



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Minier

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

M^{elle} IZERRADEN Hadjila

Thème

*Les rejets de l'exploitation du minerai de fer de
la mine de Boukhadra*

Soutenu devant le jury composé de:

Président : M^r B. AYADEN

M.A.A

U.A.M.B

Promoteur: M^{me} N. BOUZIDI

M.C.A

U.A.M.B

Examineur : M^r S.BOUABDELLAH

M.C.B

U.A.M.B

Année Universitaire: 2019-2020

Au nom du dieu le clément le miséricordieux

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mon très cher père, qui me nourrit toujours de ses sages conseils.

Ma très chère mère, celle qui m'apporte toujours sans condition son amour.

Mon fiancé qui ma aider beaucoup dans ce travail

Mes chers frères, qui me soutiennent toujours.

Toute ma grande famille IZERRADEN.

Tous mes professeurs.

Tous mes amis à ma région.

Tous mes amis à l'université.

Remerciements

*Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé
la puissance et la volonté pour achever ce travail,*

En second lieu, Je tiens à remercier mon encadreur Mme N. Bouzidi,

*Le président et membre du Jury qui ont accepté d'être nos
examineurs,*

*Tous les Enseignants qui nous ont guidés durant notre formation
universitaire.*

SOMMAIRE

Sommaire :

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	xi
Introduction générale	01

Chapitre I : Le minerai de fer de Boukhadra

I.1. Introduction	03
I.2. Contexte géologique de la région de Tébessa	03
I.3. Présentation de la mine de Boukhadra.....	04
I.3.1. Localisation géographique	04
I.3.2. Historique de l'entreprise	06
I.3.2.1. Historique de la mine	06
I.4. Géologie régionale de Boukhadra	06
I.5. Réserves du gisement	10
I.6. Minéralisation du gisement	12
I.6.1. Caractéristiques du gisement	12
I.7. Méthodes d'exploitations	12
A. Ciel ouvert	12
B. Souterrain	14
I.8. Production planifiée de la mine de Boukhadra	15
I.9. Nature du minerai exploité	16

I.10. Le minerai de fer	16
I.10.1. Différents type du minerai de fer	18
I.10.2. Production du minerai de fer dans le monde	22
I.10.3. Marché du minerai de fer	25
I.10.3.1. Prix	25
I.10.4. Ressources minérales en Algérie	25
I.10.5. Production des minerais de fer en Algérie	26
I.10.6. Géochimie	29
I.10.7. Minéralogie	29
I.10.8. Utilisations	29
I.11. Conclusion	30

Chapitre II : Les différents rejets de la phase exploitation jusqu'à la phase de traitement

II.1. Introduction.....	31
II.2. Cycle de vie d'une mine.....	31
II.3. Notion sur les déchets	32
II.3.1. Définition	32
II.3.2. Types de déchets	32
II.4. Les déchets miniers	32
II.4.1. Types déchets miniers	33
II.4.2. Nature et caractéristiques des résidus miniers	35
II.5. Impacts environnementaux des déchets miniers	36
II.5.1. Type de pollution (classification selon la répartition géographique)	36

II.5.2. Pollution due à l'exploitation minière	37
II.5.3. Pollution due aux installations de gestion des résidus	37
II.5.4. Pollution des sols par les métaux issus des déchets solides	37
II.5.5. Le drainage minier	38
II.6. Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra	39
II.7. Les modes de gestion des stériles et des résidus miniers	41
II.7.1. Stériles miniers	42
II.7.2. Résidus minier	43
II.8. Les différentes opérations génératrices des déchets	46
II.8.1. L'exploitation minière	46
II.8.2. Traitement des minerais	46
II.8.2.1. La communtion	47
II.8.2.2. La concentration	48
II.10. Conclusion	50

Chapitre III : Caractérisations physico chimiques du minerai et du rejet de traitement

III.1. Introduction	51
III.2. Intérêt de la caractérisation physico chimique	51
III.3. L'échantillonnage	52
III.3.1. Définition	52
III.3.2. Types d'échantillonnage	52
III.3.2.1. Echantillonnage géologique	52

III.3.2.2. Echantillonnage minier	52
III.3.3. Types d'échantillon	52
III.3.3.1. L'échantillon ponctuel	52
III.3.3.2. L'échantillon composite	53
III.3.4. Protocole de l'échantillonnage du minerai de fer et de stérile franc de Boukhadra	54
III.3.4.1. Protocole de l'échantillonnage du minerai de fer de Boukhadra ...	54
III.3.4.2. Protocole de l'échantillonnage du stérile franc de Boukhadra	54
III.3.5. Prélèvement des échantillons sur le site	55
III.4. Caractérisation physico-chimique du minerai de fer de Boukhadra et du rejet	57
III.4.1. Préparation des échantillons pour l'analyse	57
III.4.1.1. Le Concassage	57
III.4.1.2. Quartage	58
III.4.1.3. Analyse granulométrique	59
III.4.2. Analyse qualitative du minerai et du rejet de traitement par diffraction des rayons X	61
III.4.3. Analyse du minerai et du rejet de traitement par Microscope Electronique à Balayage	63
III.4.4. Analyse granulo-chimique du minerai et du rejet	66
III.4.4.1. Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra	68
III.4.5. Analyse par SAA des stériles francs de la mine de Boukhadra	69
III.5. Conclusion	70
Conclusion générale	71
Référence bibliographique	72
Resumé.....	xiv

Liste des figures

Figure I.1: Tébessa dans l'Atlas Saharien oriental	04
Figure I.2: Situation Géographique la Région de Boukhadra (Tébessa)	05
Figure I.3: Localisation de la mine de Boukhadra	05
Figure I.4: Colonne stratigraphique synthétique des monts de mellègue	09
Figure I.5 : Morphologie du gisement de Boukhadra	10
Figure I.6: Représentation 3D – Boukhadra	11
Figure I.7: Principaux pays producteurs de minerai de fer (en Mt)	22
Figure I.8 : Carte de répartition des principaux gisements en Algérie (Ministère de l'Industrie et des Mines, 2015)	26
Figure 1.9: Carte des gisements de fer en Algérie (Tirée de la carte du potentiel minéral en Algérie, ORGM, 2001)	27
Figure I.10 : Principaux flux de minerai de fer à travers le monde en 2009.....	28
Figure I.11: Utilisations du minerai de fer à l'échelle mondiale, en 2018.....	30
Figure II.1 : Déroulement d'une opération minière	31
FigureII.2: Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants (BRGM, 1997)	34
Figure II.3: Étapes de la concentration du minerai.....	35
Figure II.4 : Le drainage minier (Collon, 2004)	38
Figure II.5 : Conséquences du drainage minier acide à Carnoulès, Gard	39
Figure II.6: Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra.....	40
Figure II.7: Vue générale sur le site minier de Boukhadra.....	41
Figure II.8 : Stockages des stériles	43
Figure II.9 : Techniques de construction de digues à résidus miniers	45
Figure II.10 : Mine à ciel ouvert de cuivre-plomb-zinc de Las Cruces, en Espagne.....	46
Figure II.11: Broyeur à boulets de la mine	48
Figure II.12 : Cellules de flottation de l'ancienne usine de traitement de la mine d'or du Bourneix, Haute-Vienne	49
Figure III.1: Organigramme de préparation et caractérisation physico-chimique d'un minerai	53
Figure III.2 : Protocole d'échantillonnage des stériles francs de Boukhadra	55
Figure III.3: Points de prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de	

Boukhadra.....	56
Figure III.4: Concasseur à mâchoire à double effet de laboratoire	58
Figure III.5: Opération de quartage	58
Figure III.6: Tamiseuse de marque RETSCH	59
Figure III.7: Courbe de distribution granulométrique d'un échantillon des stériles francs de Boukhadra	60
Figure III.8 : Vue en détail du porte échantillon et tête goniométrique avec le tube RX, fentes programmables et détecteur	61
Figure III.9: Schéma du trajet optique des rayons X en mode goniométrique	62
Figure III.10: Analyse par DRX d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra	63
Figure III.11: Microscope Electronique à Balayage.....	63
Figure III.12: 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.....	64
Figure III.13 : Vue à la loupe binoculaire de la classe -1 + 0,5 mm.....	65
Figure III.14: Vue à la loupe binoculaire de la classe -0,5 + 0,25 mm.....	65
Figure III.15: Vue à la loupe binoculaire de la classe -0,25 + 0,125 mm.....	66
Figure III.16: Analyseur FX (Pete, P., 2010).....	66
Figure III.17: Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques qui constituent les stériles francs de la mine de Boukhadra en fonction de la granulométrie.....	68
Figure III.18: Spectromètre d'Absorption Atomique	69

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Réserves géologiques et exploitables de la mine de boukhadra.....	11
Tableau I.2 : Composition chimique du minerai de fer de Boukhadra	12
Tableau I.3 : Régime de travail.	13
Tableau I.4 : Les réserves globale de la mine de boukhadra	15
Tableau I.5 : Rapport de la production annuelle de la mine de Boukhadra pour l'année 2015	15
Tableau I.6 : Profondeurs moyennes et angles de pendages du gite exploité en Souterrain...16	
Tableau I.7 : Les formules chimiques du minerai de fer	17
Tableau I.8 : Caractéristiques des différents types des oxydes de fer	20
Tableau I.9 : Caractéristiques des carbonates	21
Tableau I.10 : Caractéristiques des silicates	21
Tableau I.11 : Caractéristiques des sulfures	22
Tableau I.12 : Les principaux producteurs de minerai de fer en 2017 en Mt	23
Tableau I.13 : Les principaux gisements ou mines de fer dans le monde	24
Tableau I.12 : Production du minerai de fer : durée 2008 - 2009.....	28
Tableau III.1 : Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra	57
Tableau III.2 : Résultats de l'analyse granulométrique d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra.....	60
Tableau III.3 : Analyse granulo-chimique des stériles francs de la mine de Boukhadra	67
Tableau III.4 : Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra.....	68
Tableau III.5 : Analyse par Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA) des déchets miniers de la mine de Boukhadra	70

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'Algérie vient d'enregistrer un saut particulier dans son parcours économique en particulier le secteur minier qui vient de connaître un nouveau souffle de reprise à de nouvelles ambitions de développement, après avoir vécu une longue période d'extension. En juillet 2001, l'Etat algérien a pris l'initiative de se libérer du secteur minier et de l'ouvrir au privé pour lui permettre une meilleure évolution. Depuis l'événement de la nouvelle loi minière, de nombreux titres miniers ont été attribués, c'est ainsi que les mines de fer de Ouenza et Boukhadra, sont octroyées à un groupe international étranger (Arcelor Mittal) leader dans son créneau d'activité [1].

La forte demande de l'acier sur le marché national et international a entraîné un accroissement de la production du minerai de fer au niveau des deux uniques mines de fer en vue de répondre aux besoins du seul complexe sidérurgique du pays, en matière de production et de qualité [3].

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, 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 [3].

Cependant, la gestion des déchets miniers demeure une préoccupation majeure pour l'exploitant où la demande en matière minérale ne cesse pas de croître [1].

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 [1].

Le minerai de fer extrait de la mine de Boukhadra est de type hématite se distingue par une teneur supérieure à 50 %, il est ensuite transporté au Complexe Sidérurgique d'Annaba pour la production de la fonte et l'acier [2].

Le présent travail est représenté en trois chapitres. Dans le premier chapitre de ce mémoire j'ai présenté brièvement le minerai de fer et l'entreprise de Boukhadra, Dans le

deuxième chapitre, j'ai exposé une généralité sur les rejets issus de la phase d'exploitation à la phase de traitement.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation physico chimique du minerai et du rejet de traitement. Le programme qui a été élaboré tout au long de ce travail est donné dans le troisième chapitre qui clos ce mémoire.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui englobe et résume ce travail.

CHAPITRE I :
LE MINÉRAI DE FER
DE LA MINE DE
BOUKHADRA

I.1. Introduction :

La mine de BOUKHADRA, occupe une place important dans la richesse nationale car l'industrie lourde ainsi que l'industrie légère dépend beaucoup de la production des métaux ferreux et non ferreux [2].

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 [1].

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].

I.2. 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. La figure I.1 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 [3].

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.

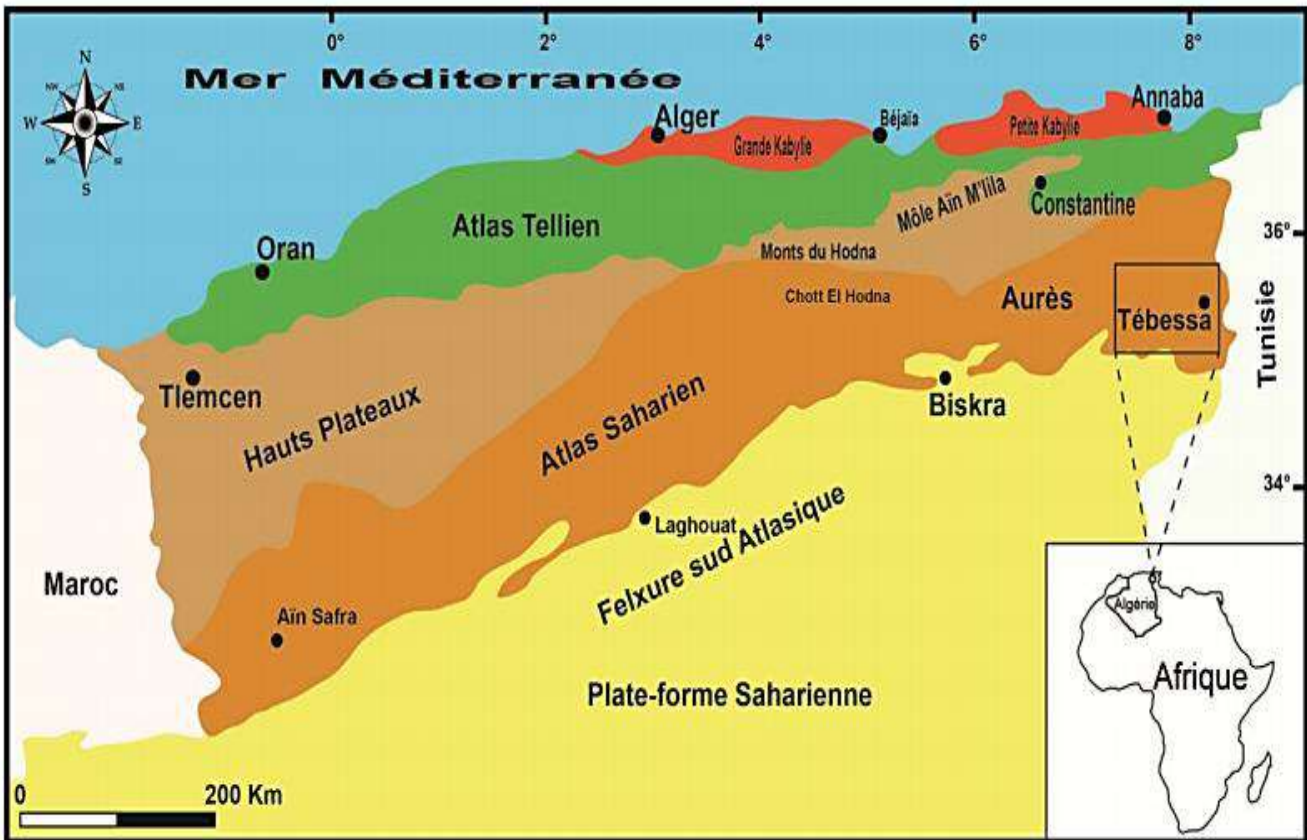


Figure I.1. Tébessa dans l'Atlas Saharien oriental [3].

I.3. Présentation de la mine de Boukhadra :

I.3.1. Localisation géographique :

Le djebel de Boukhadra est situé à l'Est de l'Algérie à 45Km au Nord du chef lieu de la willaya de Tébessa, à 47Km de la mine de l'Ouenza, à 13Km des frontières Algéro-Tunisiennes et à 190Km au sud du complexe sidérurgique d'El hadjar (willaya d'Annaba) (fig.I.2) [4].

Son importance réside dans le gisement de fer qui est considéré comme la deuxième source de minerai de fer en Algérie, après celle de la mine de l'Ouenza.

Le djebel de Boukhadra constitue en un massif isolé qui s'élève au dessus de la vallée de Morsott de 700 à 800m d'altitude. Avec un point culminant de 1463m.

Le gisement est situé entre les méridiens 8°-01' et 8°-04' Est et les parallèles 35°-40' et 35°-50' Nord.

Le climat de la région est continental et sec, les températures varient entre 40°C en été et 0°C en hiver, la Pluviométrie est faible avec parfois de faibles chutes de neige [4].

