les aliments (lentille), c'est un élément indispensable pour l'homme ainsi que les autres organismes vivants, il entre dans la composition de l'hémoglobine du sang qui permet aux globules rouges l'adsorption et le transport de l'oxygène dans le corps humain. La Carence en fer entraîne l'anémie. Toutefois, le fer en excès est toxique, il provoque les Maladies hépatiques (Peyssonnaud, C., 2015 ; Aranguren, M. M. S., 2008), l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) conseille de ne pas dépasser le seuil 0,3 g/l vu que cet élément affecte le système digestif (O.P.S., 1987).

La baryte est un élément naturel qui se trouve dans la nature, seul ou combiné avec d'autres métaux à l'état solide ou soluble. L'ingestion accidentelle ou intentionnelle de la baryte provoque les effets suivants (Elluin, M., et Host, S., 2005) : la détresse respiratoire qui

nécessite une ventilation artificielle, hypertension et anomalies du rythme cardiaque, problèmes gastro-intestinaux tels que la diarrhée, le vomissement, les douleurs gastriques, les faiblesses musculaires et paralysies, problèmes rénaux comme le sang dans les urines, insuffisance rénale, etc. D'autres impacts à l'instar de la dégénérescence du foie et de la rate ont pu être constatés suite à l'autopsie d'une femme décédée de l'ingestion de sels de baryum.

3.8. Conclusion

Le présent chapitre décrit dans sa première section les différentes méthodes qui ont été utilisées pour la caractérisation des déchets miniers de Boukhadra.

Cette caractérisation nous a permis de déterminer la composition minéralogique des stériles francs de la mine suscitée qui renferme les catégories des roches suivantes : calcaire, minerai de fer et les marnes (jaunes et grises) ainsi que leur composition granulo-chimique en vue d'une valorisation.

La deuxième section de ce chapitre a été consacrée sur l'étude environnementale des déchets miniers de Boukhadra afin de comprendre leurs impacts.

Les résultats obtenus après l'analyse des échantillons des eaux et des sols de la région montrent qu'il y a une pollution par le minerai de fer et certains autres métaux.

Chapitre 4 : Tests de valorisation des déchets miniers de la mine de Boukhadra

Sommaire :

- 4.1. Introduction
 - 4.2. Séparation gravimétrique
 - 4.3. Séparation par flottation
 - 4.4. Séparation électrostatique
 - 4.5. Séparation magnétique
 - 4.6. Séparation optique
 - 4.7. Gestion et valorisation des déchets miniers
 - 4.8. Valorisation des déchets miniers de Boukhadra
 - 4.9. Domaines d'utilisations des produits triés
 - 4.10. Conclusion
-
-

4.1. Introduction

En vue de la valorisation des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra on a recours à des procédés de tri et de séparation minéralurgique. En général, la valorisation représente un palier indispensable dans l'industrie minière qui a pour objectif principale l'obtention d'un concentré à partir d'un minerai brute (Oshitani, J., 2013). D'après MDDEP, 2002, la valorisation renferme tous les procédés qui permettent la séparation, le réemploi, la réutilisation ou le recyclage des déchets miniers.

- Dans ce que va suivre, nous citons les procédés de traitement des minerais les plus couramment employés.

4.2. Séparation gravimétrique

La concentration gravimétrique est un procédé minéralurgique qui emploie la différence de la densité entre les matériaux afin de réaliser une séparation (Del Villar R., 2010).

La séparation gravimétrique de deux particules ayant des densités variables se réalise en fonction de leur mouvement en réponse à la force de pesanteur et les forces du milieu. Le diamètre et la forme sont deux paramètres qui influent sur l'efficacité de la séparation.

Afin que la séparation gravimétrique entre deux particules eu lieu, il faut satisfaire le 'Critère de concentration' représenté par l'expression suivante (Singh, R., Bhattacharyya, K., et Maulik, S., 1997) :

$$C = \frac{(d_H - d_F)}{(d_L - d_F)} > 2,5 \quad (1)$$

Avec :

d_H = densité du minerai lourd

d_F = densité du fluide

d_L = densité du minerai léger

4.2.1. Procédés de concentration gravimétrique

Sur l'aspect industriel, trois procédés de concentration gravimétrique peuvent être employés (Blazy, P., 1970) :

a) La nappe pelliculaire fluente

C'est une nappe d'eau de faible épaisseur qui s'écoule sur un plan incliné comme la table à secousse, la spirale, etc. Où les particules se séparent en plusieurs catégories densimétriques en fonction de leur vitesse de chute et leur résistance au mouvement.

b) L'accélération différentielle

Elle est réalisée au moyen d'un jig, là où les particules sont soumises à des oscillations imposées à un liquide. Le mouvement périodique (va et vient) entraîne par la suite une sédimentation différentielle entre les particules lourdes et légères.

c) Le milieu dense

Dans lequel les particules sont immergées dans un milieu dense. Les éléments légers flottent à la surface pendant que les éléments lourds se tombent en bas. Généralement, le milieu dense est constitué des particules fines lourdes et de l'eau, parmi les produits employés dans la préparation de milieu dense on trouve la magnétite et le ferrosilicium.

4.3. Séparation par flottation

C'est un procédé minéralurgique basé sur la différence des propriétés superficielles des particules dans une solution aqueuse ainsi que dans l'air (Blazy, P., et Jdid, E., 2000).

Les particules sont broyées, ensuite elles sont mis en suspension par agitation mécanique dans de l'eau, le mélange est conditionné par l'ajout d'un collecteur, afin d'obtenir une action sélective du collecteur on ajoute également les déprimants, les activants et les régulateurs du milieu. La pulpe conditionnée est versée dans des réacteurs munis d'agitateurs aérés (cellules de flottation) soit d'injecteurs d'air (colonne de flottation) ou bien d'électrodes (électroflottation). Les particules hydrophobes se fixent à la surface des bulles qui les transportent à la surface de la pulpe d'où elles sont récupérées (Blazy, P., et Jdid, E., 2000).

4.3.1. Réactifs de flottation

-Proulx, M., 2000, classe les réactifs de flottation les plus couramment employés comme suit :

a) Collecteur

Les collecteurs sont des composants chimiques aux molécules complexes qui rendent la surface minérale hydrophobe. Ils sont constitués, le plus souvent, de deux parties, la première partie assure l'adsorption des collecteurs à la surface de la particule par réaction

chimique ou bien par attraction électrostatique. La deuxième partie est une chaîne organique immergée dans l'eau en vue d'induire l'hydrophobicité à la particule.

b) Moussants

Ce sont des composants peu solubles dans l'eau, ils sont constitués d'une chaîne organique assez longue qui permet de réduire la tension de surface de l'eau. On ajoute les moussants pour créer les bulles d'air fines et assurer une forte stabilité de la mousse.

c) Activants et déprimants

Dans le cas où les collecteurs ne s'adhèrent pas à la surface minérale, la séparation est devenue irréalisable. Un activant permet alors de changer les caractéristiques chimiques des surfaces des particules en favorisant l'adsorption du collecteur. À l'inverse de l'activant, le déprimant entrave l'adsorption du collecteur avec la surface minérale afin de garder son propriété hydrophile.

d) Régulateurs du milieu

Ce sont des composants ajoutés afin de réagir sur les interactions minéral-collecteur. Le plus souvent, les régulateurs ajoutés s'attachent à la surface des particules en minimisant ou en favorisant la fixation des collecteurs, ils servent aussi à régler le pH du milieu, le potentiel redox, etc.

4.4. Séparation électrostatique

Ce procédé minéralurgique est basé sur la différence de conductivité électrique entre les minéraux. Suivant leur conductivité électrique, les particules suivent différents chemins dans un champ électrique, ce qui permet de les séparer (Commission Européenne, 2009).

Le séparateur électrostatique est constitué d'un cylindre chargé positivement mis à la terre, d'une électrode ionique et une électrode statique chargées négativement (figure 44).

Les particules d'alimentation tombent sur le cylindre et passent à travers un faisceau d'ions mobiles résultant de l'électrode ionique.

Les particules ayant une faible conductivité électrique acquièrent une forte charge de surface négative et restent adhérentes à la surface du cylindre.

Tandis que les particules conductrices n'acquièrent pas de charge et suivent une trajectoire normale jusqu'au champ d'attraction de l'électrode statique. Elles tombent après sous l'effet de leurs densités.

Les particules non-conductrices demeurent collées au cylindre. Une brosse qui est disposé à l'opposé des électrodes permet de les décoller en vue de les récupérer (Gosselin, A., Blackburn, D., et Bergeron, M., 1999).

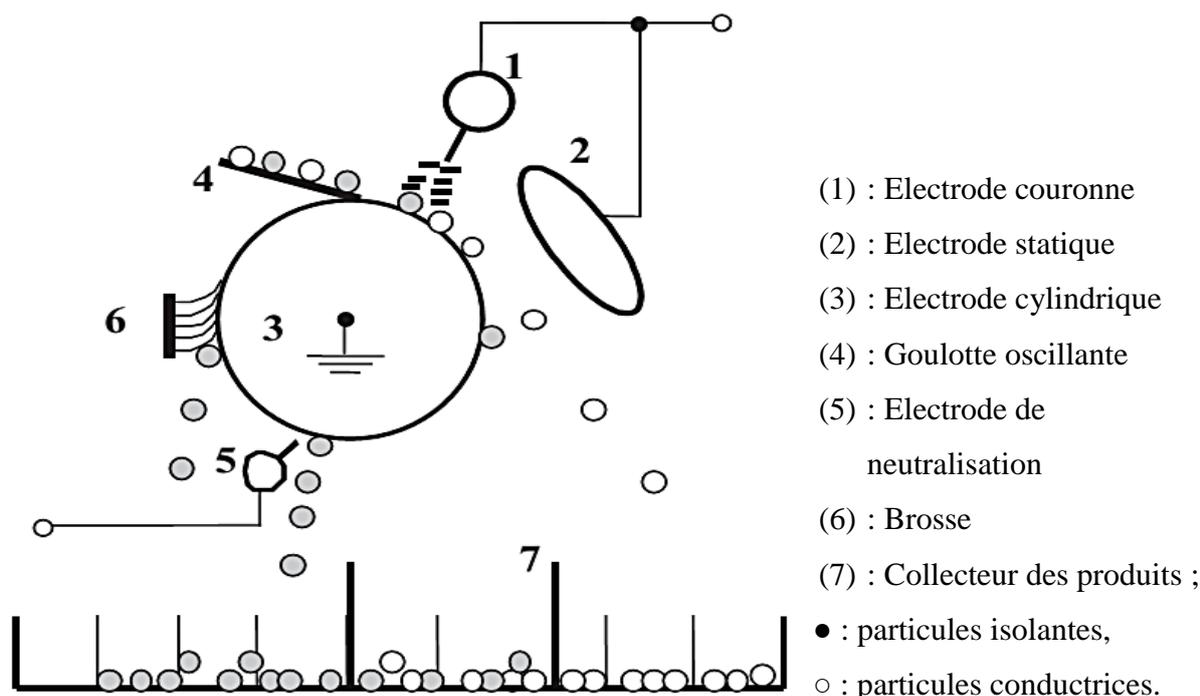


Figure 44. Schéma d'un séparateur électrostatique à tambour (Tilmatine, A., 2004)

4.5. Séparation magnétique

La séparation magnétique est un procédé minéralurgique qui utilise la différence dans la susceptibilité magnétique (la propriété physique) entre les minéraux pour les séparer, citons par exemple la séparation de la magnétite du quartz (Das, A., et Roy, S., 2007).

Selon Dworzanowski, M., 2010, en fonction de leur susceptibilités magnétiques trois grandes catégories des minéraux peuvent être distinguées ; minéraux ferromagnétiques (fortement magnétiques), minéraux paramagnétiques (faiblement magnétiques) et minéraux diamagnétiques (non magnétiques).

4.5.1. Magnétisme de la matière

Tous les atomes disposent d'un moment magnétique attaché à la précession de leurs électrons autour de leur noyau. Malgré cela, la plupart des matériaux sont non magnétiques.

Afin d'obtenir un matériau magnétique (possédant un moment et une susceptibilité magnétique), les atomes doivent contenir des sous-couches électroniques incomplètes.

D'ailleurs, l'environnement électronique des atomes peut être changé sous l'action d'un champ magnétique externe qui va diminuer ses susceptibilités magnétiques (Heyrendt, L., 2012).

D'après Alexis Mojica Abrego, M., 2007, le matériau soumis à un champ extérieur se distingue par trois types d'aimantations à savoir :

a) Le diamagnétisme

C'est une propriété du noyau de quelques atomes sans électrons libres. Le diamagnétisme est très faible avec une susceptibilité magnétique négative de l'ordre de 10^{-5} .

b) Le paramagnétisme

Les matières paramagnétiques sont distingués généralement par une répartition arbitraire des moments magnétiques de leurs atomes c'est la raison pour laquelle ils apparaissent non magnétique. Néanmoins, sous l'effet d'un champ externe les moments magnétiques s'alignent sur lui et le renforcent pour constituer une susceptibilité magnétique positive ($10^{-5} < \mu < 10^{-3}$). Le paramagnétisme est un phénomène fragile et réversible qui requière l'agitation thermique des molécules et enfin de la température.

c) Ferro et ferrimagnétisme

Le ferromagnétisme est un phénomène semblable au paramagnétisme cependant avec des grandes quantités de moments magnétiques dirigés dans la même direction dans ces domaines de Weiss. La susceptibilité magnétique de ces matières est élevée en comparaison avec celle des paramagnétiques. Selon leurs histoire, les substances dont les domaines magnétiques sont répartis en régions alignées seulement opposées les unes aux autres et dans lequel le moment magnétique global est différent de zéro lorsque $H = 0$, sont indiqués par le nom de ferrimagnétiques comme la magnétite.

4.5.2. Boucle d'hystérésis

Quand on impose un champ magnétique puissant sur un matériau ferromagnétique non magnétisé (point a), il devient aimanté (trajet a-b sur la figure).

Depuis le point b, l'aimantation du matériau ne peut plus accroître : c'est l'aimantation saturante. De point de vue physique cela correspond à la situation dans lequel les spins de tous les électrons sont alignés avec le champ d'excitation $H \rightarrow$.

Lorsque on diminue le champ d'excitation jusqu'à une excitation zéro (point c), une aimantation appelée rémanente demeure. Les matériaux peuvent de ce fait exposer une aimantation en le manque du champ d'excitation externe.

Afin d'enlever l'aimantation rémanente de matière au point c, il est obligatoire d'appliquer un champ suffisant, nommé champ coercitif de sens contraire à son aimantation (point d).

Lorsque le matériau est dur, le champ magnétique terrestre, plus faible que H_c (point g), la figure 45 montre la boucle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique.

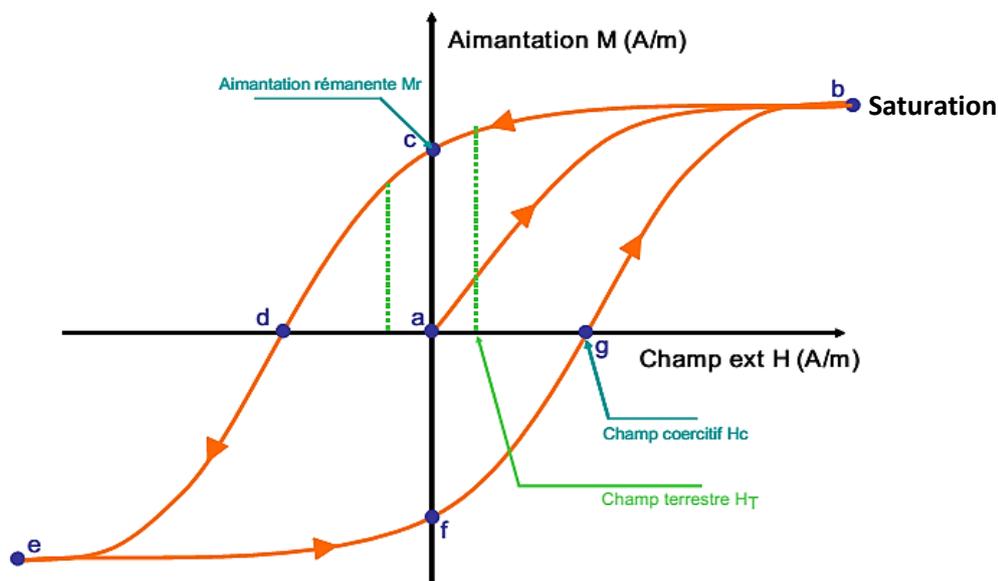


Figure 45. La boucle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique (Le Goff, A., 2006).

4.5.3. Paramètres déterminants l'efficacité d'une séparation magnétique

Plusieurs paramètres interviennent dans les résultats de la séparation magnétique à savoir ; l'intensité du champ magnétique, les propriétés physiques des particules, la granulométrie et les conditions de séparation (Brožek, M., 1999). Concernant les propriétés physiques, elles indiquent ses caractéristiques ferromagnétiques, paramagnétiques ou diamagnétiques. Alors que l'intensité du champ magnétique représente son aptitude à séparer les particules ; séparateur à haute ou bien à base intensité (Mehasni, R., 2007).

4.5.4. Méthodes de séparation magnétique (Metso., 2015)

a) Séparation Magnétique à Base Intensité (SMBI)

- Procédés secs.
- L'intensité du champ magnétique jusqu'à 300 mT.
- Tailles de particules jusqu'à 300 mm.
- Utilisation : la séparation des particules ferromagnétiques.

b) Séparation Magnétique à Intensité Moyenne (SMIM)

- Procédés secs ou humides.
- Sensibilité au champ magnétique jusqu'à 800 mT.
- Tailles de particules jusqu'à 300 mm.
- Utilisation : la séparation des particules ferromagnétiques.

c) Séparation Magnétique à Haute Gradient (SMHG)

- Méthodes cycliques et continues.
- Intensité du champ magnétique jusqu'à 2 T.
- Limitée au traitement des particules fines d'environ 1 mm.
- Utilisation : la séparation des particules paramagnétiques.

Il existe de nombreux types de séparateurs magnétiques à haute intensité (SMHI) illustrés dans la figure 46 certains entre eux ont été discutés par Svoboda (1987).

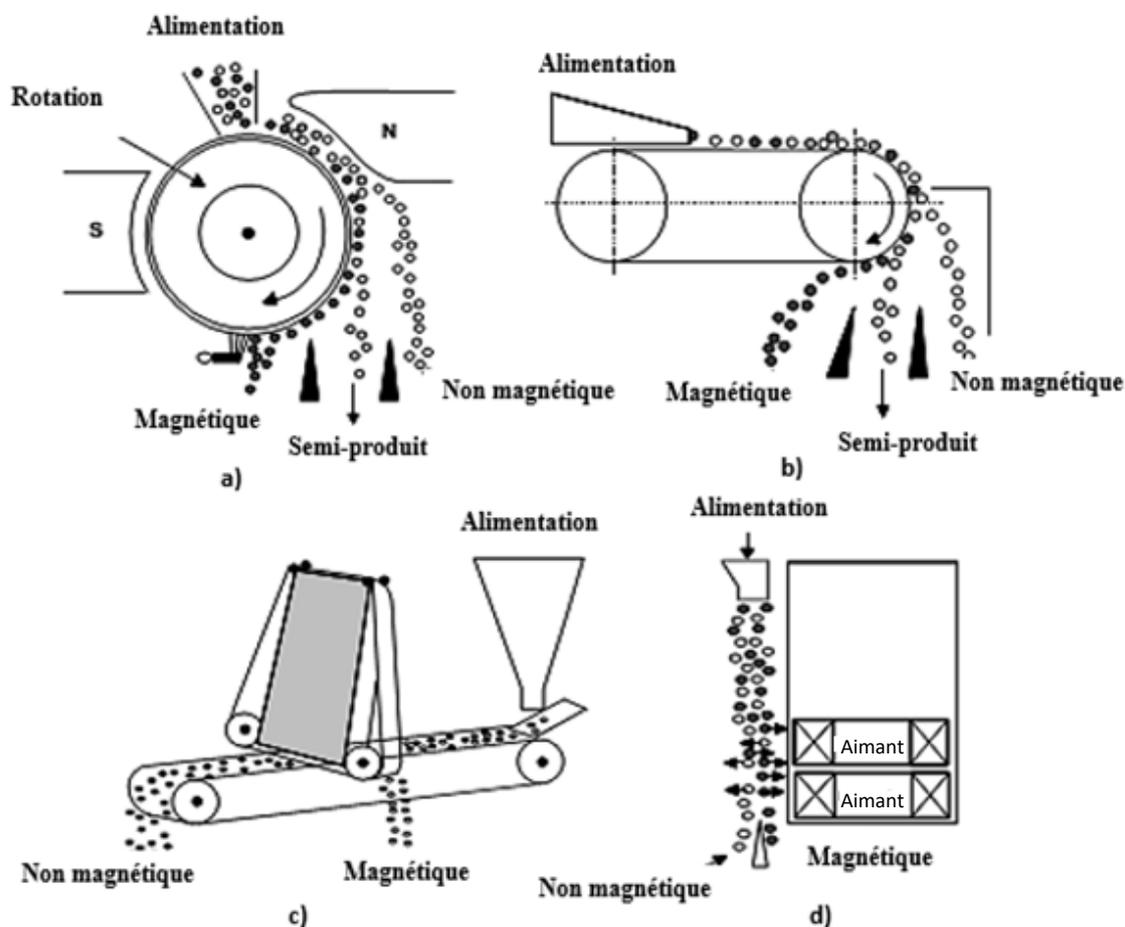


Figure 46. Principe de fonctionnement des séparateurs magnétiques à haute intensité
(Drzymala, J., 2007)

- a) RMI (Rouleau Magnétique Induit),
- b) Croix-croisée,
- c) Rouleau de Perm,
- d) SMGO ou Séparateur supraconducteur à gradient ouvert.