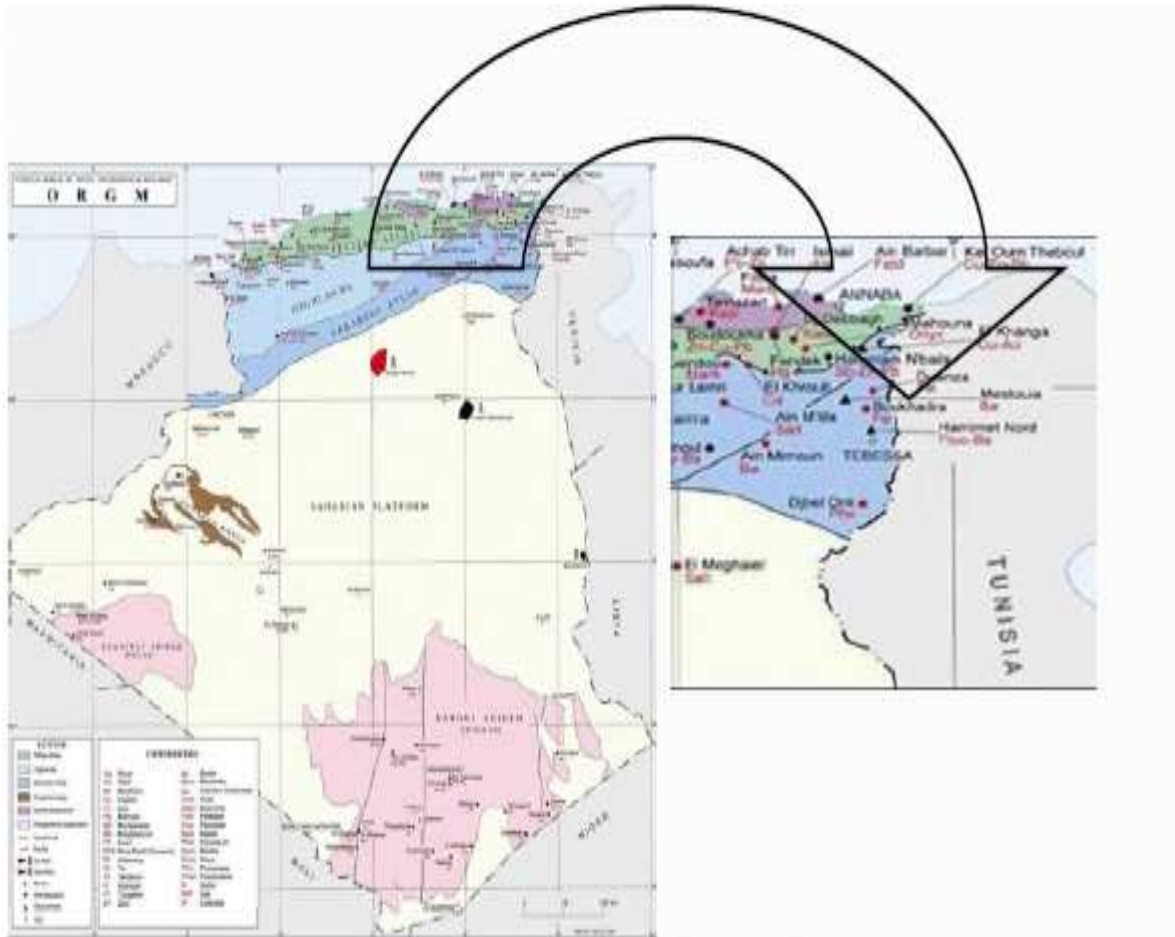


Figure I.2 : Situation Géographique la Région de Boukhadra (Tébessa) [1].



Figure I.3 : localisation de la mine de Boukhadra [Google Earth].

I.3.2. Historique de l'entreprise :

I.3.2.1. Historique de la mine:

L'exploitation de la mine de Boukhadra fut entamée durant l'époque Romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone du pic par la suite l'exploitation a porté sur le zinc et autres poly métaux par la concession de Boukhadra.

De 1903 à 1926 la concession de MoktaElHadid avait entrepris des travaux de recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845 -1225 [3].

De 1903 à 1926 date de la nationalisation des mines, c'était la société de Ouenza qui exploitait le gîte de Boukhadra.

Cette dernière avait effectué de la recherche systématique par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de Boukhadra Durant la période de 1967 à 1984. La SONAREM était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères d'Ouenza et Boukhadra[3].

Après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était FERPHOS qui gérait exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national.

Depuis la date du 18/02/2001 la société LNM. NV ISPAT. Actuellement Mittal steel est devenu le partenaire est chargé de la gestion des mines de Ouenza et Boukhadra[3].

I.4. Géologie régionale de Boukhadra :

Les différentes études établies sur les monts du Mellègue montrent que les principales formations géologiques qui affleurent sont représentées par (Figure I.4)

- Les évaporites du Trias ;
- Les séries sédimentaires du Crétacé moyen et supérieur ;
- Les formations du Miocène.

I.4.1. Litho stratigraphie :

I.4.1.1.Le Trias :

Les formations triasiques se rencontrent dans les parties centrales des structures anticlinales soulevées sous forme de pointements. Elles sont intensément déformées et apparaissent bréchifiées, écrasées et à structure chaotique [6].

Le faciès typique du Trias est représenté par des argiles bariolées, des marnes, des grès et du gypse emballant des blocs rocheux de dolomies noires, de grès micacés, de calcaires, de cargneules et d'ophites.

I.4.1.2. Le Crétacé :

C'est l'étage le plus épais dans la région, il débute par le Barrémien et se termine par le Sénonien :

a) Le Barrémien : il constitue les terrains les plus anciens observés dans la région, ses affleurements sont rares et exclusivement limités aux parties centrales de certains horstanticlinaux dont les plus connus sont ceux de Djebel Harraba au Nord-est de Tébessa et Sidi Embarek au Sud-est. A la base on rencontre généralement des calcaires et des dolomies et au toit des grès et argiles.

L'absence de faune caractéristique ne permet pas de définir avec exactitude les limites supérieures et inférieures de cet étage [6].

b) L'Aptien : Il occupe la grande partie des affleurements de la région :

- **Le Turonien :** Il constitue des calcaires et marno-calcaires à la base avec de nombreuses empreintes d'inocéramus. Ces formations sont suivies par de plusieurs séries de marnes argileuses riches en ammonites, huîtres et divers.

L'épaisseur de cet étage a été estimée à 250m dans la région d'Ain Chenia au Nord de Djebel Boukhadra et à 190m au Djebel BouKrorza à l'Ouest de l'Ouenza où il devient très calcaire [6].

- **Le Sénonien :** Dans la région de Souk Ahras et Morsott, il est représenté par : Un Sénonien inférieur, (Sénonien-Coniacien) de puissance ne dépassant pas 300m, représenté par des calcaires marneux et des marnes d'après.

Un Sénonien supérieur (Campanien-Maestrichtien) de puissance variant entre 200 et 600m et affleurant au Sud de Tébessa, représenté par des calcaires marneux du campanien, passant à des marnes gypsifères puis à des calcaires massifs à raguons de silex riches en inocéramus [6].

I.4.1.3. Le miocène :

L'épaisseur du Miocène peut atteindre une centaine de mètres. Il constitue une série transgressive reposant en discordance sur les différents dépôts plus anciens. Ils sont représentés par des calcaires roux, suivis de marnes très argileuses de couleur verte devenant rouge foncé et enfin par des argiles à intercalations de grès grossiers [6].

I.4.1.4. Le Quaternaire :

Les formations de Quaternaire remarquables dans les monts de Mellègue sont en majeure partie clastique et continentale couvrant les pentes des massifs et remplissant les vallées, se sont de bas en haut :

- Une importante croute de calcaires ;
- Des cailloutis ;
- Des éboulis et brèches de pente ;
- Des terrasses alluviales [6].

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique		
CENOZOIQUE	Quaternaire		10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.		
	Paléogène	Miocène		10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.	
						200
	MÉSOZOIQUE	I N F E R I E U R	Maest.		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
			Campan.		500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
			Con-Sant.		500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
			Turo		180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
			Cénom.		900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
			Vracon.		500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
			Albien		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
Clans				100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.	
Aptien				300-600	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.	
Barrem				< 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloulia).	
Jurassique		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.			
Trias		< 700				

Figure I.4 : Colonne stratigraphique synthétique des monts de Mellègue [6].

I.5. 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 I.4) [2].

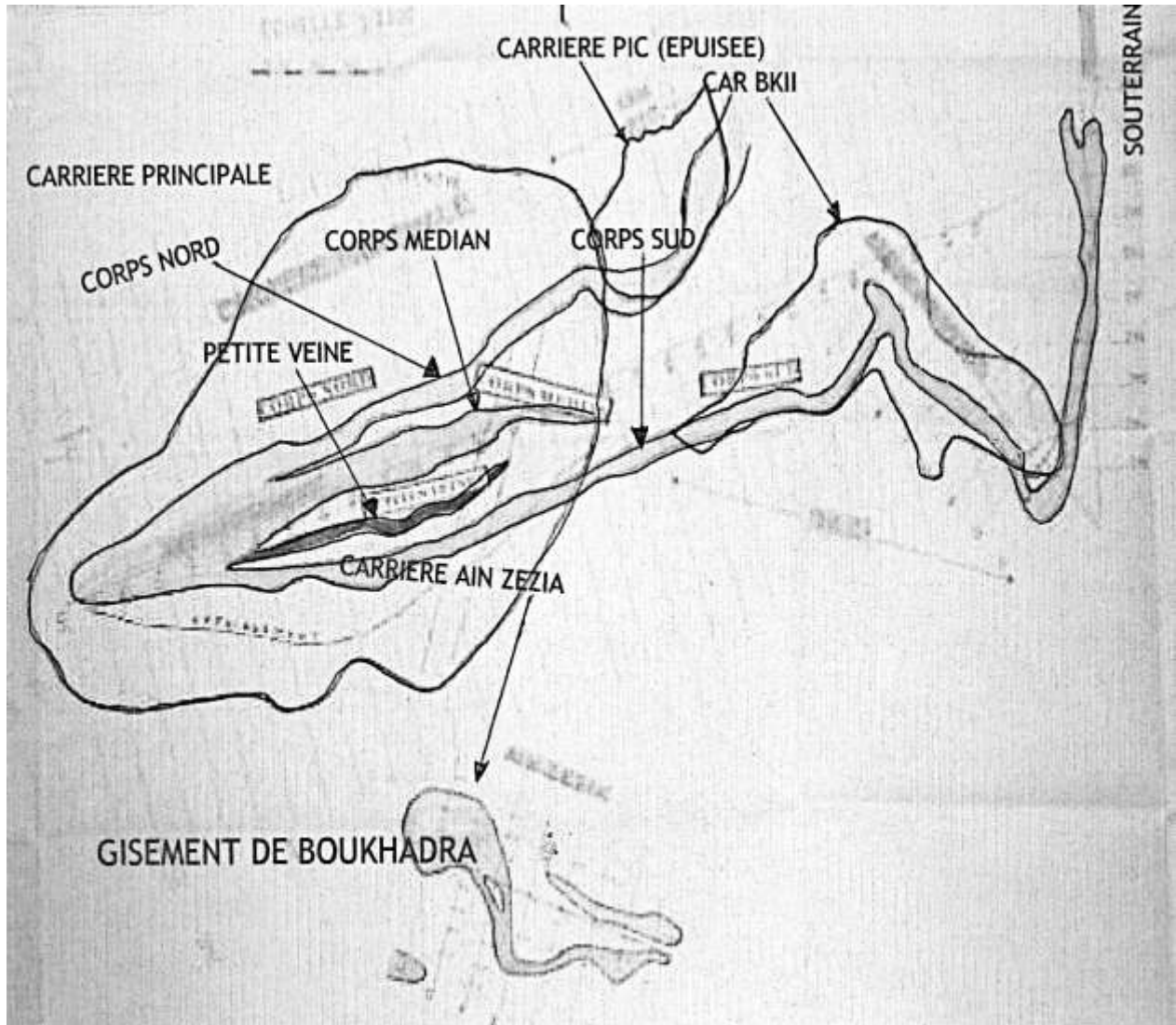


Figure I.5. Morphologie du gisement de Boukhadra [2].

La modélisation en 3D du gisement de Boukhadra réalisé par Amec est donnée dans la figure I.6.

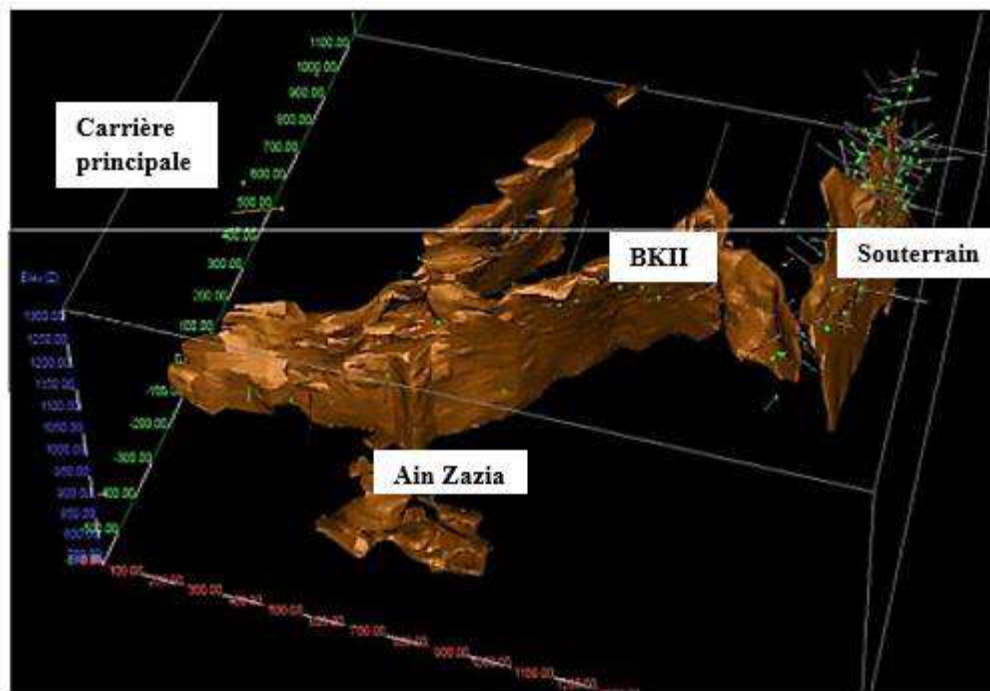


Figure I.6:Représentation 3D –Boukhadra [2].

Les réserves géologiques et exploitables de la mine de Boukhadra au 31/12/2013 sont représentées dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Réserves géologiques et exploitables de la mine deBoukhadra[2].

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[2].

I.6. 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 supérieure à 50 % [7].

Le tableau I.2 montre la composition chimique du minerai de fer de Boukhadra.

Tableau I.2. : Composition chimique du minerai de fer de Boukhadra [7].

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

I.6.1. Caractéristiques du gisement :

- Nature de la substance exploitée : minerai de Fer ;
- Réserves Géologiques : 60 508 913 T avec une teneur égale à 54.99 % en Fer ;
Exploitable : 44 794 187 T avec une teneur égale à 53.50 % en Fer et en catégorie (B.Cl. C2 & P).
- ❖ Type : Minerai hématite de formule chimique Fe_2O_3 et de densité $d = 2.7 T/m^3$ La teneur en Fer varie de 51 – 54%

I.7. Méthodes d'exploitations :

Deux modes d'exploitations sont utilisés :

- A- Exploitation à ciel ouvert.
- B- Exploitation souterrain.

A. Ciel ouvert:

Dans l'exploitation à ciel ouvert de Boukhadra il y a (03) trois sites de carrière :

A.1. Site carrière principale (Amont) :

C'est le premier site d'exploitation à ciel ouvert, il se situe entre les niveaux 1225 et 830, ses réserves géologiques sont de 24 817 641 T, avec une teneur de 75,15% en fer et les réserves exploitables sont évaluées à 10600000T. Avec une teneur en fer de 54,52%. Le volume de stérile est de 13 752 000 m³ [8].

A.2. Site carrière BK II:

C'est le prolongement du corps sud, son exploitation à débuté cette année (1997) avec des réserves globales géologiques de 3 098 208 T, avec une teneur en fer de 56,95% et exploitables de 3 033 652 T, à 54,95% en fer et un volume de stérile de 346 200 m³.

Pour la partie qui sera exploitée en combine (ciel ouvert et souterrain). Elle présente des réserves exploitables de 1 321 861 T, à une teneur de 53,19% de fer [8].

A.3. Site Pic (en épuisement) :

C'est une autre carrière à ciel ouvert, elle a été conçue pour l'exploitation de la suite du corps nord de la carrière principale.

L'exploitation du minerai a débuté en 1993 avec des réserve géologiques totales de 1 393 283 T, à 52,76% de fer et des réserves exploitables de 1 360 088 T, a 51,17% de fer, le volume de stérile est de 325 746 m³ [8].

Dans la carrière ciel ouvert de la mine de Boukhadra l'ouverture est faite au moyen des tranchées communes multiples la hauteur du gradin est de 15 m dans les parties amont de 12m dans les parties aval, à l'exception du site PIC elle est de 10 m.

La foration s'effectue au moyen de sondeuse de chariots et de marteaux perforateurs Les diamètres des trous de foration sont respectivement de 160 mm, 80 mm et de 26mm.

L'abattage s'effectue à l'explosif par tir électrique, le chargement est opéré à Laide de pelles mécaniques et de chargeuses sur pneus de type diesel de capacité respective 5.3 et 6.3 m³ de godet.

Le transport est réalisé à l'aide des camions de carrière vers les terrils extérieurs au périmètre d'exploitation pour le stérile sur une distance d'un (1) Km et vers le concasseur pour le minerai sur une distance de 4 Km [8].

A.4. Régime de travail :

Tableau I.3 : Régime de travail[8].

Régime de travail	Foration		Transport et chargement	
	stérile	Fer	Stérile	Fer
Nombre des postes ouvrable par jour	02	02	02	02
Nombre d'heures de travail par poste	08		08	
Nombre de jours ouvrables par semaine	05	05	05	05
Nombre de jours ouvrables par an	250	250	250	250

B. Souterrain :

Différentes phases engagées :

- 1^{ere} phase (en épuisement).
- 2^{eme} phase (en épuisement).
- 3^{eme} phase (en développement & exploitation).
- 4^{eme} phase (en projet).

La foration est réalisée par trous profonds et s'effectue par des chariots de foration.

L'abattage s'effectue à l'explosif par tir électrique : Le chargement et le transport de minerai au niveau des blocs d'exploitation sont assurés par des pelles chargeuses transporteuses de capacité (3.8 m³de godet).

Le transport du minerai est culbuté dans une cheminée principale de transport jusqu'au niveau de phase de roulage d'une section dépassant 3 m² creusé dans les encaissants. En ultime phase le minerai chargé est transporté vers le jour par l'intermédiaire d'un (1) camion du type MT 2000 de capacité 12 tonnes où il est stocké dans un couloir puis acheminé par des camions vers la station de concassage [9].

❖ Le traitement mécanique est assuré par un concasseur giratoire d'une capacité de 300 T/h dont les caractéristiques citées ci-après

- Marque : allischalmers.
- Type : PM1351936.
- Fabricant : 8471.
- Puissance : 125 Kw.
- Année de mise en exploitation : 1931.
- Source d'énergie: électrique.
- Granulométrie : 250 à 300 mm de diamètre.

Le minerai concassé est acheminé par bande transporteuse, jusqu'aux trémies de chargement au niveau de la gare sur une distance de 1 Km d'où il est évacué dans des wagons de 60 T de charge utile vers le complexe MittalSteel(Annaba)[9].

Tableau I.4. Les réserves globales de la mine de Boukhadra [9].

Sites	Ciel ouvert				Souterrain			
	Réserves géologiques		Réserves exploitables		Réserves géologiques		Réserves exploitables	
	Tonnage	Fe %	Tonnage	Fe %	Tonnage	Fe %	Tonnage	Fe %
Carrière principale	24817641	57.15	10600000	54.52	14217641	57.43	14217641	57.43
Carrière Pic en épuisement	440000	52.40	400000	50.34	738458	55.11	708091	5028
BKII (combine)	3098208	56.95	3006692	5435	1388141	5738	1321861	53.19
Souterrain 2 ^{ème} et 3 ^{ème} phase					20453000 7500000	5434	20453000	5484
Total	28355849	57.05	14006692	5450	44287240	5023	6100000	5012

I.8. Production planifiée de la mine de Boukhadra :

Tableau I.5:Rapport de la production annuelle de la mine de Boukhadra pour l'année 2015[12].

Chantier	Prévisions			Production réalisé (annuelle)	Rapport de découverte de la mine à ciel ouvert (stérile/minerai)
	Jour	mensuel	annuelle		
Minerai extrait carrière (t)	440	8000	96000	88240	7.07
Minerai souterraine (t)	610	13000	156000	46430	
Extrait stérile mine (t)	3700	115000	1380000	624570	
Masse rocheuse mine (t)	4140	123000	1476000	712810	
Total des expéditions	900	21000	252000	64857	

I.9. Nature du minerai exploité :

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge (Fe_2O_3) présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54 % de fer.

Le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire, d'une longueur de 900 à 2200 m et d'une puissance variant de 10 à 15 m.

Le tableau I.6 donne les profondeurs moyennes et angle de pendage du gîte exploité en souterrain : [1]

Tableau I.6 : Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en Souterrain.

Les axes	Profondeur (mm)	Angle de pendage (°)
Axe Nord	391	60
Axe Sud Est	320	54
Axe Principale	215	54

I.10. Le minerai de fer :

➤ Définition :

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.

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite [10].

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferri-fère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.

Le fer est le 4^{ème} élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Proche de l'aluminium par ses propriétés, c'est le plus abondant des métaux.

Le principal minerai de fer est l'hématite, dont il existe deux variétés : l'hématite rouge ou oligiste et l'hématite brune ou limonite [11].

Les autres minerais importants sont la goéthite, la magnétite, la sidérite. La pyrite, minerai de fer sous forme de sulfure, n'est pas traitée comme les autres minerais de fer, le fer étant difficile à séparer du soufre. De petites quantités de fer sont présentes sous forme combinée dans les eaux naturelles, les plantes et le sang. Il a une dureté entre 4 et 5 sur l'échelle de Mohs [11].

Tableau I.7 : Les formules chimiques du minerai de fer [11].

Minéral	Formule chimique	Contenu théorique en fer dans le minéral	Contenu théorique en fer après calcination
Hématite	Fe ₂ O ₃	69.96	69.96
Magnétite	Fe ₃ O ₄	72.4	72.4
Magnésioferrite	MgO·Fe ₂ O ₃	56-65	56-65
Goethite	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	62.9	70
hydrogœthite	3Fe ₂ O ₃ ·4H ₂ O	60.9	70
limonite	2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	60	70
sidérite	FeCO ₃	48.3	70
pyrite	FeS ₂	46.6	70
pyrrhotite	Fe _{1-x} S	61.5	70
ilménite	FeTiO ₃	36.8	36.8

Les oxydes qui forment la gangue vont évidemment diminuer la teneur en fer des minerais employés.

Par rapport à leur teneur en fer, les minerais sont classés en :

- minerais pauvres : Fe ≤ 30 %.
- minerais moyens : Fe = 30 % ÷ 50 %.
- minerais riches : Fe > 50 %.

La teneur en fer des minéraux natifs est comprise entre des limites approximatives :

- minéraux magnétiques : Fe = 50 % ÷ 67 %.
- minéraux d'hématite : Fe = 30 % ÷ 65 %.
- minéraux de limonite : Fe = 25 % ÷ 45 %.
- minéraux carbonates : Fe = 30 % ÷ 40 %.

I.10.1. Différents types des minerais de fer :

Les principaux minerais de fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes :

Les sulfures : Les représentants principaux sont la pyrite et la pyrrhotite, ne sont jamais utilisés directement pour la production du fer à cause de l'effet fragilisant du soufre sur les alliages ferreux. Ils constituent en revanche une matière primaire importante pour la production d'anhydride sulfureux, obtenu grâce au grillage. Il reste un résidu d'oxyde de fer (« cendres de pyrite ») qui est pulvérulent et peut contenir encore des quantités gênantes de soufre : son utilisation comme minerai de fer peut donc se révéler problématique.

Les carbonates : On trouve la sidérite ou sidérose, FeCO_3 , qui donne l'oxyde par calcination. À l'air humide, la sidérite se transforme en lépidocrocite ou, plus rarement, en goéthite. La sidérite est fréquemment associée à la pyrite, la magnésite, la chaux, le manganèse. On distingue le fer carbonaté spathique, minerai cristallin blanc, légèrement jaunâtre, très répandu, et la sphérosidérite, en masses sphéroïdales, mélangé à des matières terreuses, rare en France. Le minerai des gisements de houille renferme du charbon : il est de couleur noire et de grillage facile. En Angleterre il est connu comme blackband [12].

La magnétite, spinelle ferrimagnétique Fe_3O_4 , est le minéral de fer le plus riche en métal. Elle est souvent associée à l'hématite dans le même gîte, mais gîtes de magnétite pure sont aussi connus. Densité 5,15, couleur noire, éclat métallique, souvent accompagnée d'impuretés comme la silice, la chaux, l'alumine et le phosphore.

L'hématite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, est le composant le plus important des minéraux de fer traités dans l'industrie sidérurgique. Elle est composée plusieurs types :

- l'oligiste cristallise en rhomboèdres.
- la spécularite consiste en agrégats de cristaux d'hématite à face lisse comme un miroir.
- l'hématite rouge ordinaire se présente en masses fibreuses, terreuses ou compactes.
- l'hématite rouge oolitique est formée de petites sphères agglomérées.
- la martite est une hématite en pseudomorphose de la magnétite.

La maghémite, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, est une forme métastable de l'hématite, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, qui se forme à partir de la magnétite par oxydation progressive. Elle a les mêmes caractéristiques

magnétiques de la magnétite, alors que l'hématite est faiblement magnétique. La structure est spinelle, mais avec des lacunes d'atomes de fer [12].

Les hydroxydes de fer : Se retrouvent mélangés, à l'état microcristallin, dans la limonite ou hématite brune et constituent le « chapeau de fer ». Il s'agit d'un minerai d'origine sédimentaire qui contient de la goethite, de la lépidocrocite et en faibles quantités de l'hématite, des hydroxydes d'aluminium, de la silice colloïdale, des minéraux argileux, des phosphates, des arséniates, ainsi que des composés organiques. En masses fibreuses, la limonite est assez pure, mais lors qu'elle se présente en masses compactes ou terreuses, elle perd sa valeur sidérurgique, car elle contient des sulfures (de fer, mais aussi du plomb), des phosphates et arséniates. En France, il existe peu de limonite, mais on en trouve aux États-Unis, en Russie et en Scandinavie.

L'ilménite, minéral à structure d'hématite, est utilisée plutôt pour l'extraction du titane, le fer ayant intérêt accessoire [12].

Les silicates ne sont pas utilisés pour l'extraction du fer, car le procédé d'enrichissement est complexe. De plus, ils sont incompatibles avec une utilisation dans un haut fourneau lorsqu'ils se présentent sous forme de sable car ils n'ont pas la perméabilité nécessaire pour laisser circuler les gaz réducteurs.

L'utilisation des minerais dans un haut fourneau impose leur conditionnement préalable: ce sont les étapes d'agglomération ou de pelletisation, qui apportent au minerai la résistance mécanique, la perméabilité et la composition chimique à la gangue compatible avec leur utilisation. Un enrichissement est parfois réalisé à cette occasion.

Il existe à travers le monde un nombre important de roches contenant du minerai de fer. Elles sont en général réparties en plusieurs catégories : les minerais oxydes, carbonates, silicates, et sulfures. Le tableau suivant montre les Caractéristiques des différents types des minerais de fer [12].

Les tableaux suivants montrent les caractéristiques des différents types des minerais de fer

Tableau I.8 : Caractéristiques des différents types des oxydes de fer [14].

Type	Teneurs	couleur	Observation
Magnétite $Fe_3 O_4$	72,36% fer 27,64 % oxygène	Gris fonce noir	C'est une roche très magnétique. Elle a pris de plus en plus d'importance avec le Développement des techniques de concentration magnétique et l'utilisation accrue de produits de haute qualité.
Hématite $Fe_2 O_3$	69,94% fer 30,06% oxygène	Gris acier à rougevif	L'hématite est l'un des principaux minerais de fer. Cette roche possède une dureté qui peut aller de 5,5 à 6,5 selon la famille à la quelle elle appartient. C'est la forme de roche la plus répandue a la surface de la terre et c'est également celle qui est le plus souvent employée dans l'industrie.
Limonite (ou Hématite brune) $Fe(OH).n H_2 O$	62,85% fer 27,01%oxygène 10,14% eau	Jaune ou marron, parfoisnoir	Les limonites sont également une source importante de minerais à travers le monde. Elles sont à la fois oxyde et hydroxyde de fer. La goethite qui est une sorte de limonite se rencontre souvent en association avec de l'hématite.

Ilménite FeTiO_3	36,80% fer 31,57% titane 31,63% oxygène	Noir	<p>On la rencontre parfois en association avec de petites quantités de magnétite. Elle est généralement exploitée pour le titane qu'elle contient.</p> <p>Le minerai de fer peut être alors extrait en tant que sous-produit au cours du traitement de la roche. Contrairement à l'hématite ou à la magnétite, cette roche n'est pas magnétique.</p>
---------------------------	---	------	--

Tableau I.9 : Caractéristiques des carbonates [14].

Type	Teneurs	Couleur	Observation
Sidérite FeCO_3	48,20% fer 37,99% CO_2 13,81% oxygène	Blanc à gris vert, elle peut virer au brun, en présence d'humidité.	Les sidérites contiennent en général une proportion assez variable de calcium, magnésium ou manganèse.

Tableau I.10 : Caractéristiques des silicates [14].

Type	Teneurs	Couleur	Observation
Chamosite, Stilpnomélane Greenalite, Garniérite.			<p>La formulation chimique est difficile car nous sommes en présence d'un groupe très complexe d'aluminosilicates alcalins de magnésium, aluminium, manganèse, baryum et fer.</p> <p>Les minerais de ce type, bien que d'une importance assez limitée en tant que tels pour la production de minerai de fer, présentent un certain intérêt en tant que source de minerais oxydes.</p>

Tableau I.11 : Caractéristiques des sulfures [14].

Type	Teneurs	Couleur	Observation
Pyrite FeS_2	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivre	Cette roche est souvent connue sous le nom d'or des fous du fait de sa granderessemblance avec l'or. Elle est la rochecontendante du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer qu'ellecontient mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est le sous-produit le plus communément extrait.
Marcassite FeS_2	46,55% fer 53,45% Soufre	Jaune Cuivre	Très proche de la pyrite, de même composition chimique mais de forme cristalline différente.

I.10.2. Production du minerai de fer dans le monde :

Les principaux pays producteurs de minerai de fer en (Mt) et l'évolution de production depuis 1900, sont présentés dans la figure suivante[18].

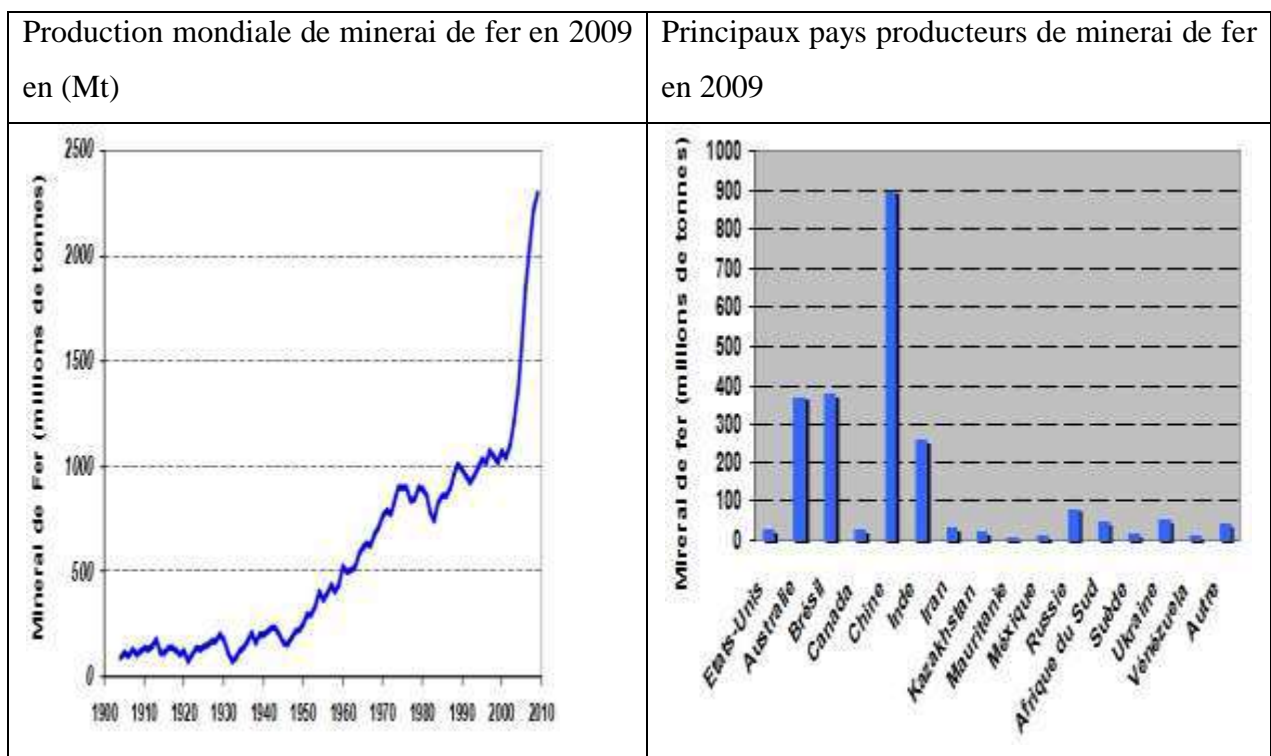


Figure I.7: Principaux pays producteurs de minerai de fer (en Mt) [18].

Malgré le remplacement du fer dans certaines utilisations par des matériaux plus «modernes» (les plastiques et aluminium notamment), l'essor des pays émergents depuis le début des années 2000 a continué de faire exploser la demande mondiale.

L'industrie du minerai de fer était devenue très vivante et en pleine évolution dans les années soixante-soixante-dix grâce aux besoins de la sidérurgie. Le développement du transport maritime par des minéraliers de plus en plus puissants et la découverte en de nombreux points du monde d'importants gisements de minerais riches en ont considérablement modifié le commerce [18].

La production mondiale d'acier brut, passée de 28 à 902 Mt entre 1900 et 2002 est indissociable de la mise en exploitation de nombreux gisements de minerais de fer à haute teneur [18].

Tableau I.12 : Les principaux pays producteurs de minerai de fer en 2017 en Mt (millions de tonnes) :

Pays producteurs de minerai de fer	En (%)	En millions de tonnes
Australie	39,8	879
Brésil	19,8	436
Chine	8,6	191
Inde	7	154
Russie	4.6	101
Ukraine	3.3	73
Afrique du sud	3.2	69
Iran	2.6	57
Canada	2.2	49
États-Unis	2	44
Suède	1.2	27
Kazakhstan	0.6	13
Autres pays	5.1	113

Tableau I.13. Les principaux gisements ou mines de fer dans le monde [1].

Pays	Production (million de tonne)	Principaux gisements ou mines	Observations
Algérie	1.2	Ouenza, Boukhadra, Gara Djebilet	
Argentine	0.5	Province de Jujuy (Zapla)	
Australie	147.2	Mount Newman, Mount Tom Price, Robe River, Paraburdoo, Mount Goldsworthy, Savage River, Iron Prince, Iron Baron, Iron Monarch	
Autriche	0.7	Steirischer Erzberg	
Brésil	180	Ferteco, Samarco, Itabasco, Minas Gerais (Cave, Conceicao, Carajas, Capanema), Aguas Claras, Mutuca, Germano	Le pays a vu sa production fortement augmenter au cours de ces dernières années
Bulgarie	0.3	Kremikovci, Martinovo	
Canada	25.0	Wabush, Fire Lake, Carol Lake, Schefferville, Mount Wright	Resent fortement la concurrence des minerais australiens ; sa production a baissé depuis 1979, ou elle avait atteint le chiffre de 60 million de tonne
Chili	5.5	Algarrobo, El Romeral, Santa Fe, Los Colorados	La plus grande partie de la production est exportée au Japon
Chine	250	Provinces de Liaoning, Hebei, Shanxi, Nei Mongol, Hunan, Sichuan, Shenyang, Hinjiang, Uygur	Les minerais de type Bayan Obo (province de Nei Mongol) contiennent des terres rares

I.10.3. Marché du minerai de fer :

Dans le passé, les distances avaient divisé le monde en marchés individuels des minerais de fer. Depuis quelques décennies, on assiste à l'approvisionnement des grandes sidérurgies par des minerais ayant accompli des trajets maritimes très longs [18].

Il n'existe pas de marché formel organisé du minerai de fer et de l'acier. La formation des prix n'est en cela pas transparente, toutefois, l'usage veut que les prix soient fixés de gré à gré entre grandes sociétés internationales [18].