4.6. Séparation optique

Le tri optique est un procédé de valorisation où les matériaux sont ségrégés selon la discrimination dans la réflexion, la transparence ou la couleur, il s'effectue généralement en utilisant des photo-détecteurs ou des caméras (Bamber, A., 2008).

La figure 47 présente les différents compartiments d'un séparateur optique.

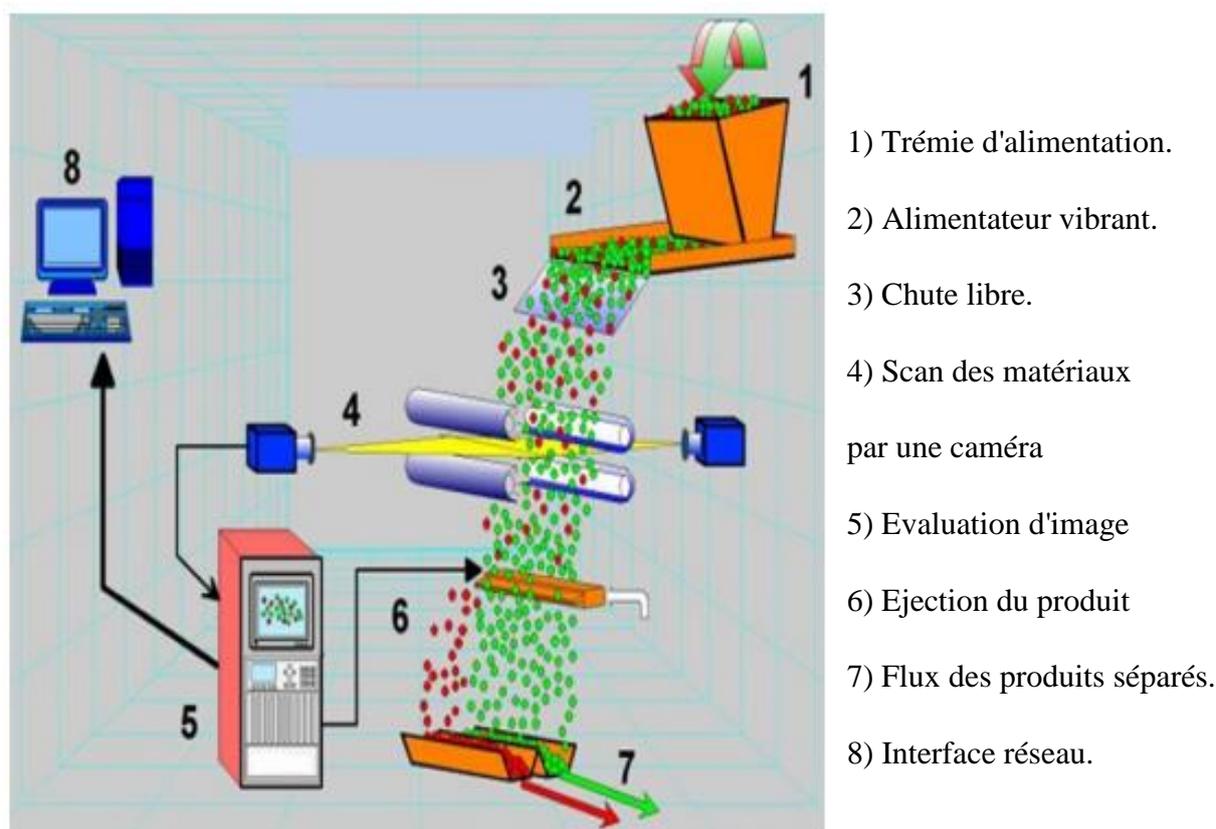


Figure 47. Principe de fonctionnement d'un trieur optique (Von Ketelhodt, F., et Vollmar, L., 2013).

4.6.1. Principe de tri optique

Le séparateur optique est basé sur le principe d'identification des matériaux soumis à une source de lumière suivant les rayonnements réfléchis ou la couleur (Ligus, G., 2012). D'après Suhasaria, A., et Pathak, K., 2012, un trieur optique peut renfermer ces éléments :

a) Préparation d'alimentation

Le matériau d'alimentation concassé est transporté au point où les données optiques sont collectées pour optimiser l'efficacité du tri, cela se fait en émettant un flux lumineux sur un alimentateur vibrant à une vitesse lente.

b) Collecte de données optiques

Le minerai doit passer à travers un système de capteurs de données optique (caméra) comme une seule couche de roches dispersées. La lumière réfléchie de chaque fragment est détectée et traitée. Généralement, la lumière réfléchie est perçue sur un écran sous la forme de

pixels et chaque pixel ayant une valeur définie ; Rouge, Vert, Blue (RVB), ces valeurs peuvent être utilisées pour discriminer entre les matériaux.

c) Traitement des données optiques

Le traitement des données optiques se fait par un processeur électronique (micro-ordinateur), le minerai est détecté au moment du traitement des données optiques et des signaux appropriés sont transmis au système mécanique pour effectuer le tri.

d) Système de séparation mécanique

Selon les instructions données par le processeur, le système de séparation mécanique se compose d'une valve mécanique. Une boîte de collecte recueille le matériau et le guide sur la bande transporteuse appropriée.

4.6.2. Généralités sur le système de collecte des données optiques

Le tri du minerai implique la séparation des particules voulus et le rejet des particules qui ne garantissent pas un traitement ultérieur (Wills, B., 1992). Deux types de sources lumineuses sont couramment employés : sources de spectre continu (bulbes de tungstène) et sources de spectre discontinu (tubes fluorescents et lasers).

Les détecteurs employés pour le tri optique sous la lumière visible sont couramment des photodiodes, des photomultiplicateurs (employés avec des lasers) et des appareils à couple chargé (CCD).

Le tri optique emploi des photodiodes et des détecteurs photomultiplicateurs est dite le tri photométrique tandis que l'emploi d'un détecteur CCD (Caméra digitale) est souvent nommé triage par couleur.

Deux méthodes essentielles d'analyse des couleurs emploie un masque de filtre Bayer et des CCD séparés sont utilisées pour le détecteur CCD. Le masque de filtre Bayer attribue rouge, vert et bleu à chaque pixel. Ce modèle de filtre contient deux pixels verts diagonalement opposés, un pixel rouge et un pixel bleu. La deuxième méthode d'analyse emploi un prisme diviseur RVB afin de décomposer la lumière en composants rouges, verts et bleus (Fitzpatrick, R., 2008).

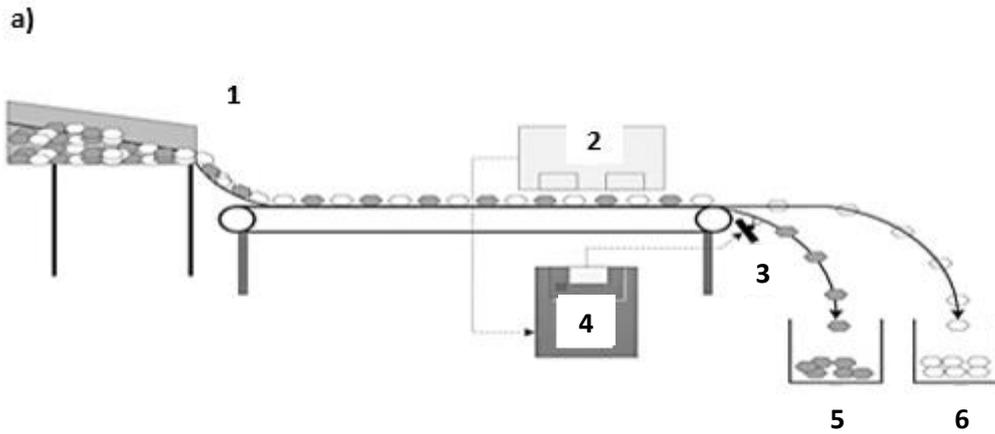
- Le tableau 15 classe les différents trieurs des minerais selon le type de radiation (Murphy, B., Zyl, J., et Domingo, G., 2012).

Tableau 15 : Technologie de tri des minerais

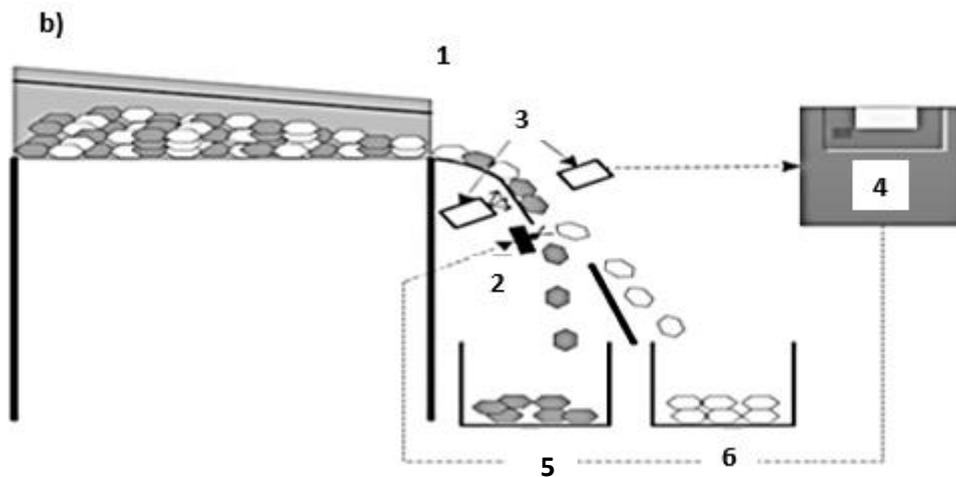
Type de rayon	Longueur d'onde électromagnétique (m)	Type de capteur	Propriété du matériau détectée
Rayonnement gamma	10^{-12}	RM (radiométrique)	Rayonnement gamma naturel
	10^{-11}		
Rayon X	10^{-10}	Transmission par rayons X (TRX)	Densité atomique
	10^{-9}	Fluorescence des rayons X (FRX)	Fluorescence visible sous rayons X
Ultraviolet (UV)	10^{-7}	COL (caméra couleur CCD) Photométrie (PM)	Réflexion, luminosité, transparence, forme
Lumière visible (VIS)	10^{-6}		
Proche infrarouge (PIR)	10^{-5}	Spectrométrie proche infrarouge (PIR)	Réflexion / absorption monochromatique
	10^{-4}		
Infrarouge (IR)	10^{-3}	Caméra infrarouge (IR)	Conductivité thermique, dissipation thermique
Micro-ondes	10^{-2}		
		10^{-1}	MO-IR (chauffage avec IR)
Ondes radio	10^1		
	10^2		
Courant alternatif (CA)	10^3	Capteur électromagnétique (EM)	Conductivité
	10^4		

4.6.3. Types des trieurs optiques

- Suivant McCarthy, B., 2014, deux types des séparateurs optiques peuvent être distingués ; trieur par convoyeur et trieur par chute (figure 48).



- 1) Conditionnement
- 2) Emetteur-détecteur
- 3) Séparation
- 4) Traitement des données
- 5) Flux de produit
- 6) Flux de rejet



- 1) Conditionnement
- 2) Séparation
- 3) Emetteur-détecteur
- 4) Traitement des données
- 5) Flux de produit
- 6) Flux de rejet

Figure 48. Types des séparateurs optiques

- a) Trieur par convoyeur
- b) Trieur par chute

- Le tableau 16 récapitule les procédés minéralurgiques et les machines habituellement utilisés pour le traitement des minerais (Dnipropetrovsk. UNM, 2013).

Tableau 16 : Classification des procédés et des machines de traitement

Procédé	Propriété	Milieu	Machine utilisée
Criblage	Dimensions des particules	Air, eau	Crible
Concassage	Ecrasement, choc, flexion	Air	Concasseur
Broyage	Ecrasement, trituration	Eau, air	Broyeur
Classification	Poids et dimension des particules	Eau, air	Classificateur hydraulique et pneumatique (cyclone)
Lavage (débouillage)	Capacité d'argiles de se détruire dans l'eau	Eau	Débouilleur
Séparation gravimétrique A) Milieu dense B) Setzage C) Nappe pelliculaire fluante	Densité Densité Densité Densité et dimensions	Eau, air Liquide dense Eau Eau	Séparateur gravimétrique Milieu dense Setzage, bac à piston Tables à secousses, à balais, écluses, spirales
Flottation	Mouillabilité	Eau	Cellule de flottation
Séparation magnétique	Susceptibilité magnétique	Eau, air	Séparateur magnétique
Séparation électrostatique	Conductibilité électrique	Air	Séparateur électrostatique
Triage	Radioactivité, absorption des rayons, couleur, éclat	Air	Séparateur électronique (radiométrique, optique)

4.7. Gestion et valorisation des déchets miniers

4.7.1. Généralités

Dans chaque palier des activités minières, des mesures de management des déchets produits doivent être effectuées, ces mesures sont en fonction de méthode de l'exploitation minière ainsi que les facteurs suivants ; le contexte géographique, géologique, hydrogéologique et enfin climatologique (BRGM, 2001).

Selon Mehernosh T., 1996, il est possible de séparer la substance de valeur des déchets minier en se basant sur la différence des propriétés physiques suivantes ; la conductivité, la susceptibilité magnétique, la densité, les caractéristiques optiques ainsi que radiométriques.

Plusieurs technologies ont été employées dans le cadre de la valorisation des déchets miniers à savoir (Lottermoser, B., 2007) ; la séparation gravimétrique, la séparation magnétique ainsi que la flottation, ces procédés ont été utilisés pour récupérer les métaux et les minéraux à partir de déchets miniers.

Néanmoins, la différence dans les caractéristiques minéralogiques, chimiques et physiques de certains déchets miniers oblige l'emploi de la pyrométallurgie (fusion, grillage) et l'hydrométallurgie (lixiviation, précipitation, extraction électrolytique, extraction par solvant, cémentation), etc.

Des nouvelles méthodes comme la biolixiviation et la phytoextraction ont prouvé leurs efficacités dans la récupération des ressources minérales utiles et dans la minimisation des effets environnementaux des déchets miniers.

D'après Charbonneau, P., 2014, les mesures usuels de management des rejets miniers sont : la restauration graduelle des sites miniers, la revégétation, les remblais miniers souterrains ; Ils constituent un pilier secondaire afin de consolider la stabilité interne de la mine (les remblais miniers cimentés en pate, des remblais miniers hydrauliques, les remblais miniers rocheux), les dépôts en pate de surface, les amendements alcalins cimentaires, le remblayage des fosses, l'utilisation des rejets miniers comme matériaux de construction.

- Le tableau 17 montre des exemples sur les modes de réutilisation et de recyclage des déchets miniers (Lottermoser, B., 2011).

Tableau 17 : Exemples des voies de réutilisation et de recyclage des déchets miniers

Types de déchets		Exemples d'option de réutilisation et de recyclage
Déchets miniers	Stériles francs	<ul style="list-style-type: none"> • Ressources des minéraux et des métaux, matières premières pour le ciment et le béton. • Agrégat dans le remblai, la chaussée, la fondation et la construction des bâtiments
	Eaux des mines	<ul style="list-style-type: none"> • Récupération des métaux des eaux de DMA • Génération d'électricité à l'aide de la technologie de cellule à combustible
	Boues de drainage des mines	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction d'oxydes ferriques hydratés des pigments de peinture • Extraction de Mn pour la poterie
Résidus de traitement	Stériles	<ul style="list-style-type: none"> • Retraitement pour extraire des minéraux et des métaux • Résidus riches en Fe mélangés avec des cendres volantes et des boues d'épuration comme les céramiques légères
Déchets Métallurgiques	Boue rouge de bauxite	<ul style="list-style-type: none"> • Matières premières pour le verre, les carreaux, les ciments, la céramique, les agrégats et les briques • Traitement des eaux de DMA
	Laitier et scories de fusion de métal de base	<ul style="list-style-type: none"> • Production de béton et de ciment • Extraction de métaux (Cu, Pb, Zn, Ag, Au)
	Phosphogypse	<ul style="list-style-type: none"> • Modification du sol • Matériaux de bâtiment et de construction

4.7.2. Revues de littérature sur la gestion et la valorisation des déchets miniers

- Maizières-Lès-Metz (1967) a conduit des recherches sur la flottation pour enrichir les minerais de fer. Il a pu remarquer que les résultats optimaux étaient produits suite à la flottation directe. Avec un collecteur du type acide gras, il était essentiel de trouver un agent émulsifiant adéquat. Le mélange de différents réactifs collecteurs, entre eux a été employé également le fuel a donné des résultats acceptables. Dès septembre 1963, Maizières a effectué, en même temps avec des expériences en laboratoire, des tests sur une installation pilot de flottation. Auprès des problèmes de broyage, classification granulométrique ainsi que l'élimination des ultrafins, il a pu évaluer la performance de différents mélanges collecteurs en circuit continu. Les résultats des tests ont fourni des symptômes pour l'optimisation du broyage, l'élimination des boues fines et les recyclages en compagnie des coûts de revient des réactifs. Entre eux celles liées à la réduction de la teneur en phosphore dans le concentré produit à partir du minerai de Moncorvo et celles proportionnelles à l'identification des réactifs résiduels dans les eaux usées de la flottation.

- Broussaud, A. et Faby, J. (1978) ont conduit des tests d'enrichissement par séparation magnétique à haute intensité de stérile de flottation de Chaillac. Suite à la requête de la société « barytine de Challac », le département minéralurgie du BRGM a conduit et fait fonctionner du 16 janvier au 10 février 1970 une installation pilote de valorisation, en continu, par séparation magnétique à haute intensité du stériles de flottation de la laverie de Challac (Inde) sur les lieux même de production. Le projet a permis de tirer les informations essentielles à toute décision d'investissement à savoir ;

- Utilité d'obtenir du constructeur une garantie en matière de colmatage du séparateur haute intensité par la magnétite existe dans le minerai ;
- Concentré productible ayant une teneur moyenne lié à la la teneur du rejet de flottation = 57 – 58 % pour une teneur d'entrée de 42 % Fe (sous forme d'hydroxyde) ;
- Récupération possible de l'ordre de 0,6 à 0,7 ;
- Lien éventuel entre le rendement et la capacité de la machine.

- Corrans, I., et Svoboda, J. (1985) ont évalué la possibilité d'emploi de la séparation magnétique à haute et moyenne intensité pour la récupération des minéraux d'or, d'uranium et de phosphate. L'usage de séparateurs magnétiques dans les différentes installations d'enrichissement de minéraux en Afrique du Sud est discuté en utilisant le milieu dense. La

fabrication des différents types de machines de séparation magnétique par trois fournisseurs locaux est à l'honneur. L'place potentielle de la séparation magnétique à haute intensité et/ou forte intensité dans la récupération des minéraux d'or, d'uranium et de phosphate est discutée.

- Aubertin, M., et al. (2005) ont étudié le comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles, ces déchets miniers comportant des minéraux réactifs (comme les sulfures de fer), ils peuvent représenter un milieu très favorable à la dilution des éléments mobiles, notamment quand il y a une génération de drainage minier acide (DMA), ou bien d'une eau de drainage neutre contaminée (DNC) par des métaux solubles. Un des aspects critiques qui affecte la génération de DMA et de DNC est la circulation et le mouvement de l'eau dans les roches stériles. Ce projet discute les différents moyens disponibles afin d'apprécier le comportement hydrogéologique des haldes, en liaison direct avec la variation des conditions géochimiques qui y prédominent, il montre aussi quelques techniques de caractérisation des stériles en laboratoire et in situ, avec les caractéristiques remarquées et mesurées. Il expose après des outils de modélisation et certains résultats de calcul qui indiquent la complexité des phénomènes hydrogéologiques et géochimiques impliqués.

- Bhatti, M., et al., (2007) ont conduit des études de séparation magnétique à haute intensité sur le minerai à faible teneur en chrome (Pakistan), ces études ont été débutai pour enrichir un minerai de chrome de faible teneur provient de Muslim Bagh, Balochistan - Pakistan, par séparation magnétique haute intensité en voie sèche (SMHIS). Plusieurs facteurs de séparation magnétique à savoir ; l'intensité du champ magnétique, la granulométrie de produit de l'alimentation et le nombre d'opérations ont été améliorés afin d'obtenir une teneur maximale en chrome et une degré d'extraction optimale du chrome. Le minerai comportant 28 % de Cr_2O_3 a été transformé en un concentré d'un teneur de 40 % de Cr_2O_3 avec un degré d'extraction de 90 %.

- Ajaka, E., (2009) a examiné la récupération des minéraux de fer fins des résidus de production du minerai de fer d'Itakpe, ce projet a analysé les essais de récupération existants en utilisant un procédé simple de décantation et de flottation. Les qualités de récupération et de concentré dans une usine de traitement de minéraux sont conduites par des nombreux paramètres, entre eux la plage de granulométrie des minéraux libérés, le pourcentage de fines naturelles dans le minerai et les contraintes exigées par les utilisateurs ultimes du concentré. L'usine d'enrichissement du minerai de fer d'Itakpe au Nigéria généré aujourd'hui une queue renfermant quelquefois jusqu'à 22 % de minerai de fer, surtout des fines naturelles dans le

minerai et des fines inévitablement générés pendant le broyage. Ce projet analysait le circuit existant et procédait à des essais de récupération spécifiques du matériau de valorisation des résidus en employant un simple processus de décantation et de flottation afin de récupérer les minéraux de fer fins existants dans les résidus. Les résultats ont affirmé que des concentrés de grades variant de 41 à 62 % peuvent être aboutis avec les processus sélectionnés. Le mélange et la dilution des concentrés obtenus dans les processus de récupération avec un concentré lavé à nouveau de l'usine existante fabriquaient également un concentré de teneur dépassant 70 %.

- Samson, W., (2009), a étudié la possibilité de la dépollution et la valorisation des rejets miniers sulfurés du Katanga, ce travail expose les résultats d'une étude menée sur la dépollution des tailings de Kipushi (République Démocratique de Congo) par la récupération des métaux contenus. Ce sont les anciens rejets d'un concentrateur. Ils renferment de la pyrite et des sulfures résiduels de cuivre et de zinc. En raison du stockage à l'air libre pendant plus de 40 ans, ces sulfures sont relativement oxydés. Pour diminuer les effets environnementaux majeurs de ces tailings, l'auteur a conduit des recherches pour le traitement qui combinerait d'une part la dépollution par la minimisation des éléments de traces métalliques et du soufre et d'autre part la valorisation du cuivre et du zinc. Les deux voies qui ont été examinées débutent par une flottation globale de tous les sulfures (désulfuration environnementale). Les résultats présentent la possibilité de produire un nouveau rejet de flottation dont une grande partie des éléments de traces métalliques facilement mobilisables dans l'environnement est éliminée ainsi que environ tout le soufre (95 %), ce qui éloigne en conséquence tout risque de DMA. Il a prouvé que pour aboutir ces résultats, il suffit de ne broyer que la fraction la moins libérée de dimension supérieure à 75 μm et d'activer via un prétraitement à pH 6 les sulfures dont la collection par xanthate est inhibée par l'altération superficielle avec formation d'oxydes ou bien par les complexes cyano-métalliques formés pendant la flottation avec dépression de la pyrite par les ions cyanures ayant généré les tailings étudiés. Il a essayé d'enrichir le concentré total de la désulfuration environnementale par une flottation différentielle avec dépression de la pyrite à pH 11. Ce procédé est délicat à réaliser en raison de la finesse des grains et des caractéristiques minéralogiques du concentré total qui englobe beaucoup de grains mixtes. Les tests ont subséquemment porté sur la lixiviation chimique acide oxydante (avec Fe^{3+}) et la lixiviation bactérienne du concentré global ultérieurement son enrichissement en cuivre et en zinc dans un circuit de flottation avec deux finissages.

- Von Ketelhodt, L., (2009) a analysé la viabilité du tri optique des décharges des stériles francs de l'or. Ce projet décrit les essais menés pendant la période allant d'Octobre 2003 à Juin 2004, une usine pilote de tri-opérateur en conteneur a été installée à la mine de Kloof Gold sur une décharge de stériles francs. Entre Octobre 2003 et Juin 2004, une usine pilote de tri optique en conteneurs a été installée à la mine d'or Kloof dans une décharge de stériles. Ce travail discute les expériences et ses résultats conduisant à la décision d'exploiter cette usine pilote. Cette approche montre les données opérationnelles et les chiffres financiers obtenus pendant ce projet, surtout pour le mois de Juin 2004, quand l'usine fonctionnait à pleine capacité sur trois quarts de fonctionnement, marchant 24h/24. Ces résultats sont également extrapolés et présentés pour montrer la rentabilité d'une telle opération au niveau des prix de l'or et de la structure de coûts contemporains.

- Abdalla, M., (2010) a proposé la séparation magnétique à haute intensité en voie sèche afin de concentrer le minerai de fer faiblement magnétique. A cet effet des échantillons des minerais de fer ont été prélevés des gisements d'El Bajrawiya. Les analyses chimiques et les examens microscopiques ont prouvé qu'ils sont composés des mélanges précieux d'oxydes de fer faiblement magnétiques ; (goethite, limonite et hématite), la gangue non magnétique ; (silice) ainsi que les minéraux argileux à l'instar des impuretés majeures. Ces matériaux ont été préparés pour être traités par séparation magnétique à haute intensité en voie sèche, par broyage pour libérer les grains d'oxyde de fer du ciment du minerai. Les procédés de concassage et de broyage ont produit des quantités énormes de matériaux fins ($-53 \mu\text{m}$), qui n'ont pas pu être valorisés par la machine disponible au sein des laboratoires. Egalement, tous les échantillons de sol ont été lavés pour éliminer les fines par tamisage humide sur un tamis de 53 microns. Les fractions de chaque échantillon plus grosses que $53 \mu\text{m}$ ont été séchées et tamisées sur un tamis pour donner quatre portions de taille ayant chacune des plages plus proches en vue de la séparation magnétique afin d'éviter l'effet de gravité sur le processus. Le modèle de séparateur de laboratoire à barrière magnétique a été employé pour expériences de séparation sur chaque fraction de taille des différents minerais lavés. La récupération des de fer de valeurs et l'efficacité de la séparation ont été appréciées en trouvant les pourcentages de Fe dans les concentrés et les résidus par des techniques de spectrométrie d'absorption atomique (SAA). Le procédé de séparation a été employé à quatre mélanges d'oxydes de fer. Ils avaient des notes moyennes de 32,94 % ; 41,43 % ; 17,00 % et 48,00 % de Fe. Le processus de valorisation a donné des concentrés ayant des teneurs moyennes dans les aliments 39,79 % ; 49,82 % ; 47,67 % et 52,76 % de Fe et les récupérations moyennes de fer étaient de 86,83 % ;

87,63 %; 76,32 et 83,51%, respectivement. Les débits de la charge dans le séparateur étaient respectivement de 19,63 ; 20,32 ; 25,66 et 12,37 g/minute. D'ailleurs, ces résultats ont été obtenus quand le séparateur était employé à 0,8 A. Néanmoins, lorsque l'ampère du séparateur a été augmenté à 1,0 ampère, les récupérations ont été agrandies grâce des qualités qui ont été minimisé de façon clair.

- Broussaud, A. (2010) a étudié la modélisation de la séparation magnétique à basse intensité sur tambours rotatifs pour la valorisation du minerai fer et titane de Havre Saint-Pierre (Rio Tinto). Ce projet magnétise le minéral d'hémo-ilménite en le grillant dans des fours rotatifs et la valorisation est conduite par des séparateurs magnétiques à tambours rotatifs. Un ensemble de lots empiriques à des niveaux de magnétisation variables a été effectué. Un classificateur des particules selon leur susceptibilité magnétique spécifique effective a été donné et fabriqué. Chacun des lots expérimentaux a été caractérisé par ce nouvel appareil et analysé afin de développer le modèle mathématique de magnétisation du minerai par la tarification. Des tests ont été menés sur un tambour magnétique rotatif pilote pour modéliser le procédé de séparation. Les équations des deux modèles ont été implantées à un simulateur d'usine montrant un bon potentiel en tant que outil d'optimisation et de développement de nouvelles configurations de méthode.

- Castro-Gomes, J., et al. (2012) ont analysé le potentiel de réutilisation des stériles francs de la mine de tungstène dans les produits artistiques. En portugais, presque 20 % des déchets industriels générés découlent des mines et des carrières, surtout l'exploitation minière de Panasqueira, l'une des plus grandes mines de tungstène au monde. Aujourd'hui, l'exploitation minière de Panasqueira produit environ 100 tonnes de stériles chaque jour. Ces derniers sont assemblés durant des dizaines années en piles énormes et il est important de trouver de nouvelles solutions économiques pouvant aider à leur réutilisation. A la lumière de ce critère, ces travaux analysent le potentiel de réutilisation des tas de stériles de la mine de tungstène Panasqueira. La solution suggérée consiste à développer des matériaux composites innovants à base de polymères, produits à partir de résidus de stériles non pollués. Ces matériaux doivent avoir des propriétés adéquates pour les utilisations à valeur ajoutée techniques et artistiques, comme la conservation, la restauration ainsi que la réhabilitation de monuments historiques, les sculptures, les interventions décoratives et architecturales, ou bien en tant que matériaux pour les revêtements des bâtiments.

- La pré-concentration souterraine par triage du minerai et la séparation gravimétrique sont deux procédés suggérés par Murphy, B., et al., (2012). L'emploi de la technologie de traitement souterraine n'est pas un nouveau concept, les opérations de concassage et de criblage souterraines étant assez largement employées. Avec l'avancement de la technologie de traitement ces dernières années, il existe aujourd'hui un certain nombre de procédés de traitement capables de séparer le minerai et les déchets avec une taille moyennement grossière. Bon nombre de ces techniques sont simplement faisables au sous-sol et, lorsqu'elles sont employées, elles pourraient engendrer de nombreux privilèges en matière de prix et de rendement. L'appréciation de la convenance du minerai à la technologie de pré-concentration est l'initiale étape pour exploiter ces économies potentielles. Ce projet développe comment le tri minier grossier ainsi que la séparation gravimétrique pourraient être employés sous terre.

- Le triage colorimétrique basé sur le traitement des images des matériaux, un procédé a été suggéré par Suhasaria, A., et Pathak, K., en 2012. Le minerai de ruissèlement contient des minéraux précieux et des gangues dont les couleurs changent souvent. Afin de séparer le minerai des déchets et de la gangue, les procédés de traitement d'image sont employés à l'aide d'une vidéo en direct du mélange du minerai et de gangue sur le convoyeur. Les données optiques capturées par la caméra (capteur) sont envoyées par le biais d'un système de transfert de données optiques à un processeur. Les méthodes de traitement d'image sont utilisées pour discriminer le minerai et le matériau de la gangue. Le signal de sortie est employé afin d'actionner les mécanismes adéquats pour conduire l'alimentation vers la ligne sortante convenable. Les résultats subséquentement obtenus prouvent l'efficacité et la performance du procédé ainsi étudié.

Guézennec, A., et al., 2013 ont abordé le sujet de revalorisation des déchets miniers. En France, un projet nouvellement annoncé dans le cadre de l'enquête géologique française (BRGM) vise à classer les gisements de déchets miniers intéressants au niveau national et à estimer le potentiel de récupération des métaux de ces décharges. Dans la majorité de ces mines datant de centaines d'années, un seul ou deux métaux ont été extraits suivant des procédés dont les faisabilités étaient énormément inférieures à celles employées actuellement. Déterminant le type du minerai et les caractéristiques du procédé, il est faisable d'apprécier l'existence d'éléments précieux pour chaque tas de résidus. Dans ce projet, une mine française fermée d'Ag-Pb a ultérieurement été sélectionnée comme cas d'étude pour évaluer le potentiel d'extraction des métaux des résidus miniers, en se concentrant sur l'Ag et le Sb. Une approche de caractérisation du site est suggérée et peut être généralisée à d'autres sites.

- Lutandula, M., et Maloba, B. (2013) ont suggéré la revalorisation des résidus découlant de la flottation de minerais oxydés du concentrateur de Kambove par récupération du cobalt et du cuivre. Dans la province du Katanga en République démocratique du Congo, les résidus de traitement par flottation des minerais oxydés de cuivre et de cobalt sont déposés dans des bassins de décantation en vue de la séparation des résidus et des eaux usées de l'usine, qui sont rejetées dans les rivières. Le but de ce projet de recherche est de récupérer le cuivre et le cobalt par revalorisation des résidus de la flottation de minerais oxydés de cuivre et de cobalt conduit au niveau du concentrateur de Kambove. Il repose sur la détermination du dosage des réactifs permettant d'obtenir la récupération optimale de cuivre (44,80 %) et de cobalt (88,30 %) grâce à la flottation des résidus objet de cette étude. Sur la base de la récupération réalisable des métaux d'intérêt et de la teneur en concentré (3,31 % Cu et 2,22 % Co), il a été perçu que le revalorisation des résidus du concentrateur de Kambove par flottation est le procédé le plus pratique.

- Dey, S., et al. (2014), ont étudié la récupération du minerai de fer de valeur des mélanges de déchets Manganifères des fines du minerai de fer du sud de l'Inde pour la fabrication de granulés. Le dosage chimique de l'échantillon est 52,36 % Fe, 4,75 % Mn, 8,5 % SiO₂ et 2,82 % Al₂O₃. La caractérisation de l'échantillon montre l'existence de l'hématite, de goethite, de pyrolusite, de cryptomélane en microplate avec une légère quantité de quartz et de kaolinite. La séparation magnétique à faible intensité menée avec les produits torréfiés engendrées dans des conditions idéales indique que 70 % de concentré renfermant 64,5 % de Fe et 1,87 % de Mn pourrait être obtenu.

- La gestion durable des déchets miniers dans le bassin de Bor (Serbie) en 2014 a été évaluée par Zoran S. M., et al., le bassin de Bor englobent des énormes quantités de résidus solides et liquides ont été produits et peuvent être estimés à 650 MT de matières solides comportant à peu près 750 000 T de cuivre métallique. Le recyclage des résidus par flottation permettrait non seulement de protéger l'environnement, mais aussi de récupérer le cuivre, métal et autres composés précieux. Ce projet expose un aperçu des différents déchets en termes de solutions durables et suggère un programme de revalorisation/recyclage des résidus qui compose la meilleure alternative pour purifier l'environnement et qui est encore financièrement lucratif. Le procédé de retraitement/recyclage proposé comprend l'excavation, l'attrition, la désulfuration en vrac et la flottation des métaux précieux, le traitement du concentré en vrac par flottation sélective et la mise en décharge des résidus secondaires nouvellement obtenus

dans les anciennes mines à ciel ouvert. Les résultats du laboratoire ont prouvé une récupération possible du cuivre dans le concentré en vrac pouvant aller jusqu'à 98 %.

- La revalorisation des résidus miniers a été proposée par Bodéan, F., et al., (2015). Ces déchets miniers sont considérés comme des ressources auxiliaires potentielles des métaux. Ce travail décrit l'examen de trois résidus miniers distincts et discute l'opportunité de revaloriser de ces ressources minières dans le cadre de la gestion globale du site minier.

- Jiang, L., Xue, Q., et Liu, L. (2015), ont étudié la libération potentielle de phosphore des haldes stériles de la mine de phosphate. Les comportements de lessivage de six tas de stériles phosphatés entreposés à Xiangxi des bassins versants de la rivière ont été caractérisés dans cette étude conformément aux normes du cadre d'évaluation environnementale de lessivage afin de : déterminer les rejets potentiels de phosphore par les stériles phosphatés suivant les différents plans environnementaux. Les caractéristiques de lixiviation du phosphore ont été analysées à pH 2,0–13,0 et à des rapports liquide-solide variant de 0,5 ml/g de matière sèche à 10 ml/g de matière sèche. Les résultats ont montré que des quantités énormes de phosphore étaient probables libérées des roches résiduelles dans des environnements acides que dans des environnements neutres ou basiques. Le phosphore libéré dans un environnement acide a été déterminé comme un ou deux ordres de magnitude supérieure à celle dans un environnement neutre ou basique. Bien que le pH de la pâte des roches stériles soit retenu dans une plage légèrement basique (7,5 à 9,0) sous l'action de lessivage, les concentrations de phosphore en phase liquide libérées par la majorité des roches stériles ont excédé le seuil de disponibilité (0,5 mg/l), par lessivage.

- Junca, E., et al., (2015) ont suggérés le recouvrement de fer à partir des déchets produits lors de l'extraction de granit par trois méthodes : séparation magnétique, table de concentration et le cyclone. L'objectif de cette étude c'était de caractériser granulo-chimique des déchets miniers. Pour y parvenir, la diffraction des rayons X et la microscopie électronique à balayage ont été employées. Trois méthodes distinctes ont été testées : la séparation magnétique, la concentration dans la table et le traitement par cyclone. La première méthode constituait trois étapes : (1) l'emploi d'un séparateur magnétique à haute intensité en voie humide ; (2) le matériau de la première étape, après, a été soumis à une nouvelle séparation, cette fois en employant un aimant pour les particules de terres rares ; et (3) ce matériau après deux processus de séparation aient, par la suite, été soumis à une séparation magnétique. La deuxième méthode employait une table de concentration établie à des inclinaisons variables,

fréquences d'oscillation et débits de lavage. Au cours de ce moment, pour la troisième méthode, les essais au cyclone, seule la pression de l'eau était changée. A la fin de chaque essai, une analyse chimique a été menée pour déterminer le fer métallique existant dans chaque échantillon. Les essais ont prouvé que la séparation magnétique offre les meilleurs résultats. En appliquant cette technique, on a obtenu un concentré titre de 93 % de fer métallique et un concentré de granite renferme uniquement 0,6 % de fer métallique. Toutefois, dans les expériences de concentration de la table, le concentré ferreux n'avait que 13,6 % de concentration métallique. Au moment de de la séparation par traitement cyclonique, le produit englobait du fer métallique (7,2 % maximum).

- Zhang, H., et al. (2015), ont suggéré le traitement des minerais de fer pauvre par séparation magnétique à haute intensité en voie sèche. Il a été constaté que la taille des particules d'alimentation et la vitesse de rotation du tambour ont une influence direct sur les résultats de séparation, et qu'il est possible d'obtenir un concentré magnétique titrant 36,22 % Fe avec une récupération de 75,97 % à partir du minerai titrant 29,14 % Fe à une grosseur de particules inférieure à 10 mm.