I.10.3.1. Prix :

Bien que le prix du minerai de fer soit influencé par de nombreux facteurs subtils et variables, comme les coûts, les tarifs de fret, la qualité des produits et les taux de change, il demeure principalement tributaire de l'offre et de la demande.

Généralement, le prix du minerai de fer est d'abord négocié à huis clos entre un certain nombre d'exploitants de mines et leurs clients producteurs d'acier d'Asie et d'Europe, puis, une fois qu'un certain nombre d'ententes et de contrats annuels ont été signés, le reste des exploitants emboîtent le pas et un « prix du marché » est fixé [18].

I.10.4. 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...) [15].

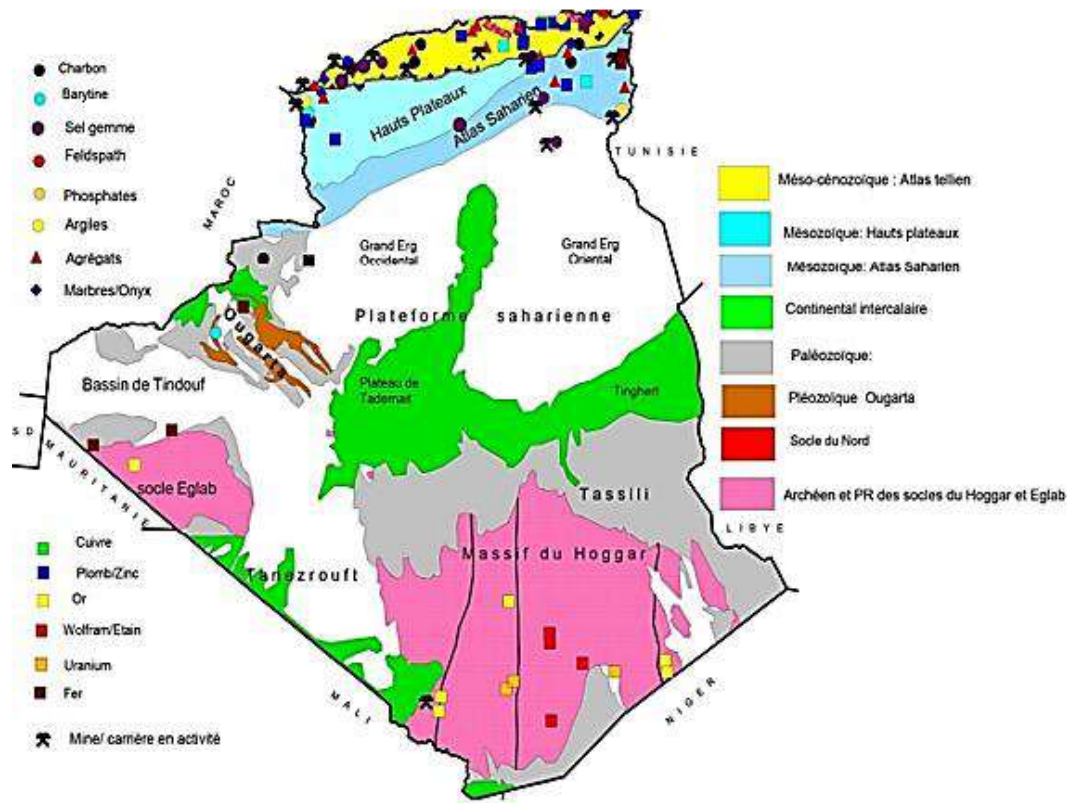


Figure I.8. Carte de répartition des principaux gisements en Algérie (Ministère de l’Industrie et des Mines, 2015).

I.10.5. Production du minerai de fer en Algérie :

En dehors des hydrocarbures, le fer est l'un des principales richesses minières de l'Algérie. L'exploitation des gisements des minerais de fer a toujours eut une place prépondérante dans l'industrie extractive du pays [2].

Les ressources nationales en matière du minerai de fer sont localisées et réparties sur six gisements dont ceux de l'Ouenza et Boukhadra situés à l'Est du pays, exploités par le groupe Arcelor-Mittal Tébessa, les réserves géologiques sont de 87 millions de tonnes avec 48 % Fe.

Avec une production de 2 millions de tonnes/an, la minéralisation hématitique est encaissée dans les calcaires récifaux Aptiens. Actuellement dans la même région, le gisement de Chaabet-el-Ballout (Souk-Ahras), de réserves géologiques de 10 millions de tonnes avec 53% Fe.

La minéralisation ferrifère localisée au contact Calcaires-formations grés-marneuses du Crétacé, et actuellement en phase d'étude afin de relancer son exploitation.

La filiale SOMIFER-spa, du groupe Ferphos à travers ses mines de Khanguet (Tébessa), SidiMaarouf (Jijel), Djebel Anini (Sétif) ce dernier a des réserves géologiques de 6,75 millions de tonnes avec 55 % Fe, la Minéralisation hématitique encaissée dans les calcaires du lias sous forme de filons et de poches. Le gisement de Rouina (Ain Defla) assure une production du minerai de fer représenté par de l'hématite destinée essentiellement pour la fabrication du ciment [2].

Certains autres gisements de fer de réserves plus réduites sont dans les perspectives d'une exploitation et d'autres épuisées ou en voie d'épuisement (Béni-saf).

Les autres gisements non encore exploités se trouvent dans la région du sud-ouest du pays : Il s'agit de grand gisement de Gara-Djebilet : les réserves géologiques arrivent jusqu'à 2 milliards de tonnes avec 57% Fe et de minéralisation ferrifère oolithique sous forme de corps lenticulaires encaissés dans les grès du Dévonien inférieur (Praguien).

Mecheri-Abdelaziz : réserves géologiques sont de 1 350 millions de tonnes avec 52% Fe, une minéralisation ferrifère oolithique localisée sous forme de lentilles dans les grès du Dévonien supérieur. La carte ci-dessous (figure 1.9) montre les principaux gisements de fer en Algérie.

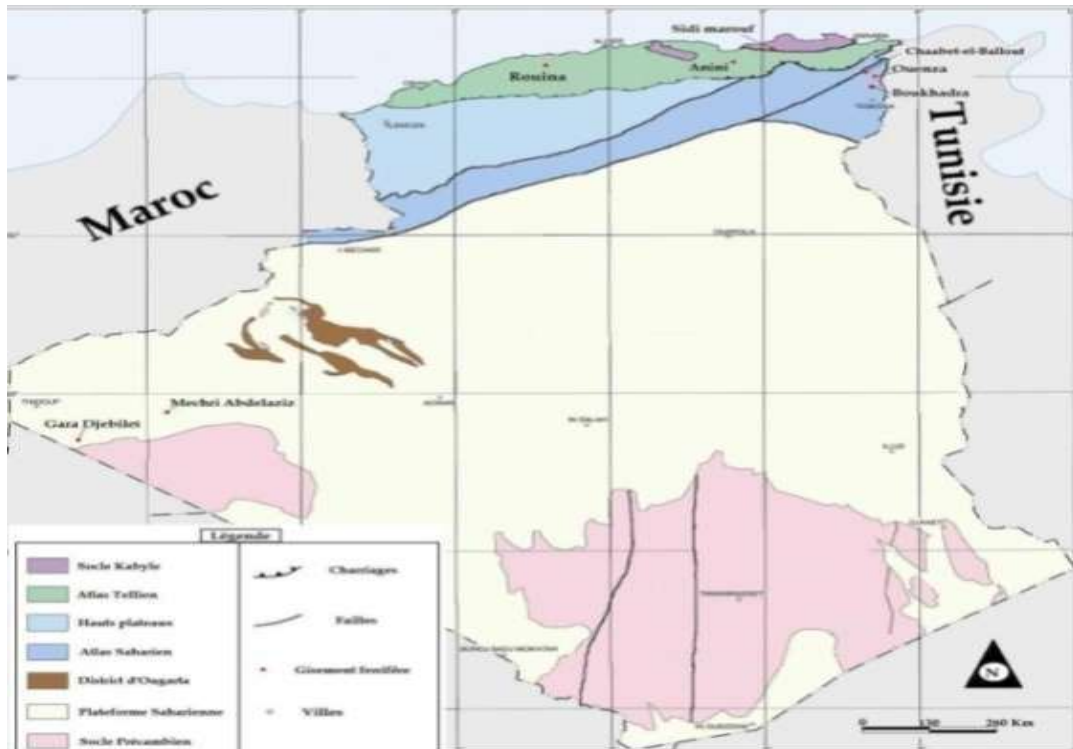


Figure 1.9 : La carte des gisements de fer en Algérie (Tirée de la carte du potentiel minéral en Algérie, ORGM, 2001) [2]

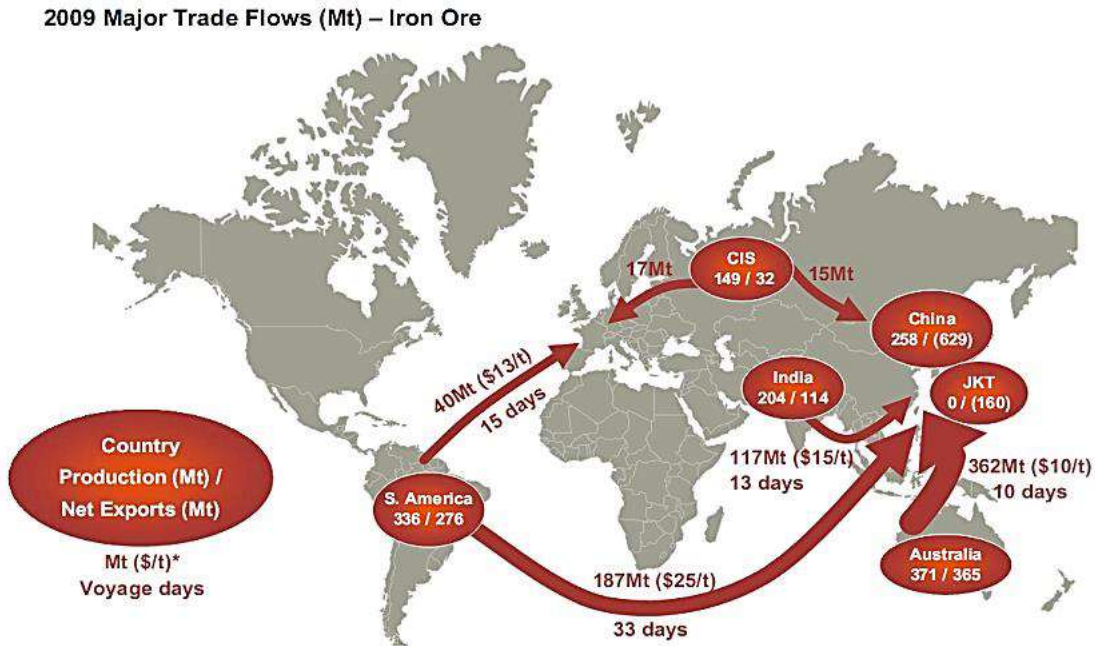


Figure I.10 :Les principaux flux de minerai de fer à travers le monde en 2009 [18].

Tableau I.14 : Production du minerai de fer : durée 2008 – 2009 [18].

N°	Opérateur	Gisements	Commune	wilaya	Production 2008 (milliers de tonnes)	Production 2009 (milliers de tonnes)	Evolution (%)
1	Arcelor Mittal	Ouenza	Ouenza	Tébessa	1192	711	-40.4↓
2		Boukhadra	Boukhadra	Tébessa	525	362	-37.9↓
Somme					1717	1037	-39.6↓
3	SPA SOMIFER	khanguet	bekkaria	Tébessa	50	60	+20↑
4		Djebelanini	Djebelani ni	Sétif	170	90	-47.1↓
5		rouina	rouina	Aindefla	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'Énergie et des Mines, 2010)[11].

I.10.6. Géochimie de fer :

Par ordre d'abondance dans l'écorce terrestre, le fer occupe la 4ème place avec 5 à 6 %. En fait, ce pourcentage varie fortement selon la nature de la roche support : 29% dans les météorites, 9% dans les roches ultrabasiques et les basaltes, 3% dans les granodiorites, 1,4% dans les granites. Dans les roches sédimentaires, on relève :

4,7% dans les schistes, 1% dans les grès, 0,4% dans les carbonates. Des roches basiques aux roches acides, la diminution des teneurs en fer s'accompagne du passage de la valence 2 à la valence 3 [10].

I.10.7. Minéralogie de fer :

Compte tenu de son abondance dans la nature, le fer se présente en un très grand nombre de minéraux. Cependant, les minerais utilisés dans la sidérurgie sont plus limités, avec :

- Magnétite (Fe_3O_4), 72% de fer
- Oligiste (ou hématite, Fe_2O_3), 70% de fer
- Goethite ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$), 63% de fer
- Sidérose (FeCO_3), 48%

A ces minéraux sont souvent associés, dans les gisements économiques, des silicates et des silico-aluminates qui ne seraient pas exploitables seuls et des composés hydroxydes comme la limonite. Actuellement, les gisements mis en exploitation appartiennent surtout au type hématitique, formes par lessivage de la silice des quartzites ferrifères précambriens. Inversement, les gites à sidérose ou de skarnspérident de leur importance, étant donné leur faible teneur ou leur tonnage limités et erratique [16].

I.10.8. Utilisations :

Le minerai de fer est principalement utilisé pour la fabrication d'acier (98 %). Les 2 % restants sont utilisés dans diverses applications, comme :

- **Poudre de fer** — pour certains types d'acier, des aimants, des pièces d'automobiles et des catalyseurs.

- **Fer radioactif (fer 59)** — pour la médecine et comme élément traceur dans la recherche biochimique et métallurgique.
- **Bleu de fer** — dans les peintures, l'encre d'imprimerie, les plastiques, les produits cosmétiques (p. ex. ombre à paupières), les couleurs de peintre, le bleu de lessive, la teinture de papier, l'engrais, les finis en émail cuit sur les véhicules et les électroménagers, et les finis industriels.
- **Oxyde de fer noir** — comme pigment dans les composés de polissage, en métallurgie, en médecine, dans les encres magnétiques et dans les ferrites pour l'industrie de l'électronique [10].

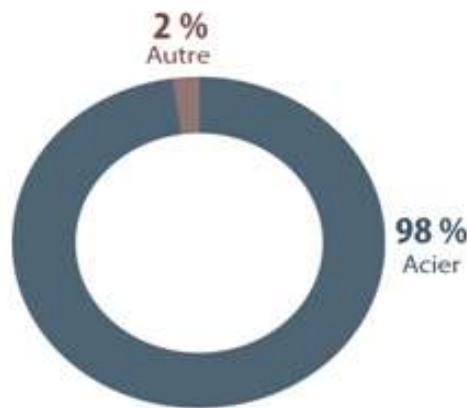


Figure I.9 : Utilisations du minerai de fer à l'échelle mondiale, en 2018 [15].

Autre : poudre de fer, fer 59, bleu de fer, oxyde de fer noir.

Ce diagramme circulaire illustre les principales utilisations du minerai de fer à l'échelle mondiale. La fabrication d'acier représente 98 % de l'utilisation du minerai de fer, tandis que les 2 % restants sont utilisés sous d'autres formes dans différentes applications (c.-à-d. la poudre de fer, le fer radioactif [fer 59], le bleu de fer et l'oxyde de fer noir) [15].

I.11. Conclusion:

Au cours de ce chapitre nous avons présenté le minerai de fer de Boukhadra et le minerai de fer, nous avons terminé ce chapitre par la détermination de différent type de minerai de fer et le domaine d'utilisation du fer.

CHAPITRE II :
LES DIFFÉRENTS
REJETS DE LA
PHASE
EXPLOITATION
JUSQU'À LA PHASE
TRAITEMENT

II.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 [21].

II.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 II.1) [21].



Figure II.1. : Déroulement d'une opération minière [21].

II.3. Notion sur les déchets :

II.3.1. Définition :

Déchet : Toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire [17].

Les déchets miniers : Peuvent être définis comme tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai ; ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits artificiels, plus ou moins transformés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du organiques [17].

I.3.2. Types des déchets :

Ils se répartissent en trois catégories selon l'article R. 541-8 du Code de l'environnement :

- a) **Déchets dangereux:** Touts déchets qui contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux qui présentent des risques pour la santé humaine et l'environnement.
- b) **Déchets non dangereux:** Tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux.
- c) **Déchets inertes:** Tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine [19].

II.4. 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 tels que le charbon [19].

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 [19].

Les déchets miniers représentent l'ensemble des matériaux ou bien dépôts découlant de la recherche, de l'exploitation ainsi que de traitement du minerai. Ils peuvent être naturels comme les stériles francs et la gangue ou artificiels résultants de l'enrichissement tel que les rejets de concentrateur [19].

II.4.1. Types de 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:

a) 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 [22].

b) 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 [22].

c) 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).

d) Les résidus d'exploitation : (stérile franc et / ou stériles de sélectivité minéralisés.

e) Autre résidu : (scories de grillage ou de fusion du minerai).