- Evdokimov, S., et al. (2016) ont élaboré des matériaux de construction à base de déchets de l'exploitation minière et de l'industrie métallurgique. Il a été trouvé qu'après avoir extraire le métal en employant la méthode de flottation pour les anciens résidus de l'usine de tungstène-molybdène et en insérant du calcaire, le mélange est semblable au clinker utilisé dans la production du ciment Portland. Il a été confirmé empiriquement que le dépôt de gâteaux dans la production hydro-métallurgique peut être divisé en une matière première secondaire. Un complexe de tungstène-molybdène et une partie non métallique qui, additionnés au béton lourd dans une fraction de 20 à 30 % de la quantité de ciment, ne diminuent pas la résistance des échantillons de béton ; en fait, un léger accroissement de la résistance à la compression est remarqué. Les pièces non métalliques peuvent être employées en tant que minéraux ajouts dans la production de ciment. Le prix des minéraux ajouts représente environ 9,5 % du coût total des matières premières et 2,4 % des dépenses directes. Le coût de production d'une tonne de ciment avec minéraux additifs a été 1757.09 roubles pour un prix de vente de 3964.36 roubles. Le prix usine de ce ciment était de 3680 à 4200 roubles, ce qui donne un résultat commercial positif. Ce projet comprend l'étude technico-économique sur la faisabilité de l'emploi du matériau suivant les modèles économiques développés pour le recyclage des déchets de minerai de plomb-zinc dans la production de matériaux de construction.

- Hakkou, R., et al., (2016) ont étudié la possibilité de valorisation des stériles francs de phosphates et des boues des mines de phosphate marocaines, Ces déchets miniers alcalins renferment des quantités considérables de calcite (46 % en poids) et de dolomie (16 % en poids) qui contribue à la neutralisation de l'acidité engendrée par les déchets de la mine fermée de Kettara, localisée auprès de Marrakech, au Maroc. L'addition de 15 % en poids des roches stériles alcalins aux résidus grossiers de Kettara a généré des lixiviats avec une acidité et des charges en métal inférieures à celles de l'échantillon témoin non changé. La caractérisation hydro-géotechnique des stériles phosphates calcaires originaux et tamisés, et des boues de phosphate, a montré leur pertinence pour une utilisation comme composant de couvertures de stockage et de relâchement pour la restauration de sites miniers industriels. Des essais de laboratoire (colonnes) et des tests sur terrain (colonnes instrumentées et cellules expérimentales) ont montré que l'infiltration d'eau pouvait être contrôlée, même en cas de précipitations extrêmes (150 mm/jour). Des recherches complémentaires sont en cours sur le recyclage et la valorisation des boues de phosphates découlant de mines de phosphates sous forme de céramiques. En outre, les morts-terrains des bassins sédimentaires phosphatés sont essentiellement constitué de marnes ; blocs calcaires ; lit de silex ; nodule de silex ; marnes et argiles ; calcaire silicifié ; qui ont un potentiel de réutilisation important en tant que sol en marbre-mosaïque, mortiers et béton et dalles de produits en pierre naturelle pour les sols et les escaliers.

- Longhi, M., (2016) ont proposé la valorisation des déchets miniers de kaolin pour la production de géopolymères. Ce projet évalue la faisabilité d'employer une boue kaolinique, qui est un résidu de l'industrie minière, est disponible en énorme quantité et aujourd'hui mise en décharge comme matière première pour la production de liants géopolymères. Les géopolymères ont été synthétisés à 50 ° C avec un rapport molaire global $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,0 et un rapport molaire global $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 3,1 et 4,5. La teneur en silicates solubles liées avec le rapport molaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, a été déterminée par les techniques calorimétriques et spectroscopiques. Les géopolymères à base de déchets de boues kaoliniques ont développé des résistances à la compression pouvant arriver jusqu' à 70 MPa après une journée de durcissement.

- Mahlangu, T., et al. (2016) ont suggéré la séparation des roches stériles de la kimberlite à l'aide d'un triage à base des capteurs dans la mine de Cullinan Diamond. La technologie de tri par spectroscopie dans le proche infrarouge (NIR) est intégrée à un trieur optique de minéraux qui permet de discriminer les matériaux en utilisant les différences de caractéristiques

lorsqu'ils sont exposés à un rayonnement proche infrarouge. De septembre 2014 à avril 2015, une usine pilote faisant appel à la technologie NIR pour séparer la kimberlite des déchets a été mise en service afin de déterminer la viabilité de l'application de cette technologie dans le schéma de traitement du processus d'extraction du diamant de la mine de diamants Cullinan. L'usine a été employée pour baisser le contenu en déchets dans la fraction de taille -70 + 35 mm à la section de broyage, ensuite au processus de séparation en milieu dense. Ce travail a été conduit à Mintek et les résultats ont montré une forte possibilité de différencier entre la kimberlite et les déchets en employant la technologie NIR.

- Idres, A., et al. (2017) ont proposé la valorisation des déchets miniers de la mine de fer de l'Ouenza (Algérie) par séparation radiométrique. A cet effet, des échantillons représentatifs ont été prélevés des décharges. Initialement, des tests de récupération de classes riches en fer sont réalisés par séparation radiométrique. Ensuite, le reste du minerai a soumis à une préparation mécanique suivie par enrichissement, qui fera l'objet d'une autre étude. Des recherches sont conduites sur des échantillons pour trouver les paramètres optimaux d'absorption des rayons γ testés par radiométrie ; ces paramètres étaient ; la vitesse de la bande transporteuse et le temps d'exposition aux rayons γ . Les résultats obtenus par ce processus de valorisation sont très significatifs : teneur en fer de 53,5 % et 8,3 % de récupération.

4.8. Valorisation des déchets miniers de Boukhadra

4.8.1. Séparation magnétique

La séparation magnétique est l'une des techniques les plus utilisées pour la concentration des minéraux diamagnétiques et paramagnétiques ; Ce processus est employé maintenant pour extraire des minéraux et des métaux des déchets miniers.

Au cours de la séparation magnétique, la force magnétique développée à l'intérieur du séparateur magnétique pourrait être exprimée par la formule suivante (Li, Y. et al., 2011) :

$$F_m = V \cdot M(H) \cdot \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

Où :

V : est le volume de la particule magnétique,

M (H) : est la magnétisation de la particule magnétique,

H : est le champ magnétique,

dH/dx : est le gradient magnétique.

En vue de l'extraction du fer des stériles francs de la mine Boukhadra, on a utilisé le séparateur magnétique à haute intensité (SMHI) en voie sèche du Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement (LAVAMINE), Université Badji Mokhtar - Annaba (Figure 49).



Figure 49. Séparateur magnétique à haute intensité en voie sèche

Le séparateur suscité est constitué d'une boîte d'alimentation, un alimentateur vibrant et trois (3) bobines électromagnétiques liées à un régulateur de l'intensité du courant et de tension, ces bobines offrent une densité de flux magnétique variant de 1,2 à 2 Tesla, ainsi que deux (2) sorties l'une de produit magnétique et l'autre de produit non magnétique.

L'analyse chimique des produits des tests de séparation magnétique à haute intensité en voie sèche a été effectuée à ORGM - Boumerdès, les valeurs du tableau 18 ont été calculées en prenant : $Q_1 = 125$ g.

Avec :

Q_1 , Q_c et Q_r : Respectivement les masses du produit d'alimentation, du concentré et du rejet (g)

α_i : Teneur en fer dans le produit d'alimentation (%)

β_c et β_r : Respectivement la teneur en fer dans le concentré et le rejet (%)

γ_c et γ_r : Respectivement le rendement du concentré et du rejet (%)

ϵ_c et ϵ_r : Respectivement la récupération du fer dans le concentré et le rejet (%)

Tableau 18 : Tests de séparation magnétique à haute intensité des stériles francs de la mine de Boukhadra

Classe (mm)	Fraction magnétique				Fraction non magnétique				Intensité (A)
	Q_c (g)	β_c (%)	γ_c (%)	ϵ_c (%)	Q_r (g)	β_r (%)	γ_r (%)	ϵ_r (%)	
- 1 + 0,5	45,02	28,74	36,01	38,98	79,98	25,31	63,99	61,02	3
	42,7	30,56	34,16	39,31	82,3	24,47	65,84	60,69	6
	47,93	31,10	38,34	44,91	77,07	23,72	61,66	55,09	9
	46,08	33,69	36,86	46,77	78,92	22,38	63,14	53,23	12
- 0,5 + 0,25	90,38	33,71	72,30	88,08	34,62	11,90	27,7	11,92	3
	82,88	37,98	66,30	91,00	42,12	7,38	33,7	9	6
	84,73	39,84	67,78	97,59	40,27	2,06	32,22	2,41	9
	84,63	39,91	67,70	97,64	40,37	2,02	32,3	2,36	12
- 0,25 + 0,125	34,35	28,17	27,48	28,24	90,65	27,12	72,52	71,76	3
	30,62	28,79	24,49	25,72	94,38	26,96	75,51	74,28	6
	30,53	30,46	24,42	27,13	94,47	26,42	75,58	72,87	9
	51,77	32,62	41,41	49,28	73,23	23,72	58,59	50,72	12
- 1 + 0,125	48,12	29,03	38,49	41,88	76,88	25,20	61,51	58,12	3
	49,73	30,98	39,78	46,19	75,27	20,74	69,22	53,81	6
	52,32	31,54	41,85	49,47	72,68	23,18	58,15	50,53	9
	54,18	34,04	43,34	55,32	70,82	21,03	56,66	44,68	12

Les résultats de l'analyse chimique de deux fractions (magnétiques et non magnétiques) obtenues après tests par séparation magnétique à haute intensité en voie sèche sur la classe granulométrique : -0,5 + 0,25 mm des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra avec une variation de l'intensité du courant électrique de (SMHI) de 12 A sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 19 : Analyse chimique de la classe riche (-0,5 + 0,25 mm) testée à 12 A

Fraction	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	MnO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	PAF
Magnétique (%)	3,97	39,91	4,05	2,57	0,21	0,46	0,76	0,04	0,26	0,05	0,01	0,02	39,91
Non-magnétique (%)	43,86	2,02	15,12	7,69	0,57	0,68	0,38	0,02	0,13	0,04	0,03	0,01	27,37

L'influence de la variation de l'intensité du courant électrique sur la teneur (figure 50) et la récupération du fer (figure 51) des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra est très significative.

Pour les classes granulométriques : -1+0,5 mm, -0,5+0,25 mm et -1+0,125 mm, la récupération du fer augmente plus qu'on augmente l'intensité du courant électrique, la valeur maximale a été obtenue dans la classe :-0,5+0,25 mm testée à 12 A avec ; $\epsilon_c = 97,64\%$ et $Fe_2O_3 = 39,91\%$.

Une diminution de récupération du minerai de fer a été enregistré dans la classe : -0,25+0,125 mm (Max : $\epsilon_c = 49,28\%$ et $Fe_2O_3 = 32,62\%$ à $I = 12 A$).

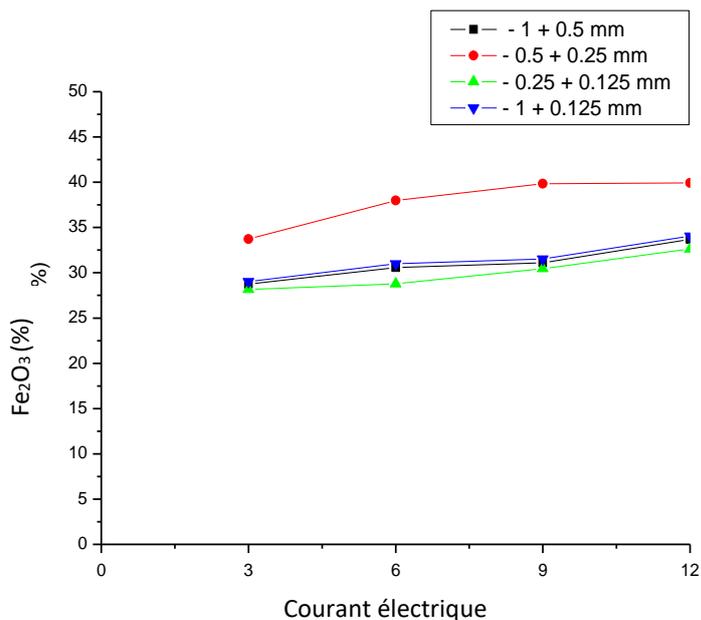


Figure 50. Influence de l'intensité du courant électrique sur la teneur en fer

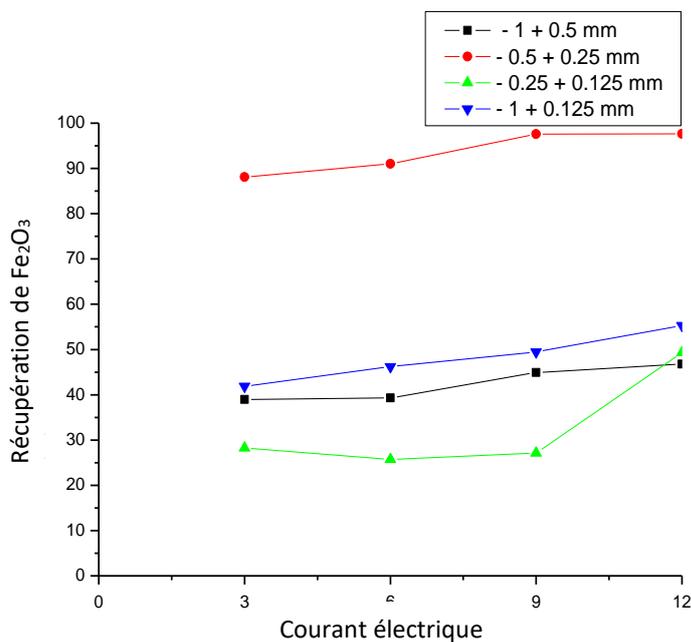


Figure 51. Influence de l'intensité du courant électrique sur la récupération du fer

A cet effet, un schéma de traitement a été proposé pour la gestion et la valorisation des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra (Figure 52).

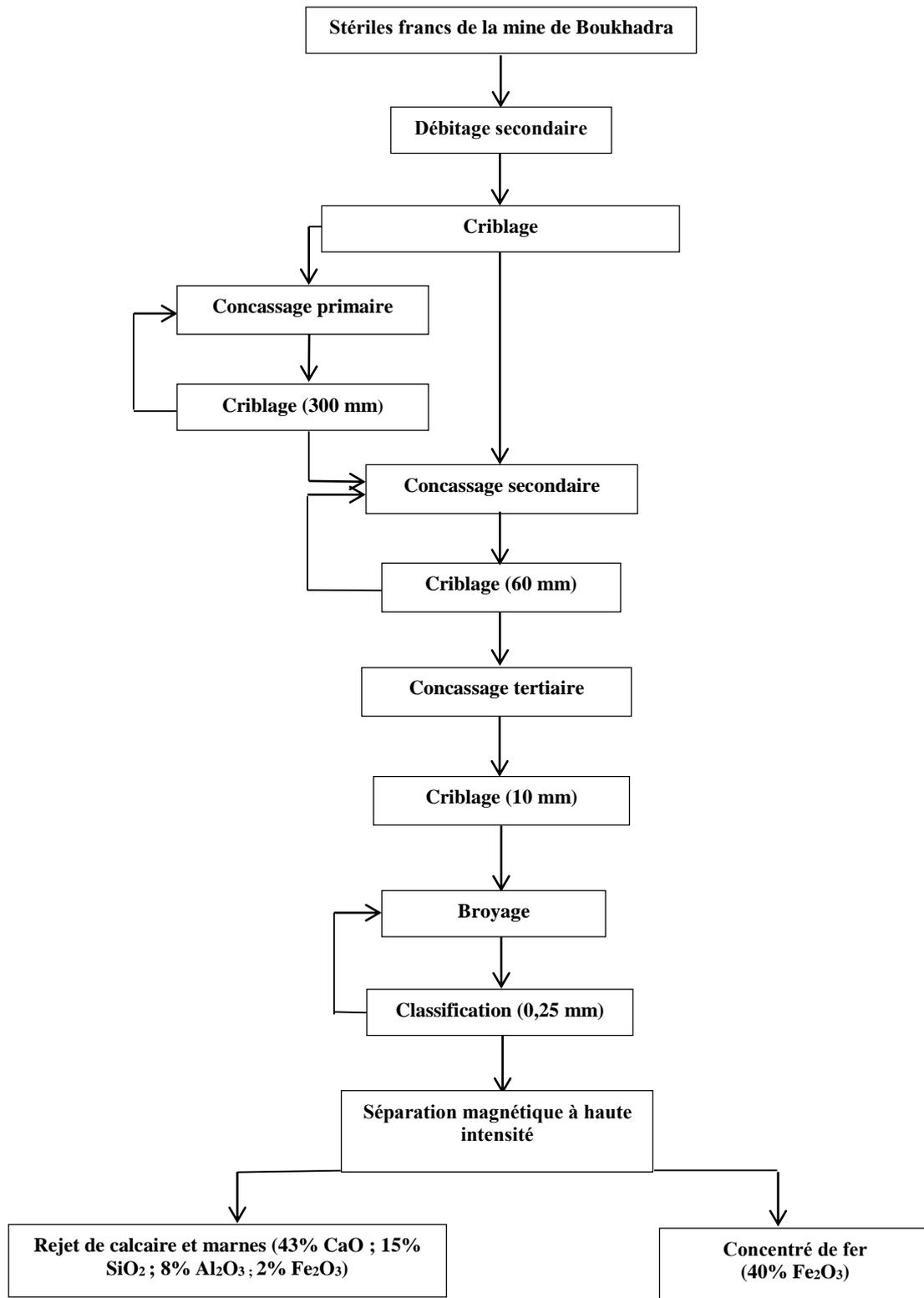


Figure 52. Schéma proposé pour la gestion et la valorisation des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra

4.8.2. Tri manuel

Avant de procéder au tri optique des déchets miniers de Boukhadra, nous avons effectué un tri manuel de ces déchets en fonction de la couleur des minéraux (Figure 53), il est clair que la composition minéralogique des déchets miniers de Boukhadra est principalement : Calcaire, hématite, marne jaune et grise, la présence de ces minéraux a été confirmée par la DRX.

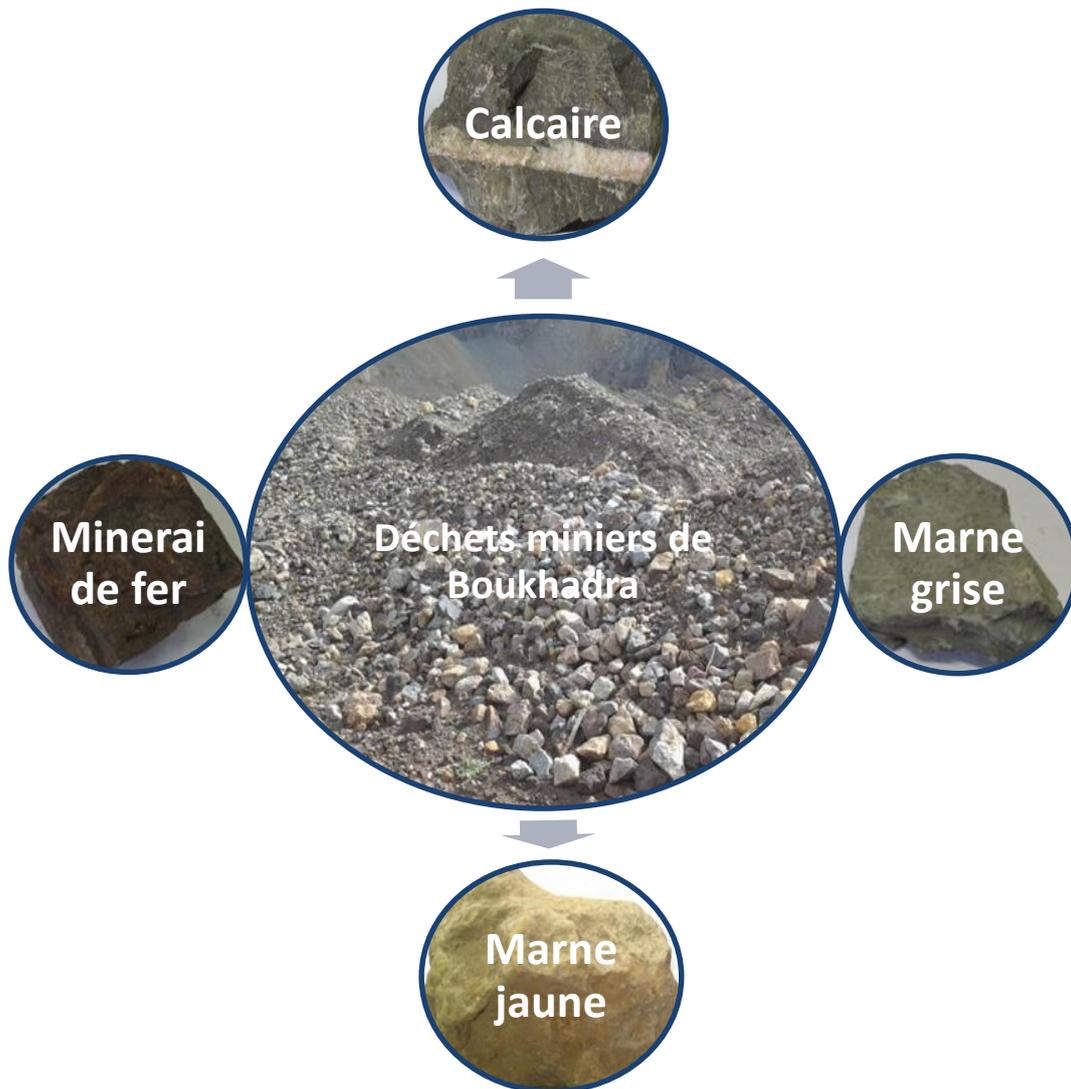


Figure 53. Tri manuel des déchets miniers de Boukhadra

4.8.2.1. Analyse par DRX des déchets miniers de la mine de Boukhadra

L'analyse par diffraction des rayons X des roches stériles de Boukhadra effectué à ORGM - Boumerdès est donnée sur les figures suivantes.

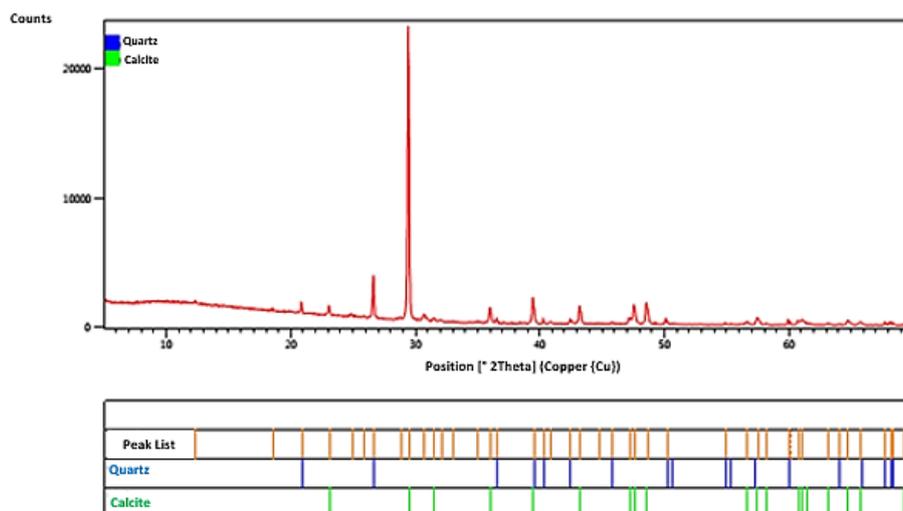


Figure 54. Spectres DRX du calcaire

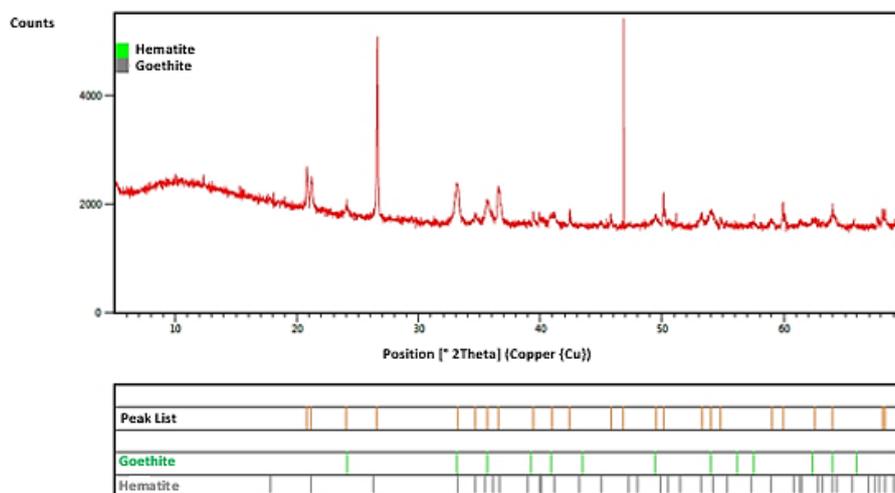


Figure 55. Spectres DRX du minerai de fer

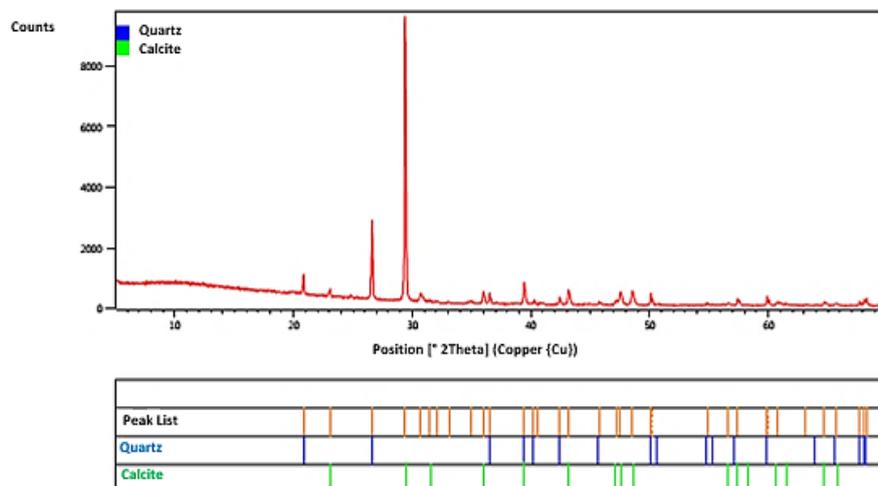


Figure 56. Spectres DRX de la marne grise

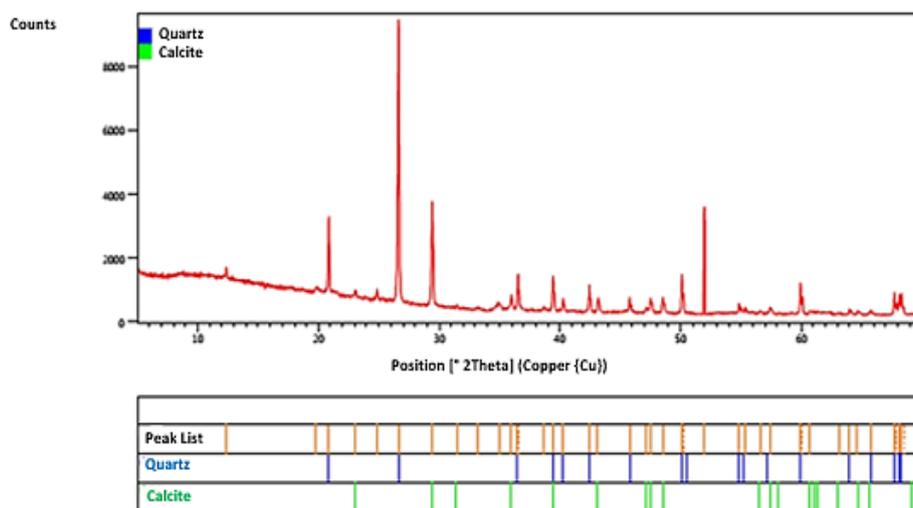


Figure 57. Spectres DRX de la marne jaune

4.8.2.2. Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra

La composition chimique des déchets miniers de Boukhadra donnée dans le tableau 20 a été réalisée par l'analyseur FX dans CETIM - Boumerdès.

Tableau 20 : Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra

Elément (%) Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	BaO	PbO	ZnO	ZrO ₂	PAF
Calcaire	7,3	1,06	5,62	49,87	0,04	0,02	0,05	0,09	0,2	0,15	1,21	0	0,02	0,01	0	31,38
Minerai de fer	21,14	3,61	34,32	8,22	0,26	1,06	0,1	0,56	0,05	0,57	0,32	0,12	0,07	0	0	27,54
Marne grise	34,45	8,30	8,46	25,82	0,23	0,01	0,1	0,91	0,01	0,61	1,27	0,01	0,01	0,01	0,17	18,8
Marne jaune	46,26	11,42	10,04	18,45	0,27	0,01	0,13	0,99	0,07	0,73	0,77	0,01	0,01	0,01	0,18	8,7

A partir des analyses chimiques des échantillons, la teneur en fer est de 34,32 % Fe₂O₃ ; 21,14 % de SiO₂ ; 8,22 % de CaO et 3,61 % de Al₂O₃. Le calcaire est constitué de 49,87 % de CaO et 5,62 % Fe₂O₃. La marne jaune est composée de 46,26 % de SiO₂ ; 18,45 % de CaO et de 10,04 % de Fe₂O₃ contre 34,45 % de SiO₂ et de 8,46 % de Fe₂O₃ dans la marne grise.

Pour mieux comprendre l'aspect qualitatif et quantitatif de ce matériau et en tenant compte de la couleur des minéraux, nous avons proposé la gestion de ces déchets miniers par tri optique (séparation colorimétrique).

4.8.3. Séparation optique

Le traitement des minerais et la gestion intégrée des déchets miniers jouent un rôle primordial dans le domaine minier en minimisant les volumes des déchets stockés sur le carreau de la mine et en facilitant leur réutilisation et recyclage dans les différents secteurs économiques ainsi que pour la restauration ou la réhabilitation des sites miniers (Boudra, L., Delecroix, B., et Béguin, P., 2015). Pour ce faire, des mesures de couleur sont effectuées sur différents échantillons des déchets miniers de Boukhadra en vue d'une séparation optique.

4.8.3.1. Détermination de RVB des images des roches de Boukhadra

Pour déterminer le RVB des images des roches à séparer, on a utilisé l'Algorithme suivant :

Début
Charger l'image (IMG)
Lire la couleur rouge de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (RIMG)
Lire la couleur verte de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (VIMG)
Lire la couleur bleue de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (BIMG)
Calculer la moyenne de chaque image (MRIMG, MVIMG et MBIMG)
Affichage de toutes les images (IMG, RIMG, VIMG, BIMG)
Fin

Des tests par codes Matlab ont été effectués pour déterminer le RVB des différentes images des déchets miniers de Boukhadra, les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 21 : RVB des images provenant des déchets miniers de Boukhadra

Echantillon Valeur	Calcaire	Minerai de fer	Marne jaune	Marne grise
R	94-97	61-68	149-155	100-109
V	92-98	50-56	129-136	103-112
B	76-81	41-49	85-89	88-106

Le schéma présenté dans la figure 58 est un flow-sheet proposé pour la gestion des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra.

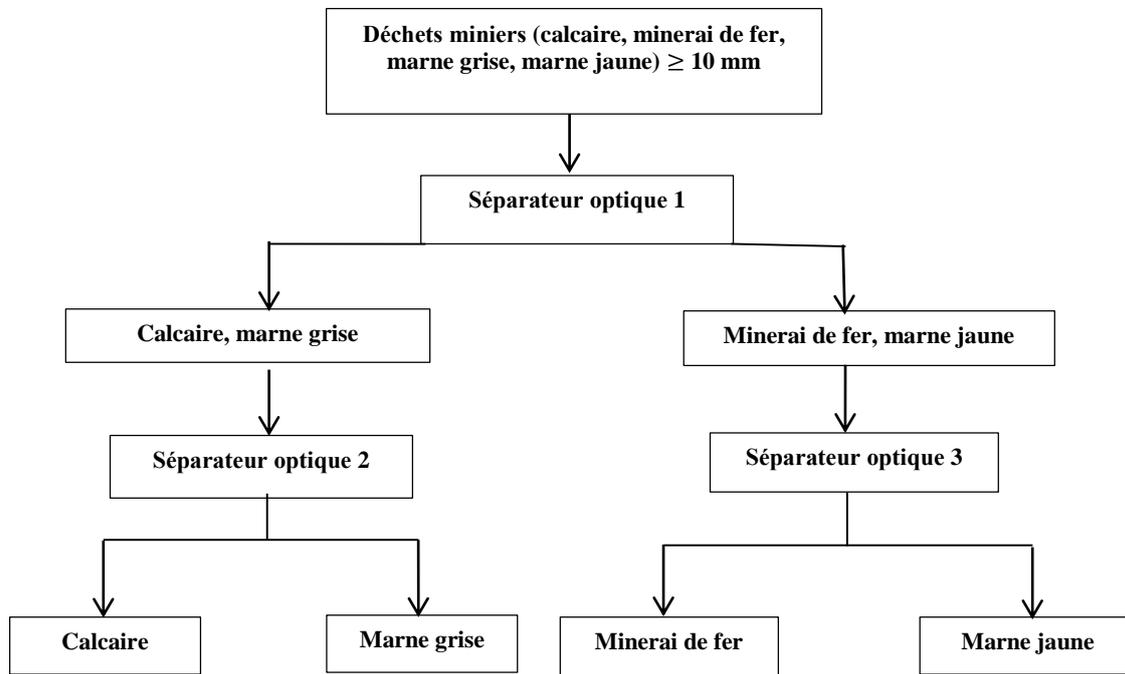


Figure 58. Diagramme du tri optique des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra

4.8.3.2. Algorithmes du tri optique

Les Algorithmes utilisés pour la gestion du système d'éjection des trieurs optiques selon les valeurs RVB des différentes roches des déchets miniers de Boukhadra sont données ci-dessous.

Tri optique 1

Début

Charger l'image (IMG)

Lire la couleur rouge de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (RIMG)

Lire la couleur verte de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (VIMG)

Lire la couleur bleue de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (BIMG)

Calculez la moyenne de chaque image (MRIMG, MVIMG et MBIMG)

L'image est définie comme cet algorithme

Si (la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 93 et 98 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 91 et 99 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 75 et 82) Ou la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 99 et 110 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 102 et 113 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 87 et 107) alors

Montrer que l'image est 'Calcaire et marne grise';

Appelez le tri optique 2

Si (la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 60 et 69 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 49 et 57 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 40 et 50), la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 148 et 156 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 128 et 137 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 84 et 90) alors

Montrer que l'image est 'fer et Marne jaune' ;

Appelez le tri optique 3

Fin

Afficher la couleur de l'image (IMG)

Fin

Tri optique 2

Début

Charger l'image (IMG)

Lire la couleur rouge de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (RIMG)

Lire la couleur verte de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (VIMG)

Lire la couleur bleue de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (BIMG)

Calculez la moyenne de chaque image (MRIMG, MVIMG et MBIMG)

Si (la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 93 et 98 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 91 et 99 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 75 et 82)

Montrer que l'image est 'Calcaire'

Sinon (la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 99 et 110 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 102 et 113 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 87 et 107)

Montrer que l'image est 'Marne grise' ;

Fin

Fin

Tri optique 3

Début

Charger l'image (IMG)

Lire la couleur rouge de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (RIMG)

Lire la couleur verte de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (VIMG)

Lire la couleur bleue de l'image (IMG) et l'enregistrer dans la nouvelle image (BIMG)

Calculez la moyenne de chaque image (MRIMG, MVIMG et MBIMG)

Si (la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 60 et 69 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 49 et 57 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 40 et 50)

Montrer que l'image est 'fer' ;

Sinon (la moyenne de la composante rouge (MRIMG) varie entre 148 et 156 et la moyenne de la composante verte (MVIMG) varie entre 128 et 137 et la moyenne de la composante bleue (MBIMG) varie entre 84 et 90)

Montrer que l'image est 'Marne jaune' ;

Fin

Fin

4.8.3.3. Avantages de méthode de tri optique

Le tri constitué généralement une étape intermédiaire et indispensable pour le traitement des déchets, son objectif principal est de transformer un groupe de déchets mélangés en plusieurs catégories facilement recyclables. En fait, le tri des minéraux est une technologie éprouvée dans de nombreuses industries à travers le monde. Il utilise une variété de capteurs électroniques combinés avec des processeurs à haute vitesse qui peuvent être programmés pour reconnaître certaines caractéristiques des minerais comme la couleur, le rayonnement, la densité, la conductivité, l'aimantation, etc. Un système d'éjection mécanique est ultérieurement activé par le processeur qui éjecte les particules de l'alimentation (Murphy, Zyl et Domingo, 2012).

De plus, les techniques de tri optiques basées sur des capteurs pour les matériaux ont connu une progression rapide en Europe au cours des 10 dernières années (Wotruba, 2006). Ils sont largement employés dans plusieurs industries minières autres que les phosphates pour réduire les déchets. Une seule application dans l'industrie des phosphates a été utilisée par une mine de phosphate au début des années 1980 dans l'Ouest des États-Unis. D'autres sociétés d'extraction de phosphate ont récemment montré un intérêt pour le tri optique et ont effectué un test de préfaisabilité à l'échelle du laboratoire (Daoudi, Kukenska, 2013).

Par conséquent, la mise en œuvre d'un séparateur optique dans le site minier aura de nombreux avantages ; cette technique de séparation est rapide, simple, malléable, économique et moins polluante (elle génère peu de poussière car la taille des particules à séparer ≥ 10 mm), elle ne nécessite pas de gros investissements, elle économise également les frais de déplacement, de chargement, de transport et de traitement des déchets miniers. Il contribue au tri sélectif des différents types de roche en fonction de leurs caractéristiques chimiques qui sont : la composition et la couleur (calcaire, minerai de fer, marne grise et marne jaune), ce qui facilitera leur recyclage et leur réutilisation dans les différents secteurs (construction agrégats, ciment, peinture, céramique, fer et acier, etc.).

Pour ce faire, le tri optique des déchets miniers de Boukhadra permet de recycler les matériaux, de libérer les zones occupées par ces derniers, de prévenir la lixiviation des déchets miniers et les problèmes environnementaux liés à la pollution des eaux et des sols, la poussière, etc.

4.9. Domaines d'utilisation des produits triés

4.9.1. Minerai de fer

On utilise le minerai de fer souvent sous forme d'acier pour la construction. Ce matériau a été déjà utilisé il y a des années dans l'industrie technologique sous forme métallique et oxydes afin de fixer des informations analogiques ou numériques sur des supports adéquats comme les bandes magnétiques, les cassettes audio et vidéo ainsi que les disquettes (Matías, 2008). Il peut servir également comme des pigments rouges, parce que les pigments à base d'oxydes de fer sont bons et durables. L'utilisation du fer remonte de la préhistoire jusqu'au aujourd'hui en passant par les différentes civilisations (F. Delamare). La figure suivante présente quelques exemples sur les utilisations usuelles des minerais de fer (Halimi, 2008 ; Yellishetty et al, 2012).