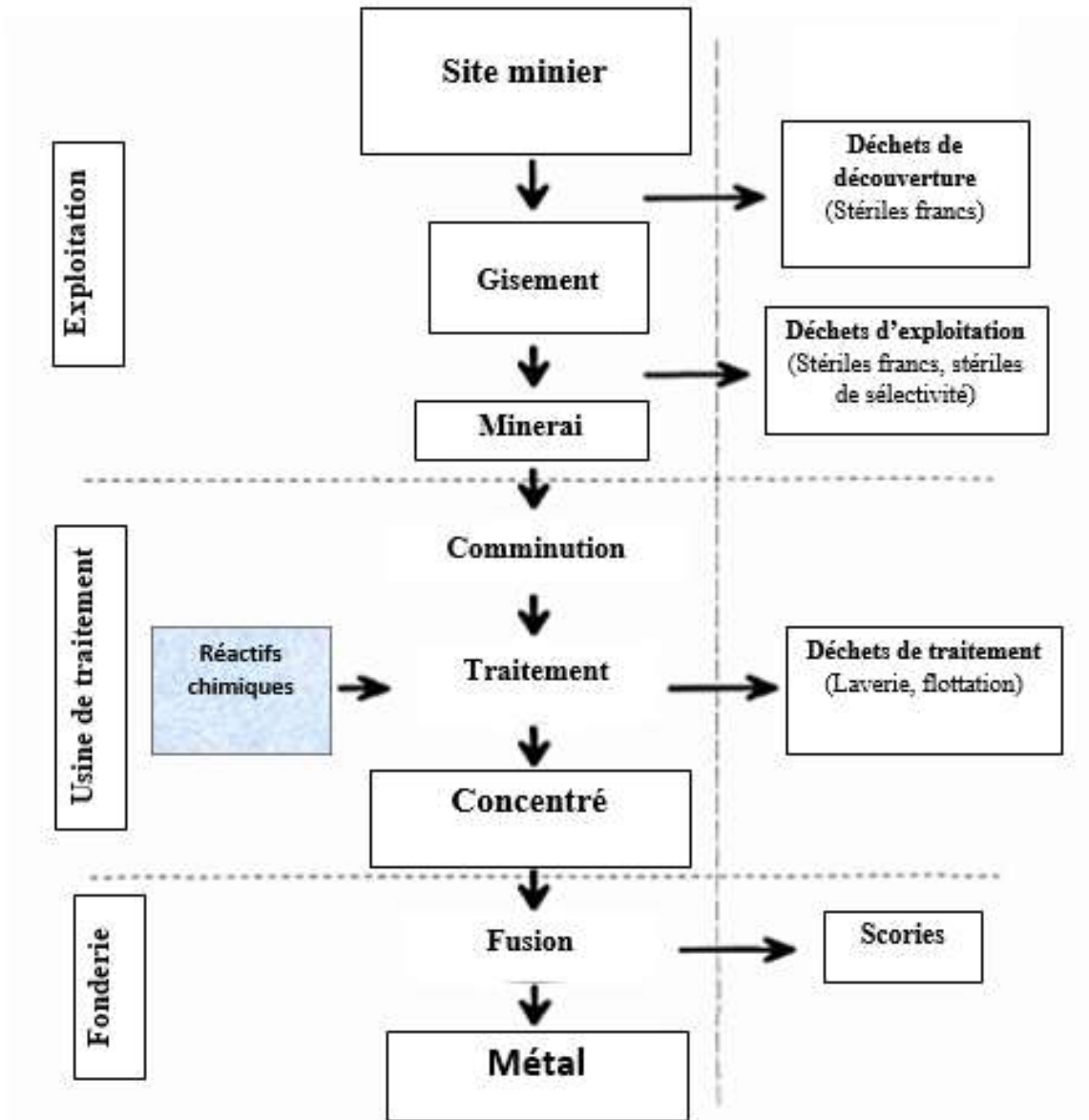


Figure II.2 : Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants [11].

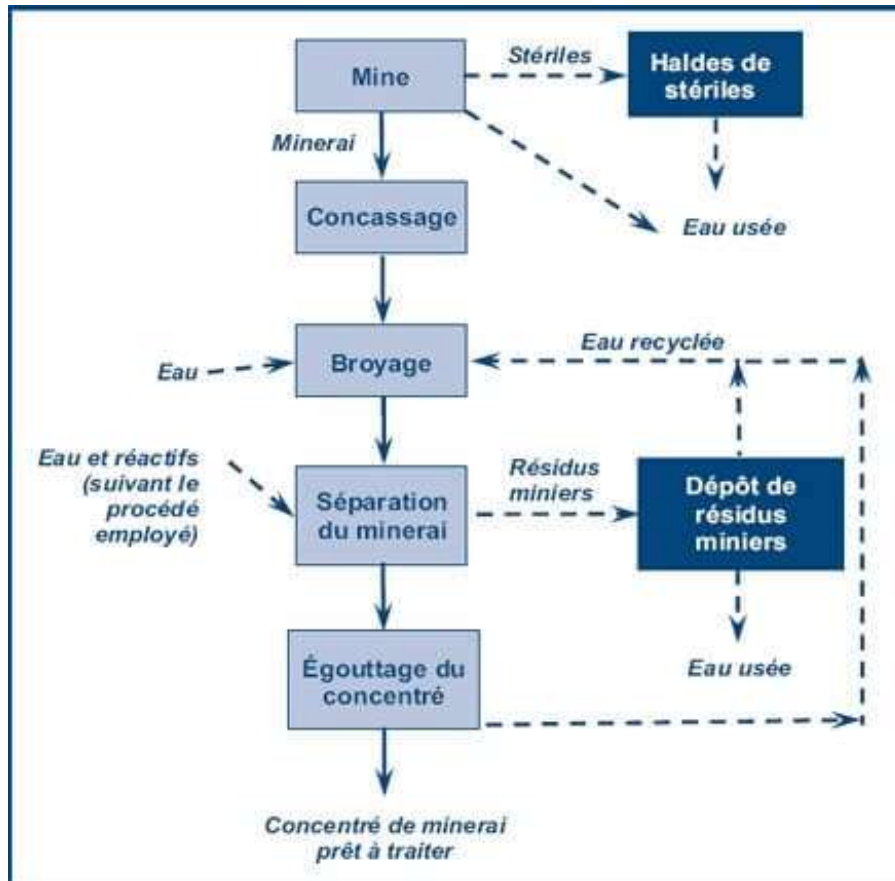


Figure II.3. : Étapes de la concentration du minerai [22].

II.4.2. Nature et caractéristiques des résidus miniers :

La production de métaux d'intérêt à partir de gisements primaires passe par deux opérations principales consécutives :

- l'extraction du minerai contenant les métaux, généralement présent à hauteur du pourcent (aux extrêmes : 30% pour le fer et 0,01% pour l'or).
- la préparation et le traitement du minerai pour concentrer les métaux.

Chacune de ces étapes génère des déchets miniers, principalement de deux types :

- des déchets rocheux de type gangue (« waste rock » en anglais), et
- des résidus issus de traitements minéralurgiques (« tailings » en anglais).

Ces déchets ont des caractéristiques physiques et chimiques différentes [22].

Ainsi, les **déchets rocheux** sont les roches encaissantes évacuées pour accéder au minerai à traiter. Ils ne sont pas exploités car pauvres en substances de valeur et sont stockés ou utilisés sur site (remblais, par exemple). Les déchets rocheux sont assez grossiers en taille (jusqu'à pluri-décimétriques) et représentent des volumes souvent conséquents.

Les **résidus de traitement** sont des sous-produits des opérations de traitement du minerai par différentes techniques minéralurgiques (séparation et concentration) après préparation par concassage/broyage. Ils sont stockés sur site en tas ou en lagunes. Ils sont de granulométrie fine à très fine (millimétriques à quelques dizaines de micromètres) et potentiellement générateurs de questions environnementales (relargage de métaux, drainage minier, acide ou non ; poussières) nécessitant une gestion adaptée dans le cadre de l'après mine [28].

Citons enfin, les **déchets des traitements métallurgiques classiques** (pyrométallurgie et hydrométallurgie) que sont les scories et les boues et qui peuvent se rajouter aux deux types de déchets précédents comme une autre source potentielle de métaux [22].

II.5. Impacts environnementaux des déchets miniers :

II.5.1. Type de pollution (classification selon la répartition géographique) :

On a deux types de pollution selon la répartition géographique : pollution diffuse et ponctuelle.

a) Pollution ponctuelle :

Une pollution ponctuelle est une pollution provenant d'un site facile à localiser, et peut être par exemple le point de rejet d'un effluent ou une zone contaminée. C'est une source fixe et généralement d'émission polluantes importantes [24].

b) Pollution diffuse :

Sont des pollutions dues non pas à des rejets ponctuels et identifiables, mais à des rejets issus de toute la surface d'un territoire et transmis à l'environnement de façon indirecte. Les sources diffuses se caractérisent par des apports de substances émises par des sources mobiles, des sources couvrant de larges étendues ou un grand nombre de sources de pollution d'émission faible [24].

Les pollutions par des sources ponctuelles sont souvent plus faciles à traiter (en installant par exemple un filtre au niveau du tuyau par lequel les produits polluants sont

rejetés dans le milieu naturel), alors que les émissions polluantes provenant de sources diffuses sont difficiles à recenser, à mesurer et donc à contrôler.

II.5.2. Pollution due à l'exploitation minière :

Les opérations minières troublent la nappe phréatique dans la zone en exploitation, celles-ci auraient des impacts directs sur les riverains et les voisinages de la mine à travers la contamination des eaux superficielles et souterraines.

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 longues distances. C'est le drainage des roches ainsi que des minéraux [23].

II.5.3. Pollution due aux installations de gestion des résidus :

Les rejets et la poussière provenant des installations de traitement des résidus et des stériles qui sont soumis ou non à une surveillance, peuvent apparaître dangereux à divers niveaux 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 qui 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 [23].

II.5.4. 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 d'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 [23].

II.5.5. 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 II.7) [24].

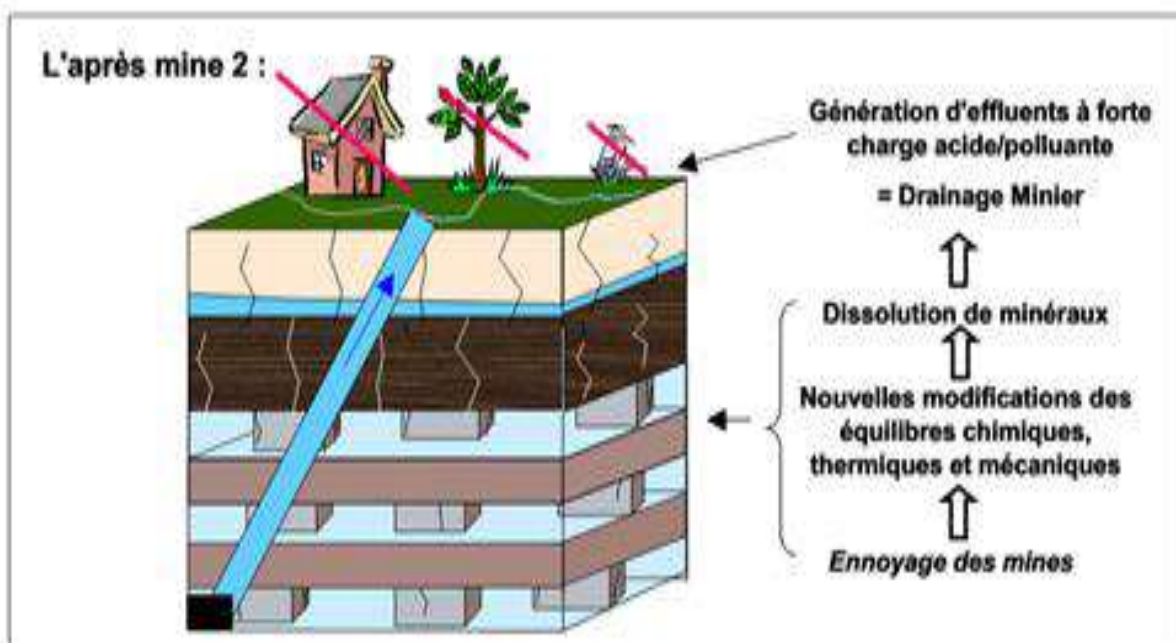


Figure II.4. : Le drainage minier [24].



Figure II.5. : Conséquences du drainage minier acide à Carnoulès, Gard [25].

II.6. 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 II.9) [21].



Figure II.6. : Déchets miniers de la mine de fer de Boukhadra [21].

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) [21].

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 II.9), 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) [21].



Figure II.7. : Vue générale sur le site minier de Boukhadra [21].

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. 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,

II.7. Les modes de gestion des stériles et des résidus miniers :

En mines souterraines comme a ciel ouvert, l'exploitation génère la production d'une quantité importante de roches et de terres qui ne peuvent pas directement être valorisées dans le cadre de l'exploitation du minerai concerné. En outre, le traitement du minerai produit tout au long des étapes du procédé de valorisation différents types de résidus, minéralurgiques et métallurgiques, non valorisables dont la gestion constitue un réel défi pour les mines responsables [20].

Il y a donc lieu de préciser la différence entre deux types de produits non valorisables :

- les stériles d'exploitation (en général, matériaux sols ou roches grossiers). Il s'agit des terrains de recouvrement (stériles francs), d'une partie du minerai abattu jugée

insuffisamment riche (stériles de sélectivité) ou un mélange des deux précédents (stériles mixtes).

- les résidus de traitement minier résultants des opérations de traitement (en général matériaux fins mêlés à différentes solutions aqueuses).

La gestion de ces produits constitue un enjeu majeur pour une exploitation minière responsable car ils ont été à l'origine d'accidents et de désastres environnementaux majeurs [20].

II.7.1. Stériles miniers :

Les stériles miniers produits sont :

- généralement déversés et mis en dépôts « à sec » dans des versées à stériles (ou haldes ou terrils). La stabilité des ouvrages est assurée par le respect de l'angle de « talus naturel » de chaque matériau déposé (angle que suit le matériau naturellement lors de son déversement). Localement des remodelages de pentes peuvent être entrepris.
- localement mêlés à des résidus de traitement minier et mis en dépôt (« codisposal » en anglais). Cette technique permet d'augmenter la stabilité géotechnique et géochimique des versées à stériles.
- utilisés, seuls ou en mélanges cimentés, pour remblayer les excavations minières.
- réutilisés sur la mine elle-même pour enrochements divers (pistes, merlons et talus).
- valorisés en termes de granulats pour répondre à des demandes locales.

Les opérations de versée sont relativement simples et réalisées à l'aide d'engins de chantiers (pelles et camions) ou de bandes transporteuses. Toutefois, cette simplicité apparente de mise en œuvre ne doit pas masquer la gestion cruciale des eaux (ruissellement et infiltration) sur ces ouvrages réalisée à l'aide de drains, de canaux de dérivation, de couverture, etc [20].



Figure II.11. : Stockages des stériles [20].

Remarques : Notons que les résidus de traitement pyrométallurgique, sous forme de diverses scories, sont généralement « gérés » comme des stériles miniers et non comme des résidus miniers (même s'ils sont issus d'une opération de traitement). Les cendres, du fait de leur finesse, sont plus souvent traitées comme des résidus miniers [20].

II.7.2. Résidus miniers :

Les résidus miniers sont des matériaux artificiels fins produits sous forme liquide ou de boue souvent en grande quantité. Ces résidus sont enrichis en minéraux de gangue et minéraux résiduels non économiques ainsi qu'en réactifs chimiques. Ils sont déversés sous forme liquide, boueuse ou pâteuse et doivent donc souvent être retenus derrière des digues ou déposés dans des bassins. Il est également possible de mélanger ces résidus (les parties inertes) aux stériles miniers pour constituer des ouvrages de dépôts de meilleure stabilité. Compte tenu de la forme de ces résidus (semi-liquide), leur dépôt nécessite le recours à des infrastructures plus lourdes que la mise en dépôts à sec des stériles : pompes spécifiques, dessiccateurs, réseaux de canalisations, cyclones...

En règle générale, une digue de retenue se compose de trois parties :

- Une partie amont, qui est capable de retenir les résidus sans pénétration ou érosion excessive, qui est composée des résidus proprement dits (par exemple du sable compacté).
- Une partie centrale ou cœur qui ne peut ni s'effondrer ni être bouchée par des fines (roche ou pierre à filtre concassée).

- Une partie aval, qui assurant la solidité et la stabilité du pied, qui va rester « sèche » en toutes circonstances.

Une digue peut être construite avec des matériaux externes au process minier (granulats, béton, etc.) ou avec des stériles ou de résidus miniers. Les digues de retenue de résidus miniers ne sont généralement pas construites en une fois (signifiant que l'ouvrage de retenue est terminé avant le premier versement de résidus miniers) mais par étapes (signifiant que la construction de l'ouvrage de retenue est réalisée simultanément au stockage des résidus miniers). Ce principe permet de commencer la production minière et de dégager des bénéfices pour financer les étapes suivantes de la construction de la digue. Ce principe permet également de limiter l'empreinte du site en cas d'arrêt rapide de l'activité [22].

Lorsqu'on envisage la construction d'une digue avec une partie des résidus miniers, celle-ci se fait par phases. La partie grossière des résidus est utilisée pour constituer le cœur de la digue tandis que les résidus plus fins sont déposés en amont de celle-ci. Pour une construction par étapes d'une digue, il existe trois méthodes principales de construction:

- La méthode ascendante ou amont.
- La méthode descendante ou aval.
- La méthode longitudinale ou centrale.

La méthode amont est la technique de construction traditionnellement utilisée lorsque les rejets de concentrateur sont déposés à l'aide de lances à robinet (« *spigotting* ») ou avec des hydrocyclones. Cette méthode s'applique lorsque les résidus possèdent les caractéristiques géotechniques et physicochimiques nécessaires à la construction des digues, quand la région est à faible risque sismique et pour des digues de faible hauteur. La construction des digues par la méthode amont est relativement simple, ce qui expliquerait son utilisation régulière malgré les limitations qui y sont rattachées. Un inconvénient inhérent aux digues construites selon la méthode amont réside dans le fait que les petites digues construites successivement à partir de résidus miniers peuvent reposer sur des matériaux relativement fins, peu consolidés, qui ont été mis en place au cours des étapes précédentes [22].