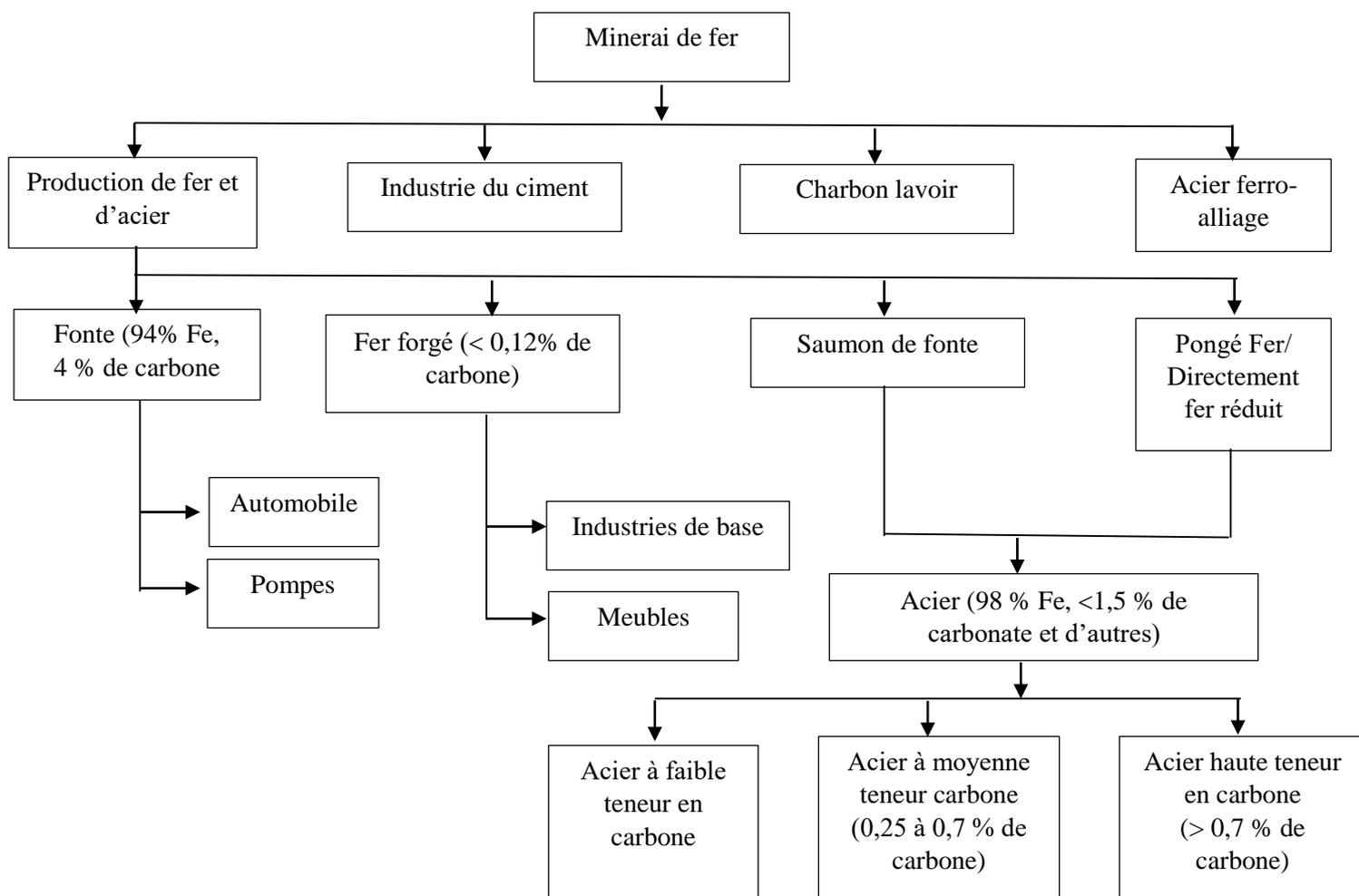


Figure 59. Différentes utilisations du minerai de fer

De ce fait, le minerai de fer qui résulte de la séparation magnétique et de la séparation optique peut servir, selon sa teneur en Fe_2O_3 (39,91 % pour la séparation magnétique et 34,32 % pour le tri optique) comme pigment rouge (Darmane Y., 2008), ou comme un ajout de correction qui entre dans la fabrication du ciment.

4.9.2. Marnes

Les marnes sont des matériaux argileux et calcaires en même temps, en fonction de leur composition, trois grandes catégories peuvent être distinguées :

- Les marnes argileuses : elles contiennent entre 5 et 35 % de carbonate de calcium ;
- Les marnes proprement dites : elles contiennent entre 35 et 65 % de carbonate de calcium ;
- Les calcaires marneux : elles contiennent entre 65 et 95 % de carbonate de calcium.

En général, les marnes ont fait l'objet d'une exploitation en carrières à ciel ouvert ou souterraine afin de fabriquer de la chaux avec les marnes argileuses, de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites et du ciment avec les marnes calcaires ou bien les calcaires marneux. Elles ont été encore employées pour l'amendement des terres agricoles (Mellal F., 2009). Le Diagramme suivant montre la relation $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$.

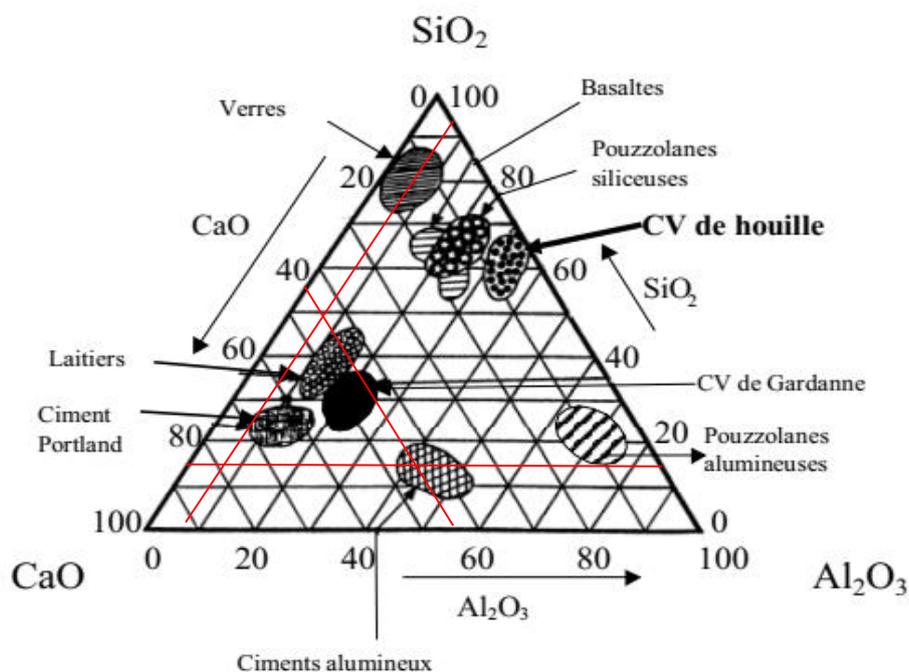


Figure 60. Diagramme ternaire de Keil-Rankin (Adamiec, P., Benezet, J. C., et Benhassaine, A., 2005)

La figure 61 présente les différentes phases nécessaires pour la fabrication du ciment portland.

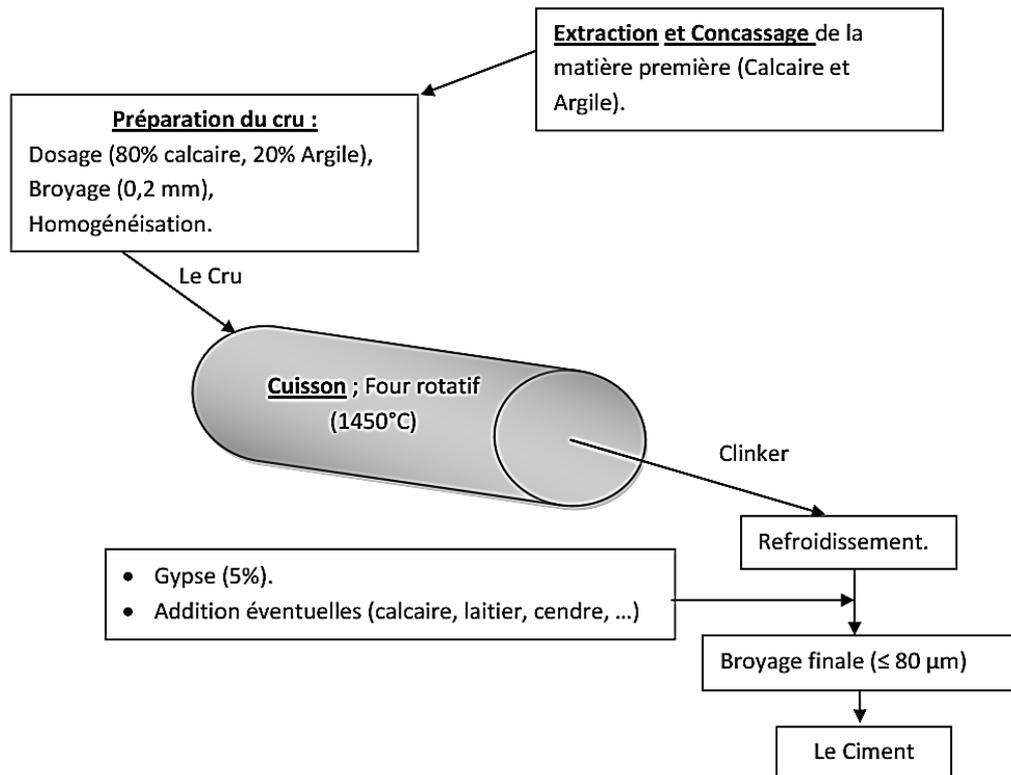


Figure 61. Schéma de la fabrication du ciment Portland (Hadj S., 2011)

Donc, le deuxième produit de la séparation magnétique (le produit non magnétique) peut être employé selon sa composition chimique et sa granulométrie comme charge pour la fabrication du ciment. Les marnes triées de la séparation optique peuvent être utilisées pour la fabrication des carrelages, ciment, chaux, etc.

4.9.3. Calcaire

L'utilisation du calcaire englobe les secteurs suivants (AGAR) :

a) La construction : routes et bâtiments.

-Un m^3 de mortier comporte 100 kg de chaux, 185 kg de ciment, 1800 à 1900 kg de granulats ainsi que 235 kg d'eau.

-Un logement nécessite entre 100 à 300 tonnes de granulats. Un lycée nécessite 2000 à 4000 tonnes de granulats et un kilomètre d'autoroute requière approximativement 30 000 tonnes de granulats.

b) Les charges pour les ciments, les papeteries, les peintures, les plastiques, les caoutchoucs, les colles, les hauts fourneaux et les fonderies.

-Une tonne de papier englobe 250 à 300 kg de calcaire pour faire spécialement la couche de finition.

-Les PVC et le caoutchouc constituent les principaux marchés pour le carbonate de calcium.

-Les mastics sont composés de 85 % de carbonates et de 15 % d'huile de lin.

-Les peintures renferment de 10 à 40 % de carbonates.

-Pour une tonne d'acier il faut 150 kg de calcaire et 50 kg de chaux.

-Pour une tonne de verre il faut 700 kg de sable (SiO_2), 300 kg de calcaire et 130 kg de soude et pour une tonne de soude il faut 1300 kg de calcaire.

c) L'agro-alimentaire pour l'alimentation animale et humaine, les engrais et les amendements, les sucreries et les confiseries, les laiteries et l'industrie pharmaceutique.

d) L'environnement : Il contribue au traitement des eaux, le traitement des boues, le traitement des fumées et le traitement des déchets ménagers.

-Un m^3 d'eau potable demande de 50 à 200 grammes de chaux (précipitation des métaux lourds et floculation des boues).

-Il faut 20 kg de calcaire pour fabriquer 100 kg de sucre.

-La chaux et le carbonate de calcium sont employés dans plusieurs produits d'alimentation humaine et animale.

-Le carbonate de calcium est un composant essentiel pour la fabrication du dentifrice.

-Industrie chimique comme la fabrication de la soude, pétrochimie, tanneries.

4.9.4. Essais mécaniques sur des échantillons de la mine de Boukhadra

Essais sur matériaux Ballast 25/50

Les tableaux 22 et 23 présentent les résultats des essais mécaniques sur des échantillons de la mine de fer de Boukhadra.

Tableau 22 : Résultats des essais mécanique sur des échantillons de la mine de Boukhadra

Désignation	Masse volumique (g/cm ³)	Teneur en eau (%)	Porosité (%)	Degré de saturation (%)	Résistance à la compression	
					Charge (KN)	R/C (MPA)
Roche du minerai de fer	2,705	-	-	-	-	-
Marne	1,690	20,4	-	92	-	-
Roche calcaire gris N°1	2,653	-	Non poreuse	-	105,2	52,60
Roche calcaire gris N°2	2,340	-	6,47	-	100,4	50,20
Roche calcaire gris N°3	-	-	Non poreuse	-	120,8	60,40
Roche calcaire gris N°4	-	-	Non poreuse	-	148,4	74,20
Argile N°1	-	17,0		95	-	-
Argile N°2	-	19,0		96	-	-
Argile N°3	-	17,0		80	-	-

Tableau 23 : Résultats des essais mécaniques sur des échantillons de Ballast 25/50 de la mine de Boukhadra

Désignation	Masse volumique réelle	LA	MDE	DRG (M _{DE} -LA)	DEVAL		DRG (D-LA)
					D _s	1,40	
Ballast 25/50	2,66	29,13	17,7	10	D _H	3,30	09

-La masse volumique sèche d'un élément de roche NF P 94-64

-Essai Los Angeles NF – EN 1097 – 2.

-Essai de Micro Deval NF-EN 1097-1-A1.

-Essai de Deval H+S NF P 18-577.

-Essai sur granulats pour Ballasts de voies ferrées Norme NF EN 13450

De ce fait, le calcaire résultant du tri optique peut être utilisé davantage dans les travaux de génie civil (terrassement et construction) ou bien comme une charge pour la fabrication du ciment.

4.10. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes qui peuvent être employés pour la gestion et la valorisation des déchets miniers en vue d'un développement durable.

Quant à la valorisation des déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra, les méthodes discutés dans ce chapitre (tri magnétique et tri optique des stériles francs) auraient pour avantages les points suivants : (voie sèche, propriétés physiques des déchets, taux d'extraction élevé, faisabilité).

La méthode de tri optique ainsi proposée est plus pratique et elle donne souvent de bon résultats pour la séparation des déchets miniers de la mine de fer en question ou outre mine de fer (de point de vue de la granulométrie des produits séparés, la rapidité, l'efficacité, non polluante), ce que donne un avantage d'utiliser ces stériles dans des domaines divers : la construction, l'industrie cimentaire, peinture...

Conclusion générale et perspectives

La mine de fer de Boukhadra située au Nord Est de l'Algérie est exploitée par une méthode combinée (à ciel ouvert et souterraine), elle génère en plus du minerai de fer d'hématite des milliers de tonnes par an de déchets miniers (roches stériles et autres).

Le volume des déchets miniers stockés sur le carreau de la mine de Boukhadra représente un nouveau gisement pour les générations futures, quoique ces déchets posent gros problèmes et des nuisances par la pollution de l'eau, de l'air et du sol comme conséquence de la position de la mine qui représente la partie culminante du village de Boukhadra, ce qui nécessite des solutions urgentes.

Les roches stériles de la mine de fer de Boukhadra proviennent généralement de la mine à ciel ouvert (la mine souterraine de Boukhadra produit très peu des stériles francs), ils sont constitués de calcaire, d'hématite, de marnes jaunes et grises.

Une caractérisation physico-chimique réalisée sur des échantillons représentatifs montre que les stériles francs de la mine de Boukhadra titrent d'une teneur moyenne de 20 % Fe_2O_3 .

L'analyse granulométrique d'un échantillon de 500 g de stériles francs de la mine de fer de Boukhadra concassé à 4 mm révèle que la tranche riche en fer est située entre -0,5 et 0,25 mm et qui offre 28 % Fe_2O_3 .

Des essais soumis à une Séparation Magnétique à Haute Intensité (SMHI) en voie sèche sur la même classe à des variations des intensités électriques de 3 à 12 Ampères montrent qu'à 12 Ampères, le concentré est de 40 % fer contre un rejet de calcaire et marnes.

Des échantillons représentatifs prélevés des eaux et des sols à proximité et en aval de la mine révèlent une forte contamination de l'eau par le fer dissous, probablement due au ruissèlement et à la lixiviation des déchets miniers.

Les échantillons testés sur les mesures de couleur (Rouge, Vert, Blue) par un traitement d'image et en faisant appel à l'application du logiciel Matlab montrent que la différence de couleur est significative. Ce qui nous permis de séparer les différentes catégories des roches selon leur couleur.

Enfin, seuls le séparateur magnétique et la trieuse optique peuvent faire l'objet d'une application industrielle pour une meilleure gestion environnementale et une revalorisation des

déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra. Les matériaux triés peuvent être utilisés au niveau de l'industrie cimentaires, de granulats, de peinture et de céramiques.

Références bibliographiques

A

Abdalla, M. A. M. (2010). Dressing Weakly Magnetic Iron Ores by Dry Magnetic Separation Process. Thèse de Doctorat. UOFK, 140 p.

Abosedo, O. A., et State, O. (2017). Review on heavy metals contamination in the environment, 4(1), pp. 1-6.

Adamiec, P., Benezet, J. C., et Benhassaine, A. (2005). Relation entre une cendre volante silico-alumineuse et son charbon, 15(3), pp. 35-46.

Afanga, K. (2014). Modélisation systémique des filières sidérurgiques en vue de leur optimisation énergétique et environnementale. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine – France, 151 p.

AGAR (Association Géologique d'Alès et de sa Région). Utilisation du calcaire, 3 p. <http://www.geolales.net/posters/Calcaire-2.pdf> (page consultée le : 12/06/2018)

Ajaka, E. O. (2009). Recovering fine iron minerals from itakpe iron ore process tailing. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4(9), pp. 17-28.

Alexis Mojica Abrego, M. (2007). Application des méthodes géophysiques à la détection des sites précolombiens dans la région centrale de Panama et paramétrisation géoarchéologique dans le site hispanique de Panama Viejo. Thèse de doctorat. Université de Paris 6 – France, 151 p.

Aoudjehane M. (1991): Distribution des gîtes à Pb-Zn et fer sidéritique dans le N-E algérien. In M. Pagel et J. Loroy (eds): Source, Transport and déposition of métal. Belkema, Rotterdam, pp. 419-422.

Aranguren, M. M. S. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers

Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III (France), 490 p.

Araújo, I. C. S., et Costa, M. C. G. (2013). Biomass and nutrient accumulation pattern of leguminous tree seedlings grown on mine tailings amended with organic waste. *Ecological engineering*, 60, pp. 254-260.

Artignan, D., et Cottard, F. (2003). Eléments à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM), BRGM-Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Economie, 48 p.

ArcelorMittal Annaba. (2011). Qualité Matières Premières. Rapport inédit, 2 p.

ArcelorMittal Tébessa. Mine de Boukhadra. Division Etudes et Développement. (2013). Méthode d'exploitation utilisée. Rapport inédit, 21 p.

ArcelorMittal Tébessa. Mine de Boukhadra. Division Etudes et Développement. (2012). Plan d'exploitation et de développement de la mine de Boukhadra Année 2012. Rapport inédit, 30 p.

ArcelorMittal Tébessa. Mine de Boukhadra. Division Etudes et Développement. (2012). Rapport géologique actualisé Année 2012. Rapport inédit, 20 p.

ArcelorMittal Tébessa. Mine de Boukhadra. Division Etudes et Développement. (2014). Rapport géologique actualisé Année 2014. Rapport inédit, 39 p.

ArcelorMittal Tébessa. Mine de Boukhadra. Division Etudes et Développement. (2011). Vue générale sur la mine de Boukhadra. Rapport inédit, 21p.

Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R.P., Julien, M., Belem, T., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. et Li, L. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. Congrès annuel de la Société Canadienne de Génie Civil, article No. GE-045, 1-10. Montréal, Québec - Canada.

Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., & Wilson, G. W. (2005). Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique

des haldes à stériles. In Proceedings of the Symposium sur l'Environnement et les Mines, Rouyn – Noranda, 39 p.

B

Bailey, B. L., Blowes, D. W., Smith, L., & Sego, D. C. (2016). The Diavik Waste Rock Project: Geochemical and microbiological characterization of low sulfide content large-scale waste rock test piles. *Applied Geochemistry*, 65, pp. 54-72.

Bamber, A. S. (2008). Integrated mining, preconcentration and waste disposal system for the increased sustainability of hard rock metal mining. Thèse de Doctorat. University of British Columbia, (Vancouver). 331 p.

Baumann E. (2011). Modèles d'évaluation des performances économique, environnementale et sociale dans les chaînes logistiques. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 244 p.

Ben Ammar, S. (2006). Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix des traitements adaptés dans les pays en développement : résultats de la caractérisation dans le grand Tunis : mise au point d'une méthode adaptée. Thèse de Doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 327 p.

Benchiheb, O. Drozdov, N. N, Atoui, L. (1999). Influence du minerai de fer barytique de Boukhadra sur les propriétés physico-chimiques des agglomérés d'El-Hadjar. Synthèse n° 5. Université Badji Mokhtar – Annaba, 7 p.

Bennet H. (1986). Concise chemical and technical dictionary, 4th enlarged, Van Norstrand, Edward Arnold. London.

Benselhoub, A., Kharytonov, M., Bounouala, M., Chaabia, R., and Badjoudj, S. (2015). Estimation of soil's sorption capacity to heavy metals in Algerian megacities: case of Algiers and Annaba. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 46(2), pp. 147-154.

Bertholon, J. (2002). Techniques Analytiques. Futura-sciences, pp. 1-10.

- Bertrand, C. (2010). Modélisation de la séparation magnétique de basse intensité sur tambours rotatifs: enrichissement du minerai Havre Saint-Pierre de Rio Tinto, Fer et Titane. Thèse de doctorat. Université Laval. Québec, 276 p.
- Bhatti, M. A., Kazmi, K. R., & Anwar, M. S. (2008). High intensity magnetic separation studies of low grade chromium ore. *Journal-chemical society of pakistan*, 30(1), 42 p.
- Bjerrum, N. (1936). *Bjerrum's Inorganic Chemistry*, (3rd Danish ed). London
- Blazy, P., (1970). Valorisation des minerais, PUF, Paris, pp. 249-253.
- Blazy, P., et Jdid, E. A. (2000). Flottation: Aspects pratiques. *Techniques de l'ingénieur. Technologies de l'eau*, 2(J3360), 22 p.
- Blazy, P., et jdid, E. A. (2000). Flottation: Mécanismes et réactifs. *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*, 3, J3350-1, 22 p.
- Bodénan, F., Guézennec, A. G., Beaulieu, M., Bellenfant, G., Lemièrre, B., Lerouge, C., & Save, M. (2015). Re-Processing of Mine Tailings: Discussion on Case Studies. In 13th SGA Biennial Meeting-Nancy (France), 4 p.
- Bouabida, H. (2014). Inventaire des moustiques de la région de Tébessa et bioactivité du spiromesifène sur la reproduction de *Culiseta longiareolata* et *Culex pipiens* : aspects écologique et biochimique. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba (Algérie), 172 p.
- Boudra, L., Delecroix, B., et Béguin, P. (2015). La prévention dans le green business à l'échelle des proximités territoriales Une question de performance globale pour les centres de tri des déchets d'emballages ménagers. 50^{ème}. SELF, 8 p.
- Bouzahzah, H. (2013). Modification et amélioration des tests statiques et cinétiques pour une prédiction fiable du drainage minier acide. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 276 p.
- Bouzenoune, A., et Lécolle, P. (1997). Petrographic and geochemical arguments for hydrothermal formation of the Ouenza siderite deposit (NE Algeria). *Mineralium Deposita*, 32(2), pp. 189-196.

BRGM. (1997). Les résidus miniers français : typologies et principaux impacts environnementaux potentiels. Rap. R39503, 83 p.

BRGM (2001). Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union, 79 p.

Broussaud, A. (1977). Critères d'évaluation des concentrés de minerais de fer. Bureau de recherches géologiques et minières, 32 p.

Broussaud, A. et Faby, J. P. (1978). Valorisation par séparation magnétique haute intensité du stérile de flottation de Chaillac (Inder). Bureau de recherches géologiques et Minières, 28 p.

Brožek, M. (1999). The physical model of magnetic separation in a plate separator. *Physical Separation in Science and Engineering*, 9(3), pp. 149-167.

Bunaciu, A. A., UdrișTioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), pp. 289-299.

C

Calmet D. (2014). La gestion durable de l'eau : les normes, un outil indispensable. Eau, Radioactivité et Environnement. Journées SFRP / Section Environnement, 6 p.

Carrières ZAGO (2013). Demande d'autorisation de renouvellement et d'extension d'une carrière de calcaire et d'exploitation des installations de traitement – Commune de Sabarat (09) – Cabinet Ectare – Réf. 94441, pp. 281-297

Castro-Gomes, J. P., Silva, A. P., Cano, R. P., Suarez, J. D., et Albuquerque, A. (2012). Potential for reuse of tungsten mining waste-rock in technical-artistic value added products. *Journal of Cleaner Production*, 25, pp. 34-41.

Charbonneau, P. (2014). Analyse des pratiques de valorisation des rejets miniers. Thèse de Doctorat, 75 p.

Chaturvedi, N., Patra H. K. (2016). Iron Ore Mining, Waste Generation, Environmental Problems and Their Mitigation through Phytoremediation Technology. *Ijsrm*. Vol. 5 (1), pp. 397-420.

Chouchane, T., Chouchane, S., Boukari, A., Balaska, A., & Bendjama, A. (2013). Impact des rejets liquide sur les eaux de l'oued Meboudja, Annaba NE Algérie. In the 4th International Congress Water, Waste & Environment (EDE4) Agadir, Morocco, 11 p.

C.N.T.P.P "Centre National des Technologies de Production plus Propre", (2014), ArcelorMittal Tébessa, mine de fer de Boukhadra. Rapport, 48 p.

Commission Européenne. (2009). Gestion des résidus et stériles des activités minières. Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, 632 p.

Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement. (1989). Notre avenir à tous, Les Editions du Fleuve, 432 p.

Collon, P. (2003). Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL (France), 248 p.

Corrans, I. J., et Svoboda, J. (1985). Magnetic Separation in South Africa. *Physical Separation in Science and Engineering*, 1(4), pp. 205-232.

D

Da Gama, C. D. (2013). Easy profit maximization method for open-pit mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5), pp. 350-353.

Daoudi R., Kukensha V. (2013). Utilization of optical sorting technique in the phosphate industry. Symposium Sheraton Sand Key, Clearwater, Florida, 9 p.

Darmane, Y., (2008). Valorisation et traitement de rejets miniers : Cas de la mine d'Imini et la mine de Jerada. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences de Kénitra. (Maroc).

- Das, A., et Roy, S. (2007). *Magnetic Separation-Principles and Application in Beneficiation of Iron Ores*, pp. 89-102.
- Davies B. E. (1987). *Consequences of environmental contamination by lead mining in Wales*. *Hydrobiologia*. University of Bradford, England (149), pp. 213-214.
- Deb, P. K. (2014). *An Introduction to Mine Hydrogeology*. Springer International Publishing, 58 p.
- Degaïchia, A., et Laouar, R. (2013). *Sédimentologie et paléoenvironnements du Pliocène du fossé d'effondrement de Tébessa (Atlas saharien oriental, Algérie)*. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 24(3), pp. 189-207.
- Del Villar R., (2010). *Compléments de minéralurgie (GMN-7008)*, Québec : Université Laval. Québec
- Derias, T. (2013). *Hydrogéologie du bassin versant de l'Oued Ksob (Tébessa): vulnérabilité et protection de la ressource*. Thèse de Doctorat, 153 p.
- Dermont, G. (2008). *Sols pollués par les métaux lourds résultant de l'enfouissement de déchets industriels (Montréal, Canada): Géochimie, spéciation des métaux, et décontamination par flottation*. Thèse de Doctorat, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, 435 p.
- Deverly, F. (1984). *Echantillonnage et géostatistique*. Thèse de Doctorat, 163 p.
- Dey, S., Mohanta, M. K., Goswami, M. C., et Pani, S. (2014). *Recovery of iron values from waste manganiferous iron ore fines for pellet making*. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2(05), 513 p.
- Dhaou-El-Djabine, K. (2005). *Évaluation et comportement des métaux lourds (Cd–Cr–Cu–Ni–Pb–Zn et Mn) dans les sols à vocation agricole et à végétation naturelle soumis à une pollution atmosphérique (El-Hadjar–Annaba–Est Algérien). Influence de la végétation sur la dynamique de ces métaux*. Thèse de doctorat en écologie–Pédologie. Université de Constantine (Algérie), 76 p.
- Djemaci, B. (2012). *La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité*, Thèse de Doctorat. Université de Rouen, 392 p.

Dnipropetrovsk. UNM. (2013). Procédés et machines de traitement des minéraux utiles. Université Nationale des Mines, 114 p.

Drzymala, J. (2007). Mineral processing. Foundation of Theory and Practice of Metallurgy. Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław, 510 p.

Dumont, M. (2008). Minerai de fer. Annuaire des minéraux du Canada, 11 p.

Duport, O. (2012). Minerai de fer, l'émergence d'une nouvelle commodité sur les marchés financiers. Thèse de Doctorat. Haute école de gestion de Genève, 57 p.

Dworzanowski, M. (2010). Optimizing the performance of wet drum magnetic separators. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110(11), pp. 643-653.

E

Elluin, M., et Host, S. (2005). Evaluation et gestion de l'exposition au baryum. Ecole Nationale de la santé publique, 71 p.

Environnement Canada (2002). Guide d'échantillonnage des sédiments du Saint-Laurent pour les projets de dragage et de génie maritime. Volume 2 : Manuel du praticien de terrain. Environnement Canada. Direction de la protection de l'environnement, Région du Québec, Section innovation technologique et secteurs industriels. Rapport, 107 p.

EPA (Environmental Protection Agency). (2000). EPA's Terms of Environment. Environmental Protection Agency. USA.

Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., et Newman, A. (2013). MineLib: a library of open pit mining problems. Annals of Operations Research, 206(1), pp. 93-114.

Evdokimov, S. I., Maslakov, M. P., et Evdokimov, V. S. (2016). Construction Materials Based on Wastes from Mining and Metallurgical Industries. Procedia Engineering, 150, pp. 1574-1581.

F

Falbe J, Regitz M. (1996). Roempp Chemie-Lexikon. George Thieme, Weinheim.

Fitzpatrick, R. (2008). The development of a methodology for automated sorting in the minerals industry. Thèse de Doctorat. University of Exeter.

G

Gadri L. (2012). Etude de la déformation et de la rupture des massifs fissurés par la méthode des éléments finis (Cas de la mine souterraine de Boukhadra). Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba (Algérie), pp.172.

Gadri, L., Boumazbeur, A., Nouioua, I., Boukeloul, M., Hamdane, A., Mouici, R., Mebrouk, F., et Ibrahim, H., (2012). Study of fractured rock masses deformation in Boukhadra (Tebessa) underground mine empirical and numerical approach (NE Algeria). Journal of Geology and Mining Research, 4(2), pp. 23-34.

García, R., & Báez, A. P. (2012). Atomic absorption spectrometry (AAS), 13 p.

Ghorbel, M. (2012). Contamination métallique issue des déchets de l'ancien site minier de Jebel Ressay: modélisation des mécanismes de transfert et conception de cartes d'aléa post-mine dans un contexte carbonaté et sous un climat semi-aride. Evaluation du risque pour la santé humaine. Thèse de doctorat. Université de Tunis El Manar et Université de Toulouse), 231 p.

Gomes, R. B., Tomi, G. D., et Assis, P. S. (2015). Impact of quality of iron ore lumps on sustainability of mining operations in the Quadrilatero Ferrifero Area. Minerals Engineering, 70, pp. 201-206.

Gosselin, A., Blackburn, D., et Bergeron, M. (1999). Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques. Canada, 148 p.

Gouin, J. (2008). Mode de genèse et valorisation des minerais de type black shales: cas du Kupferschiefer (Pologne) et des schistes noirs de Talvivaara (Finlande). Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 358 p.

Grant R, Grant C. (1987). Grant and Hackh's Chemical Dictionary. McGraw-Hill, New York, 641 p.

Guézennec, A. G., Bodénan, F., Bertrand, G., Fuentes, A., Bellenfant, G., Lemièrre, B., et Save, M. (2013). Re-processing of mining waste: an alternative way to secure metal supplies of European Union. In REWAS 2013, pp. 231-237.

Guerba Hadjira. (2014). Synthèse et caractérisation de nouveaux matériaux mésoporeux de type SBA-15 à propriétés texturales et structurales contrôlées. Application dans la réaction d'oxydation totale de CO et d'époxydation d'éthylène. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas –Sétif-1. (Algérie), 177 p.

H

Hadj, S. (2011). Chapitre II ; Le ciment Portland, 6 p.

Hakkou, R., Benzaazoua, M., et Bussière, B. (2016). Valorization of phosphate waste rocks and sludge from the Moroccan phosphate mines: Challenges and perspectives. Procedia Engineering, 138, pp. 110-118.

Halimi F. (2008). Etude géologique et géostatistique du gisement de Fer de Châabet El Ballout –Souk Ahras- (N-E Algérien). Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar-Annaba, 110 p.

Heyrendt, L. (2012). Études des actions des forces magnétiques volumiques créées par un champ magnétique intense sur des fluides à seuil-possibilités de transition solide-gel. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 187 p.

Hitch, M., Ballantyne, S. M., et Hindle, S. R. (2010). Revaluing mine waste rock for carbon capture and storage. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 24(1), pp. 64-79.

I

IBGE "Interface Santé et Environnement". (2002). Intoxication aux métaux lourds. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement, 7 p.

Idres, A., Abdelmalek, C., Bouhedja, A., Benselhou, A., & Bounouala, M. (2017). Valorization of mining waste from Ouenza iron ore mine (eastern Algeria). *REM-International Engineering Journal*, 70(1), pp. 85-92.

Itard Y., Bosc R. (2001). Traitements et préventions des drainages acides provenant des résidus miniers. *Revue bibliographique. BRGM/RP-50829-FR*, 85 p.

J

Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British medical bulletin*, 68(1), pp. 167-182.

Jeannot R., Lemièrre B., Chiron S. (2000). Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. *Rap. BRGM R 50128*. 110 p.

Jiang, L., Xue, Q., et Liu, L. (2015). Evaluation of the potential release of phosphorus from phosphate waste rock piles in different environmental scenarios. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), pp. 597-607.

Junca, E., de Oliveira, J. R., Espinosa, D. C. R., et Tenório, J. A. S. (2015). Iron recovery from the waste generated during the cutting of granite. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(2), pp. 465-472.

K

Kadouche, S. (2006). Utilisation des biomatériaux dans le traitement des eaux. Thèse de Doctorat. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou (Algérie), 176 p.

Kortum, E., et Bozsoki, K. (2007). Le réseau mondial pour la santé au travail, (12), pp. 1-20.

L

Laganière, D. (2000). Caractérisation, stabilisation et valorisation des phosphogypses marocains. 153 p.

- Lamontagne, A. (2001). Étude de la méthode d'empilement des stériles par entremêlement par couches pour contrôler le drainage minier acide. Thèse de Doctorat. Université Laval, 345 p.
- Le Goff, A. (2011). Contrôle et diagnostic par un réseau de capteurs magnétiques en automobile. Thèse de doctorat, Grenoble – France, 187 p.
- Le Gressus, C. (1995). Microscopie électronique à balayage. Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation, 24 p.
- Li, Y., Wang, J., Wang, X., Wang, B., et Luan, Z., (2011). Feasibility study of iron mineral separation from red mud by high gradient superconducting magnetic separation. *Physica C: Superconductivity*, vol. 471, no 3, pp. 91-96.
- Ligus, G. (2012). Municipal waste management model with the use of optical sorting elements. *Chemik*, 66, pp. 1229-1234.
- Livingstone Smith, A., et de Maret, P. (2000). Chaîne opératoire de la poterie: références ethnographiques, analyses et reconstitution, 461 p.
- Liu, H., Probst, A. et Liao, B., (2005). Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Science of the Total Environment*, 339(1-3), pp. 153-166.
- Longhi, M. A., Rodríguez, E. D., Bernal, S. A., Provis, J. L., et Kirchheim, A. P. (2016). Valorization of a kaolin mining waste for the production of geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 115, pp. 265-272.
- Lottermoser, B. G. (2007). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, Springer, Berlin, London; 408 p.
- Lottermoser, B. G. (2011). Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes. *Elements*, 7(6), pp. 405-410.
- Lutandula, M. S., et Maloba, B. (2013). Recovery of cobalt and copper through reprocessing of tailings from flotation of oxidised ores. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), pp. 1085-1090.

M

Machault, J., Barbanson, L., Augé, T., Bailly, L., Felicio, A., et Orgeval, J. J. (2012). Paramètres minéralogiques et microtexturaux utilisables dans les études de traçabilité des minerais métalliques (Doctoral dissertation, Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université d'Orléans, 388 pp.

Mahlangu, T., Moemise, N., Ramakokovhu, M. M., Olubambi, P. A., et Shongwe, M. B. (2016). Separation of kimberlite from waste rocks using sensor-based sorting at Cullinan Diamond Mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(4), pp. 343-347.

Mahurpawar, M. (2015). "Effects of heavy metals on human health." *Int. J. Res. Granthaalayah*, pp. 1-7.

Maizières-Lès-Metz. (1967). *Recherches sur la flottation des minerais de fer*, 84 p.

Manmit, R. et Chinmay, K., P. (2007). Optimization of blasting parameters in opencast mines. National Institute of Technology. Thèse de Doctorat, 79 p.

McCarthy, B. (2014). *Ore sorting, Johannesburg, South Africa*, 27 p.

MDDEP (2002). *Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction*. Québec, 49 p.

Mehasni, R. (2007). *Élaboration de modèles de calcul de dispositifs à induction électromagnétique: application à un système de séparation magnétique dans les milieux particuliers*. Thèse de docteur. Université Mentouri - Constantine (Algérie), 121 p.

Mehernosh, T. Vatcha. (1996). *Grade distribution at the whistle mine (sudbury, ontario) with applications to ore sorting*. Laurentjan University. Sudbuy, Ontario, Canada. p.111.

Mellal, F. (2009). *Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda/Khemis Miliana*. Mémoire de Magister, 144 p.

Mermillod-Blondin, R. (2005). Influence des propriétés superficielles de la pyrite sur la rétention de molécules organiques soufrées: application à la désulfuration des résidus miniers. Thèse de Doctorat. Vandoeuvre-les-Nancy, 308 p.

Merriam. (1976). 3rd New International Dictionary. Chicago. USA

Metso. (2015). Basics in mineral processing. Edition 10, 354 p.

Mériaux, S. (1954). Contribution à l'étude de l'analyse granulométrique. Institut National de la Recherche Agronomique, Université de Paris (France), 125 p.

Mijno, V. (2007). Modifications de la composition de déchets métallifères, miniers et industriels, stabilisés par liants hydrauliques et soumis à des tests de lixiviation. Thèse de doctorat, Limoges, 225 p.

Ministère de l'Energie et des Mines. Direction générale des mines. Bilan des activités minières 2009. (2010). Direction générale des mines. (Algérie), 104 p.

Ministère de l'industrie et des mines. Direction générale des mines. (2015). Potentiel minéral de l'Algérie, (Algérie), pp. 19.

Mlayah, A., Yoshida, M., Charef, A., Noronha, F., da Silva, E. F., et Patinha, C. (2005). Impact des rejets miniers et domestiques sur la qualité des sédiments et des eaux de l'oued Mellègue (Nord-Ouest de la Tunisie): diagnostic des métaux lourds, pp. 621-625.

Murphy, B., van Zyl, J., et Domingo, G. (2012). Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation. In Narrow vein mining conference, pp. 26-27.

N

Nait Merzoug Assia. (2014). Cheminement du Sélénium dans l'est Algérien. Thèse de doctorat. Université Constantine 1. Algérie, 152 p.

Narrei, S., et Osanloo, M. (2015). Optimum cut-off grade's calculation in open pit mines with regard to reducing the undesirable environmental impacts. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 29(3), pp. 226-242.

O

O. P. S. "Organización Panamericana de la Salud". (1987). Guías para la Calidad del Agua Potable. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Publicación científica 506. Washington (USA), 350 p.

Oshitani, J., Ohnishi, M., Yoshida, M., Franks, G. V., Kubo, Y., & Nakatsukasa, S. (2013). Dry separation of particulate iron ore using density-segregation in a gas–solid fluidized bed. *Advanced Powder Technology*, 24(2), pp. 554-559.

P

Pastore, E. L. (2003). Impacts de recouvrements de résidus organiques sur des résidus miniers réactifs. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(3), pp. 269-277.

Perthuisot, V., Aoudjehane, M., Bouzenoune, A., Hatira, N., Laatar, E., Mansouri, A., et Thibieroz, J. (1998). Les corps triasiques des monts du Mellegue (confins algero-tunisiens); sont-ils des diapirs ou des " glaciers de sel " ?. *Bulletin de la Société géologique de France*, 169(1), pp. 53-61.

Pete, P., (2010). Introduction to energy-dispersive x-ray fluorescence (XRF)—an analytical chemistry perspective. Department of Chemistry & Biochemistry San Francisco State University. Creative Commons Attribution - ShareAlike, 3, 79 p.

Pey, B. (2010). Contribution de la faune du sol au fonctionnement et à l'évolution des Technosols. Thèse de Doctorat. Vandoeuvre-les-Nancy, 304 p.