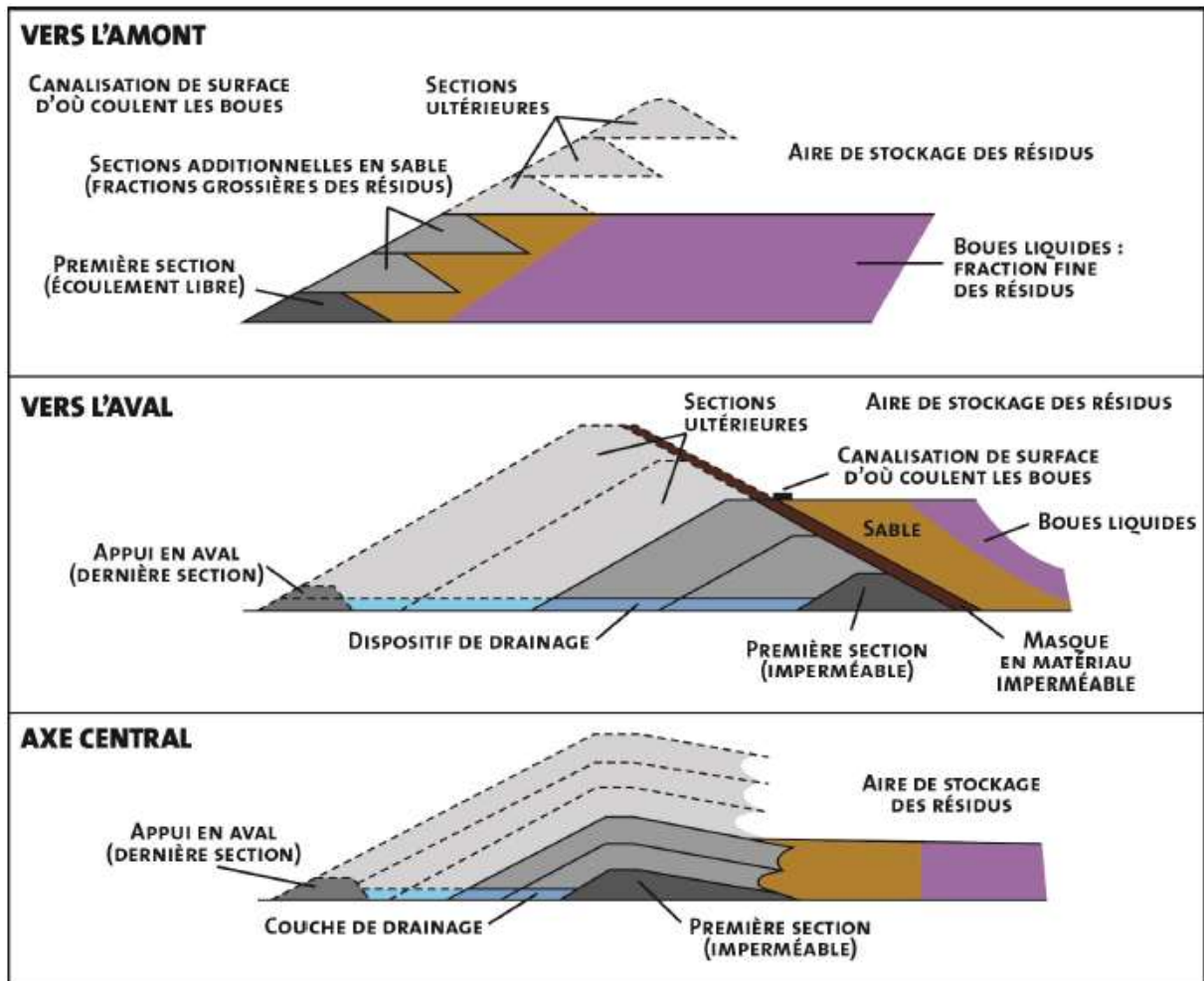


Figure II.09 : Techniques de construction de digues à résidus miniers [22].

Comme son nom l'indique, la digue de retenue en méthode aval est construite à l'aval de la digue d'amorce, généralement à partir des rejets grossiers. La crête de la digue se déplace ainsi vers l'extérieur du parc à résidus. Cette méthode engendre typiquement une meilleure stabilité que la méthode amont et elle génère, de plus, un bilan d'entreposage positif puisque le volume disponible dans le bassin augmente progressivement avec la hauteur de la digue. En revanche, un espace important est nécessaire en pied de la digue initiale [22].

La méthode de l'axe central représente une solution de compromis entre les deux méthodes précédentes. Il s'agit de maintenir la crête de la digue à la même position horizontale, avec une élévation qui se fait selon un axe vertical. Cette méthode confère une meilleure stabilité que la méthode amont, et elle demande moins de matériaux grossiers que la méthode aval [22].

II.8. Les différentes opérations génératrices des déchets :

II.8.1. L'exploitation minière :

L'exploitation d'une mine consiste à extraire des roches ou minerais ayant une valeur économique. Plusieurs techniques d'exploitation minière existent mais peuvent être réparties en trois grandes familles :

- La mine à ciel ouvert.
- La mine souterraine.
- L'exploitation par dissolution et la lixiviation *in situ*.

En complément, une quatrième famille peut être définie elle concerne l'exploitation des placers qui est très spécifique même si elle reste du type ciel ouvert (l'exploitation de ce type de gisement n'est pas envisagée en France métropolitaine tandis qu'elle est courante en Guyane [25]).



Figure II.10 : Mine à ciel ouvert de cuivre-plomb-zinc de Las Cruces, en Espagne[25].

II.8.2 Traitement des minerais :

Si des roches ont été extraites dans le cas d'une exploitation minière, c'est pour leur richesse en minerais valorisables. Cependant, même à des concentrations intéressantes, les minerais ont rarement une pureté suffisante pour pouvoir être transformés directement en

produits finis (souvent de type métaux). Il est donc nécessaire de modifier l'état du minerai extrait [26]

Le traitement du minerai s'effectue dans une usine de traitement dédiée qui peut être localisée sur le site même de la mine ou bien totalement délocalisée du site d'exploitation.

Le traitement du minerai suit un schéma de procédé bien défini et spécifique pour chaque type de minerai, faisant souvent l'objet d'une forte concurrence entre les entreprises du secteur [26].

Ces procédures de traitement sont la base du savoir-faire de chaque compagnie minière et industrielle.

Au sein du traitement du minerai (minéralurgie), il est possible de simplifier l'approche en deux grandes étapes distinctes et successives faisant appel à différentes techniques :

- Comminution (réduction granulométrique par concassage et broyage) ;
- Concentration (par flottation, concentration gravimétrique, séparation magnétique, etc.).

La transformation métallurgique se divise en deux grandes solutions techniques : l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie. Elles peuvent être mises en œuvre de manière indépendante ou complémentaire [26].

II.8.2.1. LA COMMUNITION :

La comminution est la première phase de traitement du minerai et consiste en la réduction granulométrique des matériaux extraits de la mine, à savoir le minerai tout-venant.

Cette étape va permettre de libérer les minéraux de valeur (porteur des métaux valorisables) des minéraux de la gangue (stérile), de générer des surfaces de grain fraîches, de réduire la taille des grains afin d'augmenter leur surface spécifique pour améliorer les cinétiques (vitesses) de transformation des procédés hydrométallurgique et Pyrométallurgique [5].

Cette réduction granulométrique passe par de multiples opérations de concassage puis de broyage avec l'utilisation de plusieurs types de machine par voie sèche et/ou par voie humide :

- Concassage primaire (avec notamment des concasseurs à mâchoires ou giratoires).
- Concassage secondaire avec des concasseurs à cônes pour obtenir des grains centimétriques.
- Broyage, généralement effectué à l'aide de broyeurs à boulets ou à billes (verticaux, agités) pour obtenir une granulométrie de l'ordre de quelques micromètres.

La taille finale des particules (généralement de quelques millimètres à quelques micromètres) est déterminée à partir d'observations minéralogiques et de tests en laboratoire permettant de déterminer la « maille de libération » [5].



Figure II.11 : Broyeur à boulets de la mine.

II.8.2.2. La concentration :

Une fois le minerai concassé et broyé, débute alors la phase de concentration qui va permettre de séparer les particules libérées lors de la comminution, selon leurs propriétés physicochimiques et produire un concentré de minerai. Il est important de rappeler ici, que les produits issus de ces étapes minéralurgiques peuvent être directement commercialisables [23]. Plusieurs techniques sont utilisées :

- séparation magnétique : cette méthode utilise les propriétés magnétiques des minéraux et permettra par exemple de séparer le quartz (non magnétique) des oxydes de fer et de titane (magnétite, hématite et ilménite), ou encore de trier des sables à rutile, ilménite et zircon. Cette méthode s'applique particulièrement aux minéraux ferreux.
- séparation par milieu dense : cette méthode consiste à séparer les minéraux par gravité à l'aide d'une liqueur dense (typiquement des densités de l'ordre de 3) ou d'une suspension de solide à une densité donnée (ex. magnétite, ferro-silicium) [23].

Elle est particulièrement utilisée pour les métaux lourds (or, tungstène, titane, niobium et tantale, etc.).

- Séparation par gravité : cette méthode consiste à séparer les minéraux par gravité de façon mécanique grâce à des appareils spécifiques (tables à secousse, spirales, sluices ou rampes de lavage, jigs, etc.).
- Flottation : la séparation des minéraux s'effectue en utilisant les différences qui existent entre leurs propriétés de surface physico-chimiques. Par exemple, après avoir été conditionnées avec des réactifs, certaines particules deviennent hydrophobes (non mouillables), tandis que d'autres restent hydrophiles [23].

Dans le procédé de séparation sélective, les bulles d'air fixent les particules hydrophobes, soulevant celles-ci jusqu'à la surface de l'eau et formant une mousse stable qu'on enlève. Les particules hydrophiles restent à l'intérieur de la pulpe et sont évacuées. Ce traitement est effectué :

- soit dans des cellules mécaniques (cuves en acier équipées d'une turbine à entraînement mécanique qui disperse l'air sous forme de fines bulles et agite la boue.
- soit dans des cellules pneumatiques généralement sous forme de colonnes de flottation (cylindres d'acier verticaux, élevés (de 9 à 15 m de haut) pouvant mesurer jusqu'à 3 m de diamètre, à la base desquels de l'air est injecté par un aérateur, la mousse chargée est ensuite récupérée en passant par-dessus le bord supérieur et la pulpe est évacuée en sous verse [23].

Cette méthode s'utilise pour la quasi-totalité des minerais sulfurés, mais aussi pour la plupart des métaux non-sulfurés et pour les minéraux industriels.



Figure II.4. : Cellules de flottation.

Lixiviation :

La lixiviation est un processus simple d'extraction par dissolution basé sur le fait que tous les minerais ont des coefficients de dissolution différents et peuvent donc se retrouver séparés par la circulation d'un solvant.

Ce principe est mondialement utilisé pour extraire l'or (le solvant étant majoritairement le cyanure), mais d'autres métaux comme le cuivre et l'uranium peuvent être extraits ainsi. Les différentes techniques mises en œuvre dépendent de la granulométrie, de la minéralogie et des teneurs des minerais : [25]

- **Lixiviation en colonnes ou en cellules.** Le minerai est placé dans des cuves ou des colonnes. La solution de cyanure se lixivie à travers le minerai et dissout l'or, qui est ensuite retiré de la solution lixivante par adsorption sur le carbone ou les résines. Puis, l'or métallique est généralement récupéré par électrolyse après élution du charbon.
- **Lixiviation en tas** Préalablement à la lixiviation en tas, le minerai tout venant ou le minerai concassé est chargé sur des dépôts (ou tas ou pile) de 10 à 20 m de hauteur qui sont empilés sur une couche imperméable. Une solution de cyanure diluée est pulvérisée sur le tas, se lixivie à travers la pile puis dissout l'or disponible. La solution est ensuite dirigée dans un bassin. La solution de cyanure, qui est dite être « sursaturée » d'or, est ensuite pompée vers des colonnes à résine où l'or est récupéré. Une lixiviation en tas rentable offre un certain nombre d'avantages, y compris.
 - coûts de broyage réduits puisque l'or est uniquement concassé, non moulu
 - solution de cyanure recyclée à travers le tas, réduisant la quantité de cyanure utilisée dans l'exploitation [25].

II.10. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons passé en revue à la théorie des déchets et les principes opérationnels génératrices du déchet. 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.

CHAPITRE III :
CARACTÉRISATIONS
PHYSICO CHIMIQUES
DU MINÉRAI DE FER
ET DU REJET DE
TRAITEMENT

III.1. Introduction :

Ce chapitre décrit l'ensemble des méthodologies et les différentes analyses réalisées sur des échantillons prélevés du gisement de fer de Boukhadra en vue de définir et identifier la composition chimique d'une part et de quantifier les phases minérales d'autre part.

La caractérisation est généralement basée sur l'analyse de plusieurs paramètres chimiques et physiques. Elle repose principalement sur la distribution dans les différentes tranches granulométriques, sur l'identification de leur composition minéralogique, et l'évaluation de leur degré de libération. Ces outils de caractérisation seront détaillés dans ce présent chapitre [7].

III.2. Intérêt de la caractérisation physico chimique :

La caractérisation physico chimique consiste à la détermination de différentes espèces minérales constituant le minerai de fer de Boukhadra et de rejet de traitement[32].

D'une manière claire, elle permettra de :

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

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

- Lames Minces (LM)
- Microscopie Electronique à Balayage (MEB)
- Fluorescence X (FX)
- Diffractométrie à Rayons X (DRX)
- Infrarouge (IR)

III.3.L'échantillonnage :

III.3.1. Définition :

- a) **L'échantillonnage :** est une opération de prélèvement des échantillons qui représente toute la surface de la zone étudiée. Elle est réalisée à l'aide d'une masse métallique enveloppée par plusieurs couches de papier et nylon pour éviter toutes contaminations possibles. Les points sélectionnés concernant les affleurements rocheux des unités géologiques principales des régions étudiées [32].
- b) **Échantillon:** Partie d'un ensemble choisi pour représenter une ou plusieurs propriétés caractéristiques de cet ensemble [2].
- c) **Teneur:** La valeur relative d'un élément ou d'un minéral. La teneur en soi n'indique pas la valeur économique d'une roche [2].
- d) **Minerai:** minéraux ou roches dont les teneurs en un ou plusieurs éléments et les accumulations sont suffisantes pour être exploitées, concentrées, traitées et raffinées avec profit [4].

III.3.2. Types d'échantillonnage :

En fonction de la nature de l'échantillon prélevé, deux grandes catégories d'échantillonnages peuvent être distingués :

III.3.2.1 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 [21].

III.3.2.2 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 [21].

III.3.3. Types d'échantillon :

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

III.3.3.1. L'échantillon ponctuel :

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

III.3.3.2. L'échantillon composite :

Il résulte de divers en droits, 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. La figure III.1 illustre l'organigramme des méthodes de caractérisation les plus utilisées [21].

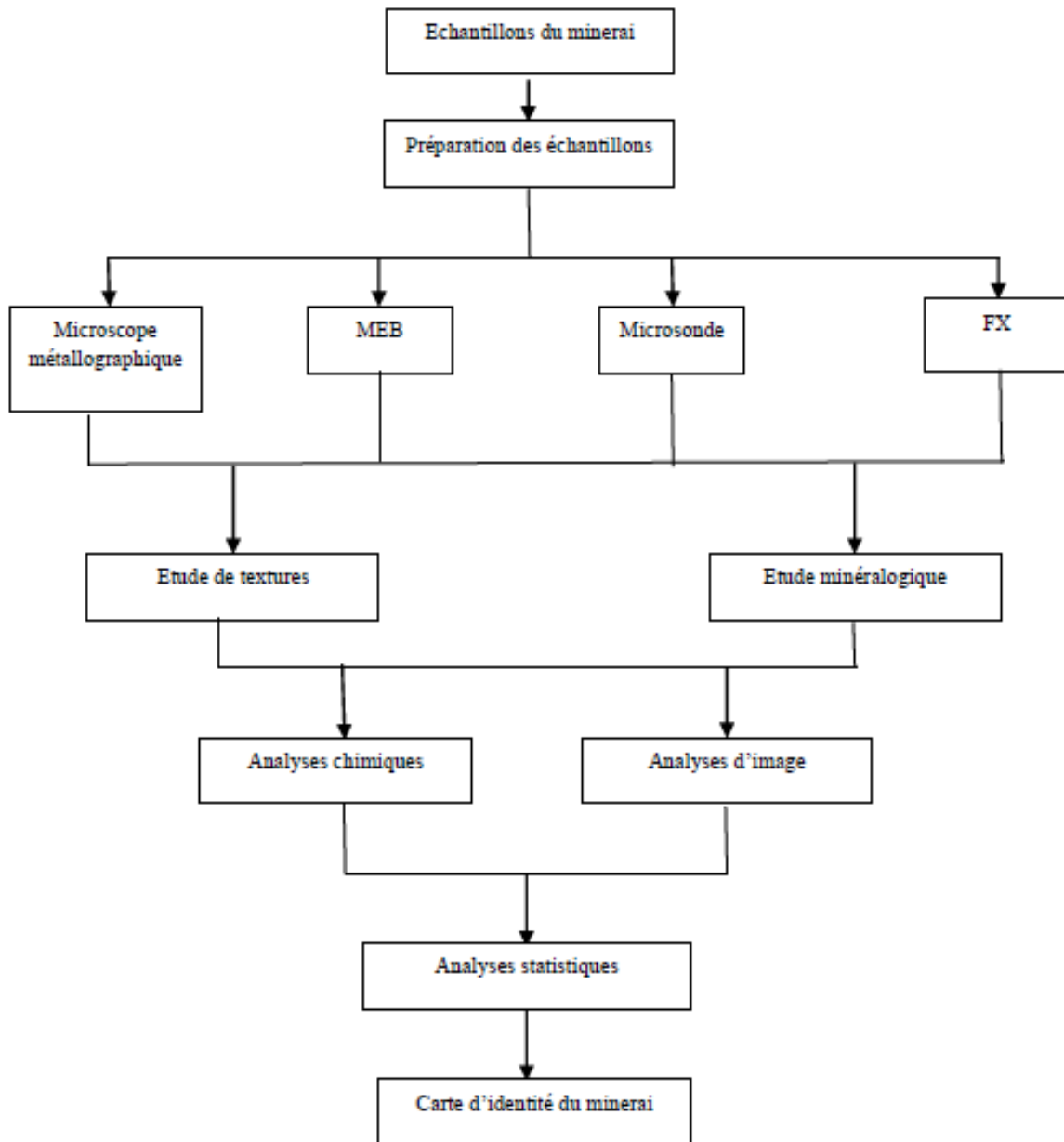


Figure III.1. Organigramme de préparation et caractérisation physico-chimique d'un minerai [21].