Peyssonnaud, C. (2015). Le fer dans la santé humaine. CNRS. Equipe "Hypoxie et homéostasie du fer", 30 p.

Proulx, M. (2001). Amélioration du rendement des particules grossières par la stratégie d'addition des réactifs dans un banc de flottation. Université Laval, 171 p.

Q

R

Rajeswari, T. R. et sailaja. N. (2014). Impact of heavy metals on environmental pollution, (3), pp. 175-181.

Robert, M. (1982). Conception et réalisation d'un granulomètre à sédimentation. Thèse de Doctorat, 102 p.

Rouaiguia, I., Bounouala, M., Abdelmalek, C., et Idres, A. (2017). Valorization of waste rocks from boukhadra iron ore mine for better environmental management. Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk, (6), pp. 60-67.

Rout, M., et Parida, C. K. (2007). Optimization of blasting parameters in opencast mines. Thèse de Doctorat, 79 p.

Ruault-Djerrab, M., et Khechid-Benkherouf, F. (2012). Biostratigraphie et paléoenvironnements du crétacé supérieur du SE constantinois (monts des Hamimats, Tébessa et Mellègue), à partir de l'étude de la faune et de la microfaune, Thèse de Doctorat, 276 p.

S

Salvarredy Aranguren, M. M. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique, 489 p.

Sami, L., et Kolli, O. (2011). Caractérisation géochimique des minéralisations à Pb-Zn, F, Ba, Cu, Fe et Hg des confins Algéro-tunisiens. Thèse de Doctorat, 180 p.

Samson, W. K. (2009). Dépollution et valorisation des rejets miniers sulfurés du Katanga : cas des tailings de l'Ancien Concentrateur de Kipushi. Université de Liège, 276 p.

Seghir, K. (2008). Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien). Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba (Algérie), 151 p.

Singh, R., Bhattacharyya, K. K., & Maulik, S. C. (1997). Gravity concentration of fines and ultrafines. , pp. 40-56.

Streit, B. (1994). Lexikon der Okotoxikologie.-VCH Verl., 901 p.

Suhasaria, A., et Pathak, K. (2012). Application of Colour Based Ore Sorting through Image Processing. Department of Mining Engineering, Kharagpur, 6 p.

Svoboda, J. (1987). Magnetic methods for the treatment of minerals. Elsevier Science Publishers, P. O. Box 330, 1000 AH Amsterdam, the Netherlands, (also Inc., P.O. Box 1663, Grand Central Station, New York, N.Y. 10163, U.S.A.), 712 p.

T

Taylor, H.K. (1972). General background theory of cutoff grades, Trans. Inst. Mining Met., Sec. A, vol. 81, 8 p.

Tilmatine, A., Flazi, S., Medles, K., Ramdani, Y., et Dascalescu, L. (2004). Séparation électrostatique: complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels. Journal of electrostatics, 61(1), pp. 21-30.

Tomas, F. (1970). Les mines et la région d'Annaba. Revue de géographie de Lyon, 45(1), pp. 31-59.

U

V

Van Nostrand R. (1964). Van Nostrand International Encyclopedia of Chemical Science. Van Nostrand, New Jersey.

Vega, J. M. D. (2012). Apport des modèles géo-métallurgiques et de la catégorisation des ressources à la définition de la fosse ultime d'une mine à ciel ouvert: Application à la mine de cuivre de Mantos de la Luna au Chili. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – France, 204 p.

Vignes, J. L., et Jehanne, Y. (2003). L'hydrométallurgie. Bulletin de l'Union des physiciens, (857), pp. 1281-1299.

Von Ketelhodt, F., et Vollmar, L. G. (2013). Beneficiation of Witwatersrand type gold ores by means of optical sorting. Thèse de Doctorat, 94 p.

Von Ketelhodt, L. (2009). Viability of optical sorting of gold waste rock dumps. In World Gold Conference, pp. 271-278.

W

Wills, B.A. (1992). 'Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery' 5th Edition, Pergamon Press. Camborne School of Mines, Cornwall, UK, 450 p.

x

y

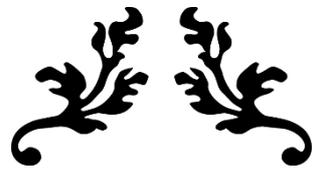
Yellishettya M., Mudd G., Mason L., Mohr S., Prior T., et Giurco D., (2012). Iron resources and production: technology, sustainability and future prospects. Department of Civil Engineering, Monash University, 60 p.

Yellishetty, M., Ranjith, P. G., et Kumar, D. L. (2009). Metal concentrations and metal mobility in unsaturated mine wastes in mining areas of Goa, India. Resources, Conservation and Recycling, 53(7), pp. 379-385.

Z

Zhang, H., Chen, L., Zeng, J., Ding, L., et Liu, J. (2015). Processing of Lean Iron Ores by Dry High Intensity Magnetic Separation. *Separation Science and Technology*, 50(11), pp. 1689-1694.

Zoran S. M., Zoran S., Radoje P. et Florian K. (2015). Sustainable mining waste management in bor basin. Serbia, 11 p.



ANNEXE



Annexe A

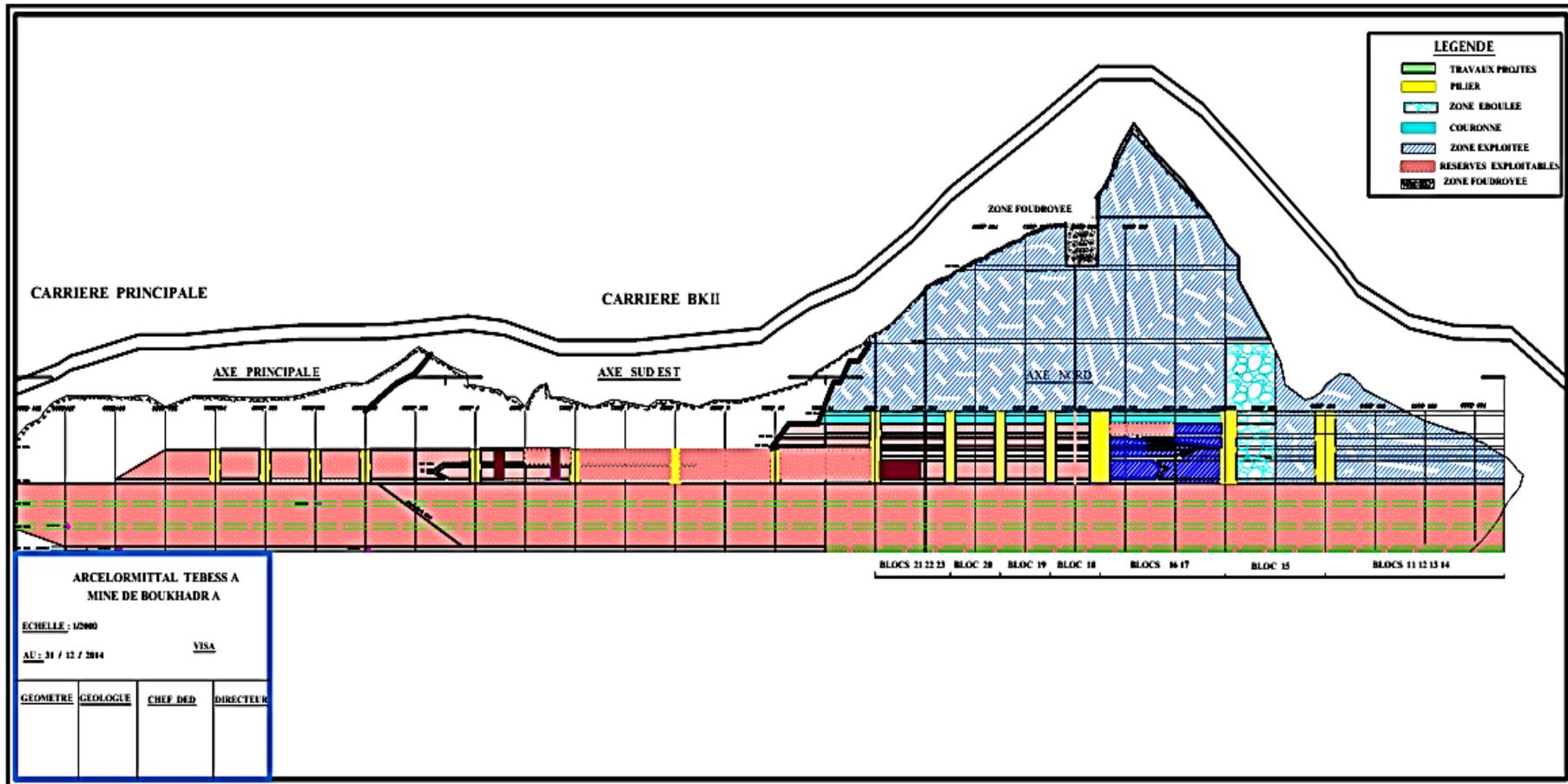


Figure i. Coupe longitudinale de la mine de Boukhadra

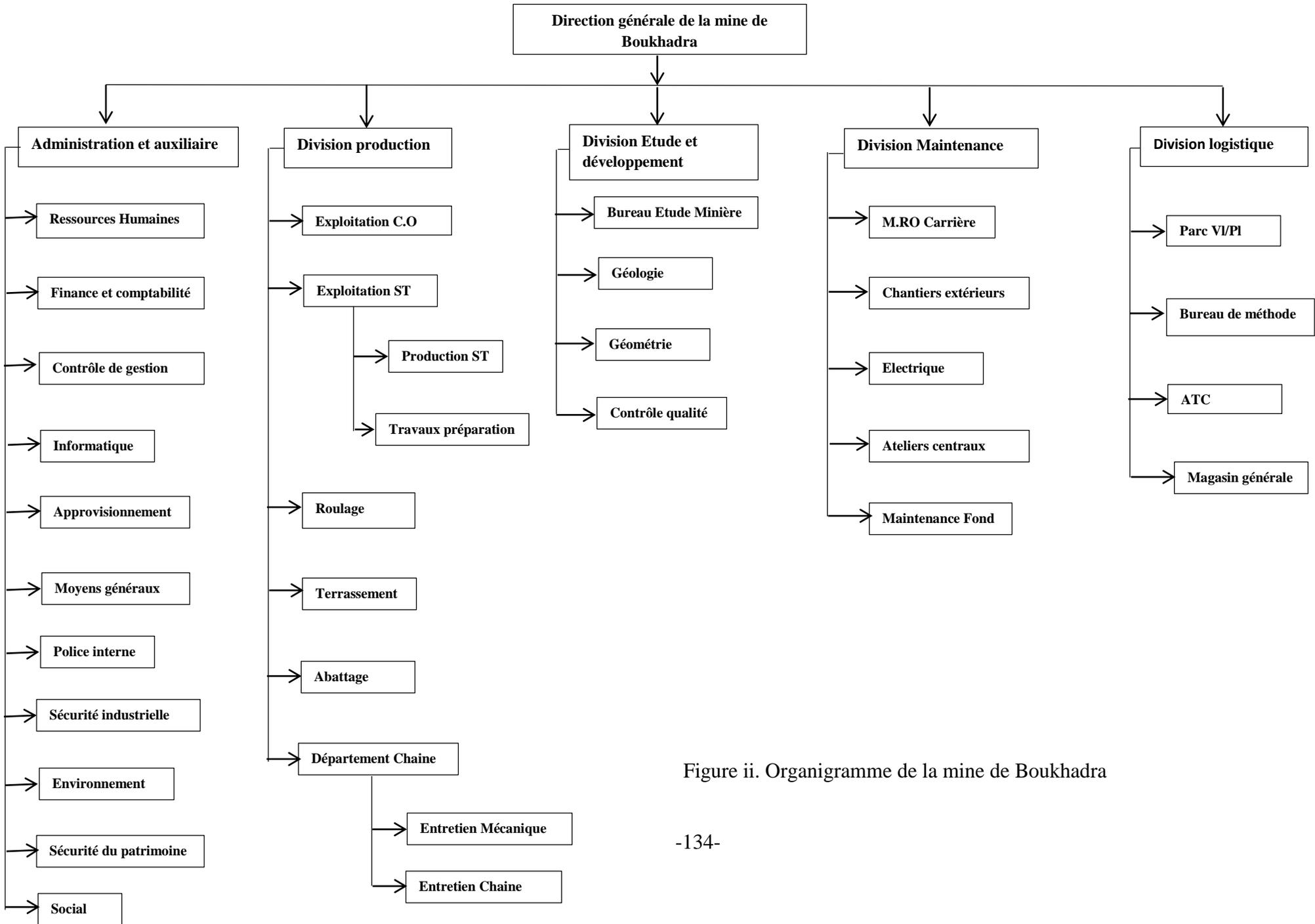


Figure ii. Organigramme de la mine de Boukhadra

Annexe B



Figure iii. Diviseur



Figure iv. Concasseur à mâchoire



Figure v. Broyeur à boulet



Figure vi. Balance électronique



Figure vii. Microscope optique



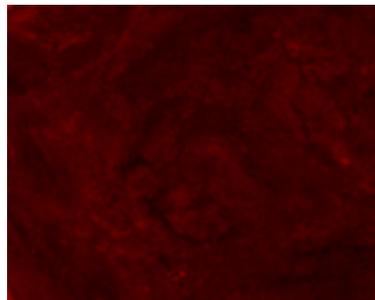
Figure viii. Tamis

Annexe C

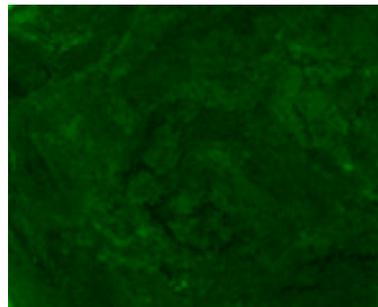
image name.jpg



Moy de R image name.jpg =61.120226



Moy de G image name.jpg =51.514854



Moy de B image name.jpg =42.193824

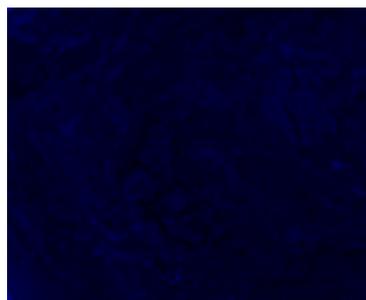
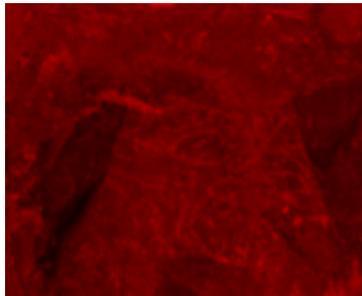


Figure ix. Traitement de l'image du minerai de fer par Matlab

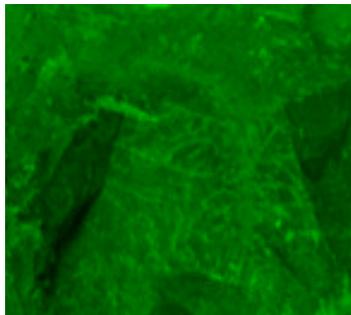
image name.jpg



Moy de R image name.jpg =97.947174



Moy de G image name.jpg =97.032555



Moy de B image name.jpg =84.863245

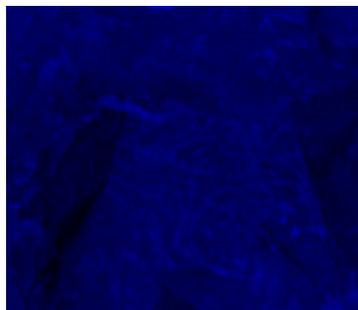
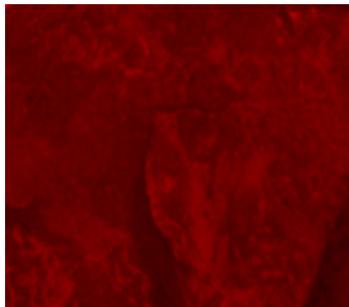


Figure x. Traitement de l'image de calcaire par Matlab

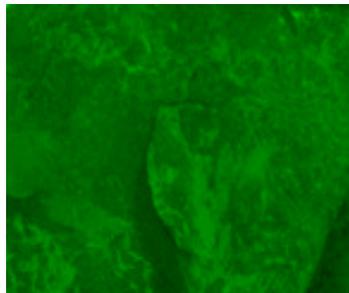
image name.jpg



Moy de R image name.jpg =100.711302



Moy de G image name.jpg =103.534454



Moy de B image name.jpg =89.026915

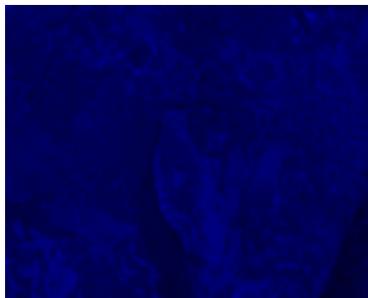
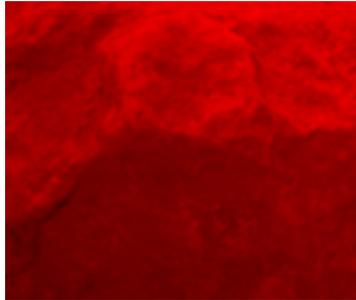


Figure xi. Traitement de l'image de marne grise par Matlab

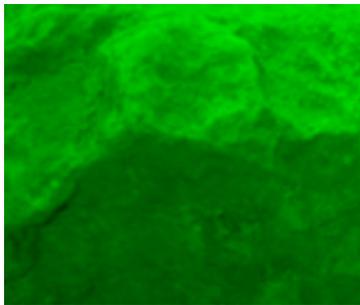
image name.jpg



Moy de R image name.jpg =149.788865



Moy de G image name.jpg =130.748660



Moy de B image name.jpg =87.569578

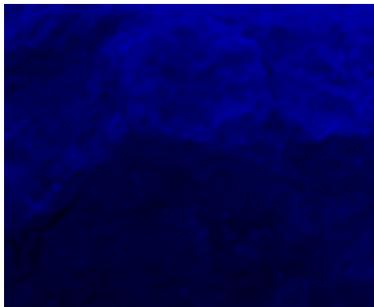


Figure xii. Traitement de l'image de marne jaune par Matlab

La mine de Boukhadra utilise une méthode d'exploitation minière combinée (à ciel ouvert et souterraine) caractérisée par un relief montagneux. Elle exploite le minerai de fer de type hématite avec une teneur moyenne de 50 % par contre, elle génère annuellement des milliers de tonnes de déchets miniers en roches stériles qui sont déposés à proximité du village minier situé en aval de la mine. Cependant, ces rejets miniers peuvent



nuire à l'environnement et en particulier à la santé humaine, ce qui nécessite des solutions urgentes. Pour résoudre ce problème environnemental, une gestion intégrée par la valorisation des déchets miniers est exigée d'une part à réduire le volume des stocks et d'autre part à minimiser leurs impacts environnementaux. Les travaux menés sur les déchets miniers de fer de Boukhadra ont permis de déduire que les stériles francs sont constitués de calcaire, d'hématite, de marnes grises et jaunes, d'une teneur moyenne de 20 % en Fe_2O_3 . En se basant sur les propriétés physiques de ces déchets miniers, la susceptibilité magnétique a été prise en compte pour l'enrichissement des minéraux de fer faiblement magnétiques par séparation magnétique à haute intensité en voie sèche (SMHI). Lors de la séparation, nous avons tenu compte de la granulométrie et de l'intensité du courant électrique. Le procédé par SMHI nous a permis d'une part la récupération d'un produit commercialisable et d'autre part, les rejets issus de la séparation magnétique peuvent être utilisés dans d'autres domaines tels que les cimenteries, les céramiques, matériaux de construction, etc. En outre, et selon les caractéristiques naturelles des déchets, nous préconisons la valorisation des déchets miniers par tri optique qui se base sur la différence de couleur (RVB) des minéraux à séparer en utilisant trois (3) trieurs optiques équipés de caméras couleurs. Le procédé suggéré est très efficace, il permet de récupérer des particules de taille supérieure à 10 mm et il génère par conséquent peu de poussière. De ce fait, la valorisation et la gestion intégrée des déchets miniers sont les préoccupations majeures d'un développement durable de l'industrie minière Algérienne.



http://www.outotec.com/globalassets/newsletters/minerva/2017-02/minerva_2-2017_bresortine_fieure1.jpg