III.3.4. Protocole de l'échantillonnage du minerai de fer et de stérile franc de Boukhadra :

III.3.4.1. Protocole de l'échantillonnage du minerai de fer de Boukhadra :

Suivre un protocole d'échantillonnage bien défini a pour but l'obtention des échantillons représentatifs contenant toutes les caractéristiques physiques et chimiques de l'ensemble du site étudié [28].

Les principales étapes qui caractérisent une démarche d'échantillonnage sont l'élaboration d'une stratégie de prélèvement, le prélèvement des échantillons sur le site, la conservation des échantillons et leur préparation pour les différentes analyses et méthode de traitement à appliquer.

La valeur des résultats de la caractérisation dépend de la réalisation adéquate de toutes ces étapes. La stratégie de prélèvement repose essentiellement sur le volume et le nombre des échantillons ainsi que sur le choix des points de prélèvement des échantillons (nombre et positionnement).

La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont effectués [28].

III.3.4.2. Protocole de l'échantillonnage du stérile franc de Boukhadra :

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.

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 III.2 [21].

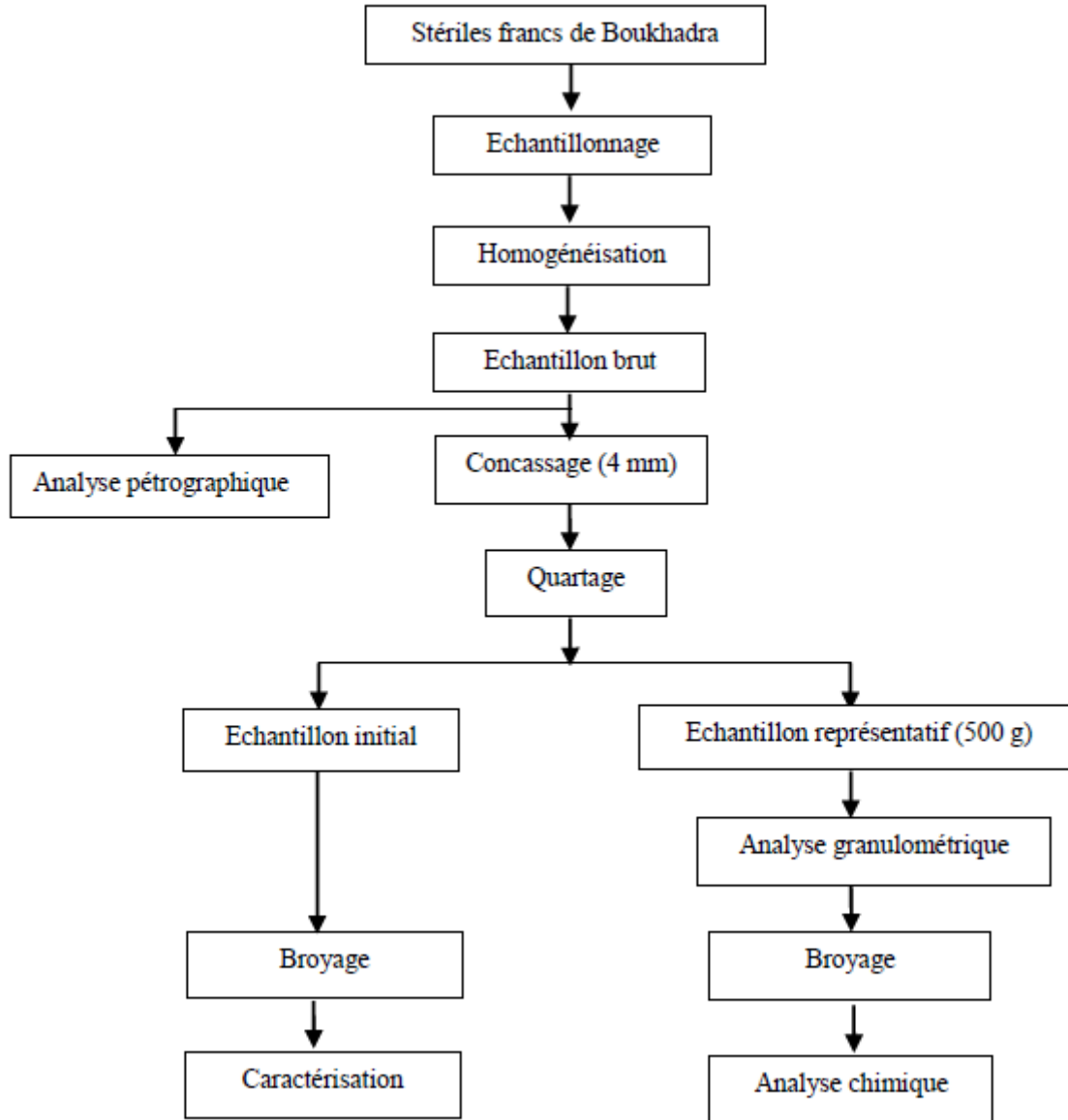


Figure III.2. Protocole d'échantillonnage des stériles francs de Boukhadra [21].

III.3.5 Prélèvement des échantillons sur le site :

Un échantillonnage est réalisé au niveau du site de la mine de Boukhadra. Les échantillons (4 échantillons au total) sont prélevés dans quatre zones différentes, couvrant ainsi tout le site minier afin d'assurer une représentativité des échantillons prélevés. Les points de prélèvement sont déterminés à l'aide de GPS.

Les échantillons sont prélevés sur une profondeur bien définie avec une masse m_0 et sont étiquetés et stockés dans des sacs en plastiques doublés. Ces échantillons sont acheminés

au le laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement pour leur préparation [17].

La disposition des points de prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra sont indiqués dans la figure III.3 [21]



Figure III.3. Points de prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de Boukhadra [21].

Le tableau III.1 montre les coordonnées UTM des pointes du prélèvement des échantillons des stériles francs de la mine de Boukhadra.

Tableau III.1. Coordonnées UTM des points de prélèvements des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra [21].

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

III.4. Caractérisation physico-chimique du minerai de fer de Boukhadra et du rejet :

La caractérisation du minerai de fer et du rejet de traitement est réalisée à l'aide de différentes méthodes portées essentiellement sur l'analyse par DRX, dont le but est de déterminer les éléments majeurs présentés dans les échantillons, ainsi que l'analyse par FX et MEB faisant l'objet d'une connaissance de la composition chimique dans les différents échantillons analysés [21].

III.4.1. Préparation des échantillons pour l'analyse :

Les échantillons prélevés sont préparés au niveau du Laboratoire du département des Mines

III.4.1.1 Le Concassage :

Le concassage est la première étape du procédé de fragmentation, il est effectué généralement par voie sèche, il consiste à réduire la dimension du minerai. Cette étape de traitement prépare le minerai à subir une autre réduction de granulométrie (broyage) ou à passer directement aux étapes de classification et/ou de concentration [28].



Figure III.4. Concasseur à mâchoire à double effet de laboratoire [28].

III.4.1.2. Quartage :

Le quartage a pour objet d'assurer une meilleure représentativité de l'échantillon, il est procédé par l'homogénéisation de minerais [25].

Il consiste à avoir un cône régulier au moyen d'une pelle, qu'on transforme sous forme de galette plate de contour plus au moins circulaire [25].

Cette galette est ensuite partagée en quatre (04) quarts égaux. On prélève deux quarts opposés, alors que les deux autres seront gardés comme témoins comme il est illustré dans la figure (III.5)

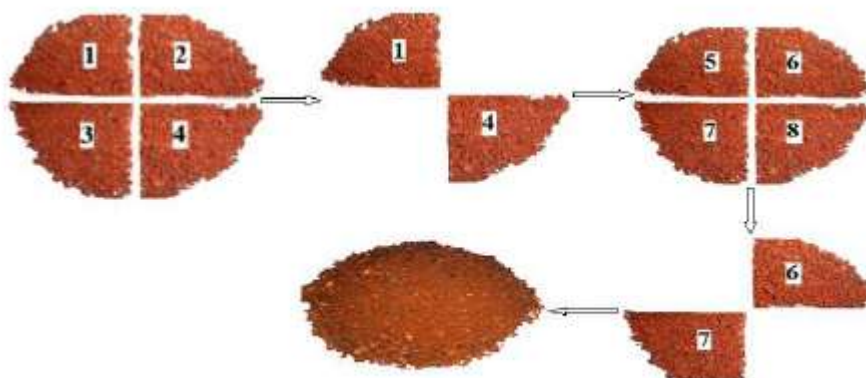


Figure III.5. Opération de quartage [25].

L'échantillon concassé subit une série d'opérations d'homogénéisation et de quartage soigneusement effectuée jusqu'à l'obtention d'une masse M_0 d'une part qui va subir une analyse granulométrique et l'autre partie sera broyer pour des analyses de caractérisation physico-chimique à l'aide de DRX, FX, IR et MEB [25].

III.4.1.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but d'observer la distribution granulométrique des particules d'un échantillon et l'identification des différentes tranches granulométriques qui constituent un échantillon, permettant par ailleurs de définir sa texture et structure.

Elle permet aussi d'étudier la répartition des espèces minérales dans chaque fraction par l'analyse chimique.

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:

- La série Tyler couramment utilisée.
- La série normalisée AFNOR X 11507 [28].



Figure III.6. :Tamiseuse de marque RETSCH [28].

Exemple d'analyse granulométrique menée sur un échantillon des stériles francs le la mine de fer de Boukhadra :

Tableau III.2. : 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	-

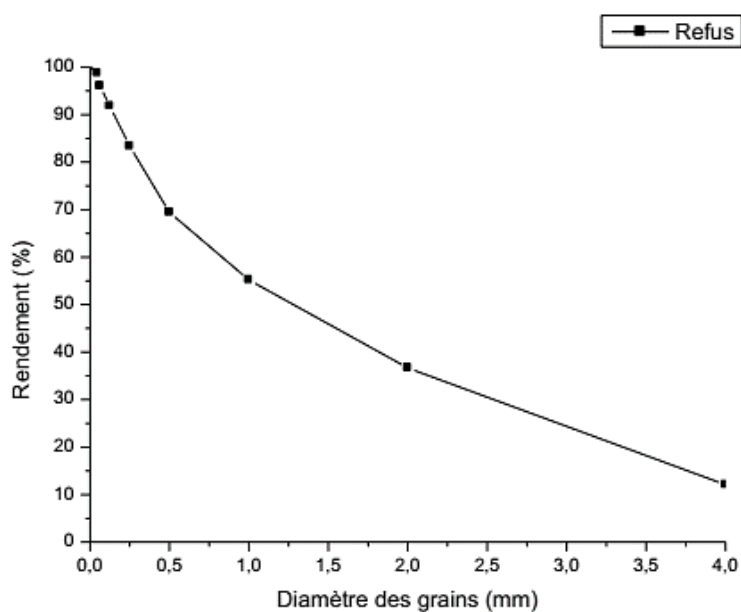


Figure III.7. Courbe de distribution granulométrique d'un échantillon des stériles francs de Boukhadra [21].

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.

III.4.2. Analyse qualitative du minerai et du rejet de traitement par diffraction des rayons X :

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique très classique d'identification et de caractérisation de la structure cristalline des matériaux, qui date du début du XXe siècle et qui a été continuellement améliorée depuis.

Dans sa version ordinaire, utilisée ici, elle permet de mesurer avec précision les distances $d(hkl)$ entre les différents plans cristallins (hkl) d'un cristal, à partir de la mesure des angles de déviation 2θ d'un faisceau de rayons X (RX) incident.

L'appareillage comprend un générateur de haute tension (60kV maximum), courant (60 mA maximum), un tube à RX (anticathode cuivre, molybdène, cobalt...), un refroidissement à eau, un détecteur CCD (auparavant des compteurs Geiger ou proportionnels étaient utilisés), et un ensemble électronique chargé de piloter le goniomètre et d'enregistrer les diffractogrammes ou spectres $I = f(\theta)$.

Le tube à rayons X et le bras du détecteur CCD sur la tête goniométrique pivotent d'un angle θ au cours des acquisitions [30].

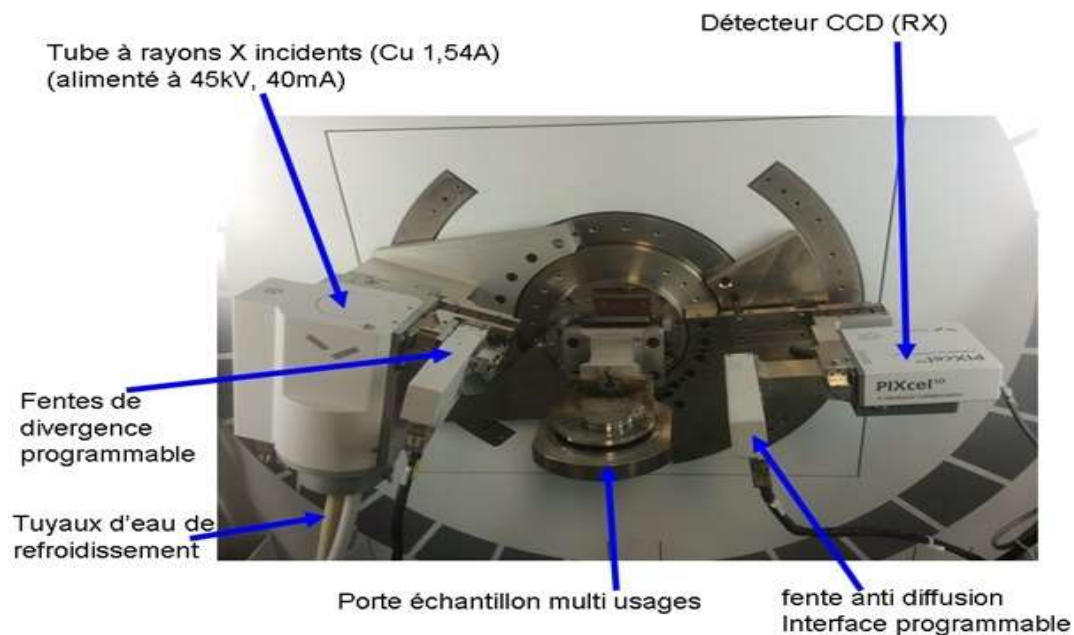


Figure III.8 : vue en détail du porte échantillon et tête goniométrique avec le tube RX, fentes programmables et détecteur [30].

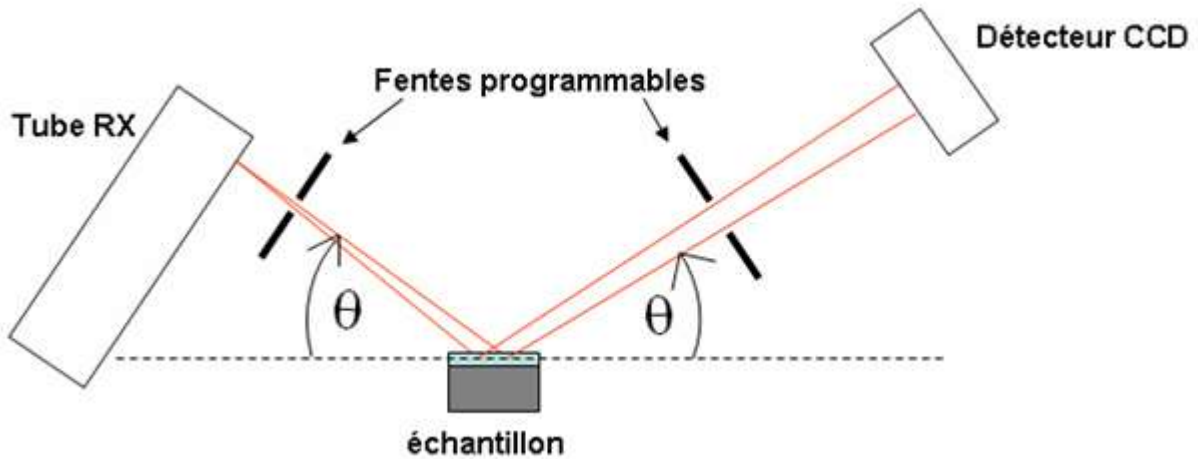


Figure III.9 : Schéma du trajet optique des rayons X en mode goniométrique [30]

Exemple d'analyse par DRX d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra :

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 III.10). [21].

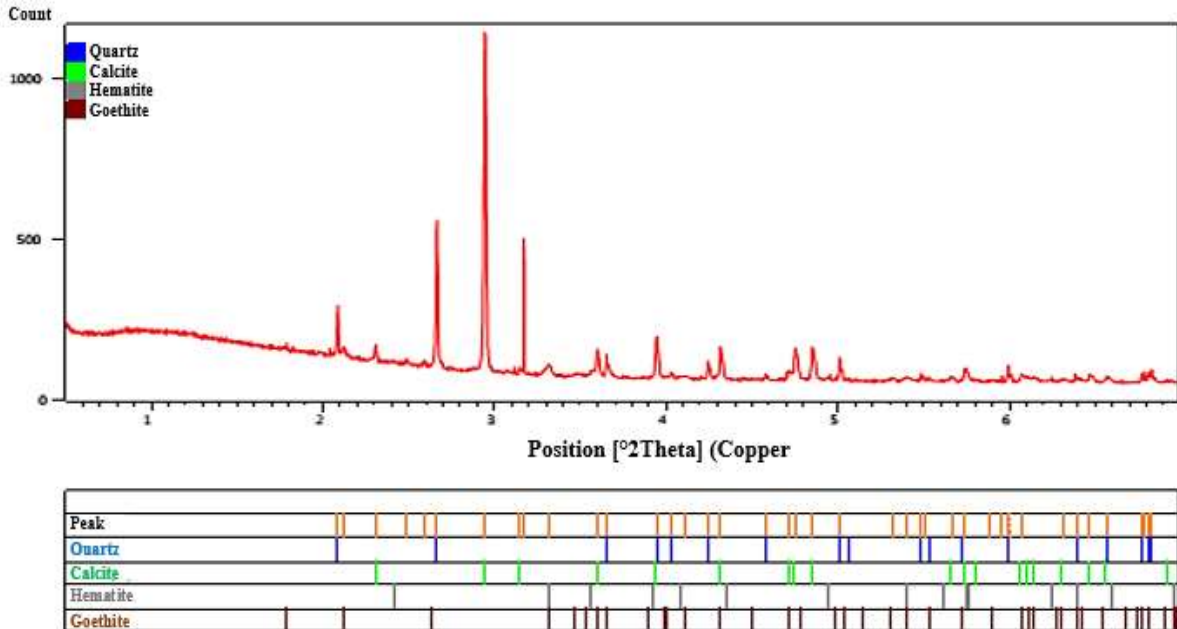


Figure III.10. : Analyse par DRX d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra [21].

III.4.3 Analyse du minerai et du rejet de traitement 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 sous-jacents [21].

La figure III.11 montre un exemple sur les différents compartiments d'un microscope électronique à balayage du laboratoire.



Figure III.11. Microscope Electronique à Balayage.[21].

Exemple d'analyse par MEB des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra:

L'analyse par MEB des stériles francs de la mine de Boukhadraa 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) subarrondis 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) [21].

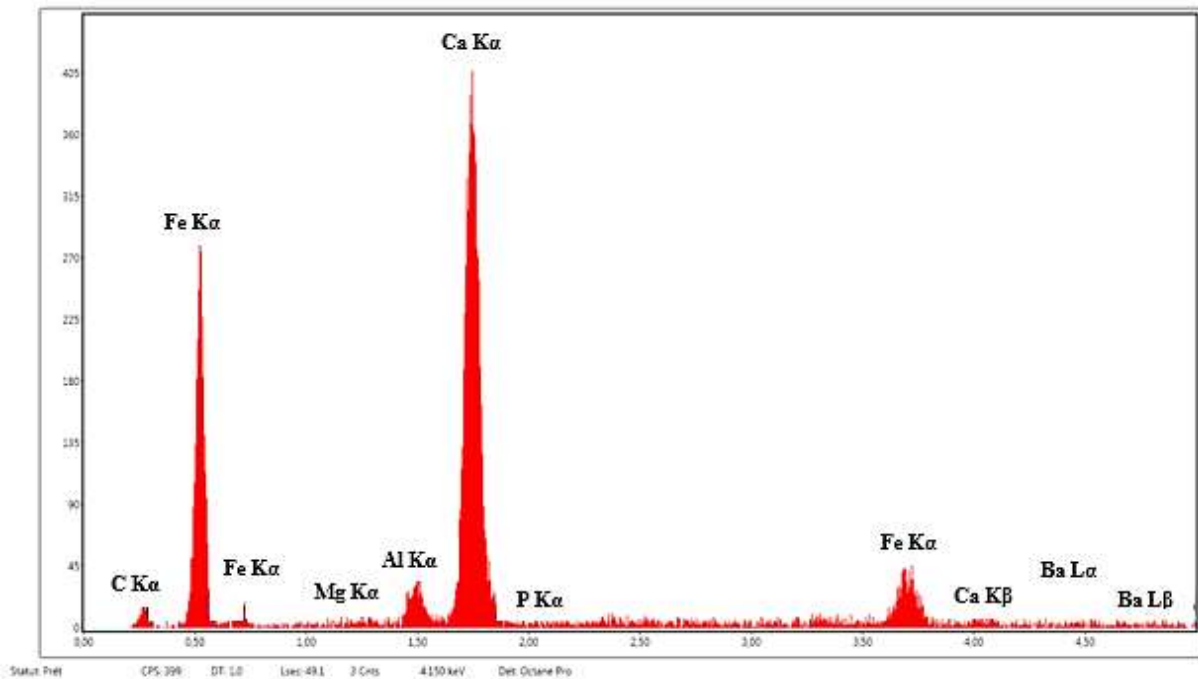
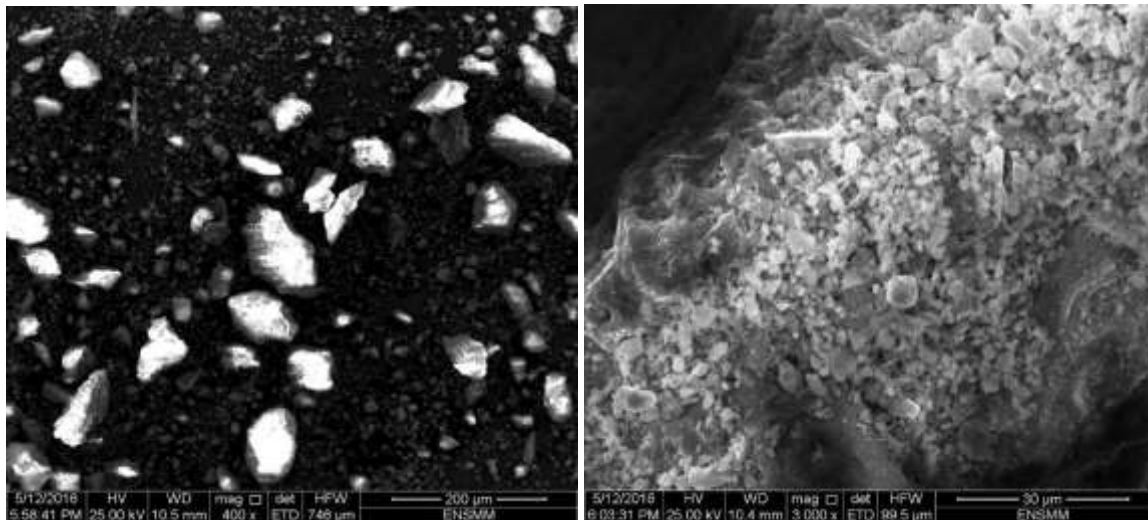


Figure III.12. :Observation par microscope électronique à balayage d'un échantillon des stériles francs de la mine de Boukhadra (a : X 400, b : X 3000) et les spectres associés [21]

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 III.13. : Vue à la loupe binoculaire de la classe $-1 + 0,5$ mm.



Figure III.14. : Vue à la loupe binoculaire de la classe $-0,5 + 0,25$ mm.



Figure III.15. : Vue à la loupe binoculaire de la classe $-0,25 + 0,125$ mm.

III.4.4. Analyse granulo-chimique du minerai et du rejet :

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 [29].



Figure III.16. : Analyseur FX (Pete, P., 2010) [38].

Exemple de la détermination de la composition chimique des stériles francs de la mine de fer de Boukhadra :

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 III.3 [21].

Tableau III.3.: Analyse granulo-chimique des stériles francs de la mine de Boukhadra [21].

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 III.17 montre l'évolution des teneurs des principaux éléments chimiques qui constituent les stériles francs de la mine de Boukhadra en fonction de leur diamètre [21].

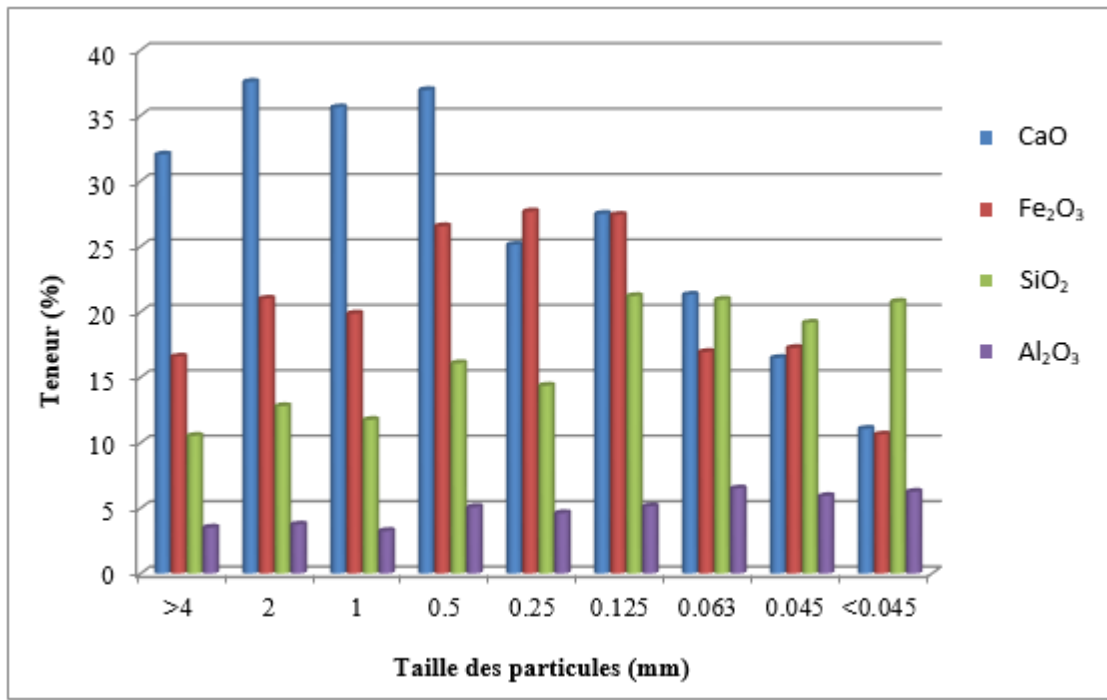


Figure III.17. : Evolution des teneurs des principaux éléments chimiques qui constituent les stériles francs de la mine de Boukhadra en fonction de la granulométrie [21].

III.4.4.1 Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra

La composition chimique des déchets miniers de Boukhadra donnée dans le tableau III.4 a été réalisée par l'analyseur FX dans CETIM -Boumerdès[21].

Tableau III.4: Analyse chimique des déchets miniers de Boukhadra [21].

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% $Fe_2 O_3$; 21,14% de SiO_2 ; 8,22% de CaO et 3,61% de $Al_2 O_3$. Le calcaire est constitué de 49,87% de CaO et 5,62 % $Fe_2 O_3$. La marne jaune est composée de 46, 26% de SiO_2 ; 18,45 % de CaO et de 10,04% de $Fe_2 O_3$ contre 34,45% de SiO_2 et de 8,46% de $Fe_2 O_3$ dans la marne grise.

III.4.5. 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 [30].

La figure III.18 montre les principaux éléments constitutifs d'un spectromètre d'absorption atomique du laboratoire de type Shimadzu AA 6800.

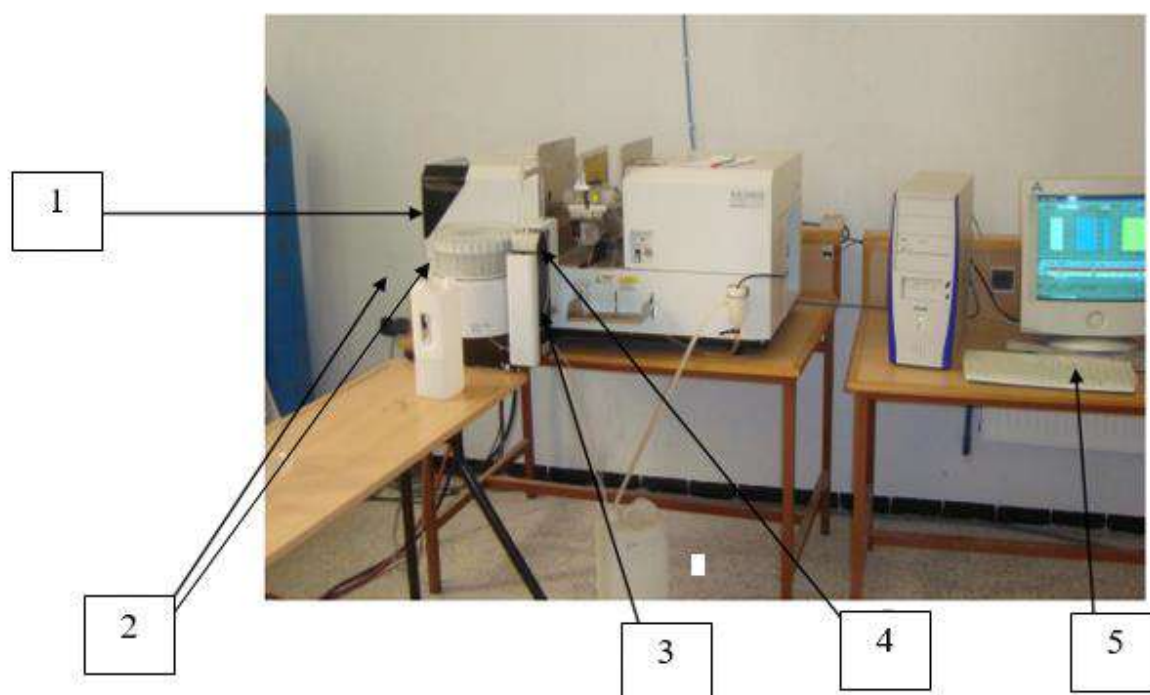


Figure III.18. : Spectromètre d'Absorption Atomique [21].

- 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

Exemple d'analyse par SAA des déchets minier de la mine de Boukhadra :

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 III.4

Tableau III.5: Analyse par Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA) des déchets miniers de la mine de Boukhadra [21].

Elément (%) Echantillon	Ni	Cu	Zn	Pb
Stériles francs (Mg/l)	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 [21].

III.5. Conclusion :

Le présent chapitre décrit les différentes méthodes qui ont été utilisées pour la caractérisation physico chimique du minerai de fer et des déchets miniers de Boukhadra.

Cette caractérisation nous a permis de déterminer la composition minéralogique du minerai et de rejet de traitement 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 [3].

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

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), ils sont constitués de calcaire, d'hématite, de marnes jaunes et grises.

La caractérisation physico chimique des rejets miniers nous montre la prédominance des métaux lourds tels que le Zn, Cu, Ni.

La granulométrie a pour but d'étudier la taille des particules du sol mais aussi leurs répartitions. Il existe ainsi plusieurs classifications granulométriques dans les rejets de minerai de fer.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographique :

[1] ABDELOUAFI Besma Amani, RECHACHI Soumia (2015-2016) Caractérisation et choix d'une méthode de traitement de minerai de fer sidéritique de l'Ouenza- Tébessa, mémoire Université LARBI TEBSSI.

[2] BEN YOUCEF Ali Ahmed, MANSOURI Amir (2015-2016) Proposition d'une méthode d'exploitation à ciel ouvert pour les réserves programmées en souterrain du gisement de fer de Boukhadra Université LARBI TEBSSI.

[3] Bamber, A. S. (2008). Integrated mining, pre concentration and waste disposal system for the increased sustainability of hard rock metal mining. Thèse de Doctorat. University of British Columbia, (Vancouver).

[4] 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, Vandoeuvreles-Nancy, INPL.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Bouabida, H. (2014). Inventaire des moustiques de la région de Tébessa et bio activité du spiromesifène sur la reproduction de *Culiseta longiareolata* et *Culex pipiens* : aspects écologique et biochimique. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba (Algérie).

[8] 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. 50ème. SELF.

- [9] 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.
- [10] Bouzenoune, A., et Lécolle, P. (1997). Petrographic and geochemical arguments for hydrothermal formation of the Ouenza siderite deposit (NE Algeria). *Mineralium Deposita*, 32(2).
- [11] BRGM. (1997). Les résidus miniers français : typologies et principaux impacts environnementaux potentiels. Rap. R39503.
- [12] BRGM (2001). Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union.
- [13] Calmet D. (2014). La gestion durable de l'eau : les normes, un outil indispensable. Eau,
- [14] 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).
- [15] 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.
- [16] 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*.
- [17] Marie Loustau Cazalet. Caractérisation physico-chimique d'un sédiment marin traité aux liants hydrauliques: Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques. INSA de Lyon, 2012. Français.

- [18] AYADI Brahim (2009-2010)Caractérisation et choix d'un schéma de Traitement du minerais cuivre-fer de Douamis (Ouenza). Mémoire magister.Université Badji Mokhtar-Annaba
- [19] Charbonneau, P. (2014). Analyse des pratiques de valorisation des rejets miniers.Thèse de Doctorat.
- [20] C.N.T.P.P "Centre National des Technologies de Production plus Propre", (2014),ArcelorMittal Tébessa, mine de fer de Boukhadra. Rapport.
- [21] ROUAIGUIA Issam. (2018) Contribution à l'étude d'une valorisation des déchets miniers, cas des stériles francs de la mine de Boukhadra- Tébessa, thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba.
- [22] Yassine Taha. (janvier 2017), Valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites: évaluations technique et environnementale thèse du doctorat. Université Cadi Ayyad, Maroc.
- [23] Sylvie Brassard B. Sc. Géologie (septembre 1993). Évaluation du potentiel acidogène de divers rejets miniers par une méthode bio-cinétique Mémoire. l'Institut National de la Recherche Scientifique(INRS-Eau)Université du Québec.
- [24] Rébecca Pelletier- Allard (juin 2014), Caractérisation du drainage minier acide par une dolomie à haute pureté, Université de Sherbrooke.
- [25] Itard Y., Bosc R. (2001). Traitements et préventions des drainages acides provenant des résidus miniers. Revue bibliographique. BRGM/RP-50829-FR.
- [26] Dworzanowski, M. (2010). Optimizing the performance of wet drum magnetic separators. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy,110(11).

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

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

[29] Gomes, R. B., Tomi, G. D., et Assis, P. S. (2015). Impact of quality of iron ore lump on sustainability of mining operations in the Quadrilátero Ferrífero Area. Minerals Engineering.

[30] 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.

Résumé

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. 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, minerai de fer, traitement du minerai

Abstract

The Boukhadra mine uses a combined mining method (open pit and underground) characterized by mountainous relief. It exploits hematite-type iron ore with an average content of 50%, on the other hand, it generates thousands of tons of mining waste in waste rock each year, which are deposited near the mining village located downstream of the mine. However, these mining discharges can harm the environment and in particular human health, which requires urgent solutions. To solve this environmental problem, integrated management through the recovery of mining waste is required on the one hand to reduce the volume of stocks and on the other hand to minimize their environmental impacts. 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 waste, iron ore, mining treatment

ملخص

يستخدم منجم بوخضرة طريقة استغلال مشتركة (حفرة مفتوحة و تحت الارض) و يتميز بالتضاريس الجبلية، هذا المنجم يستغل خام الحديد (الهيمايتيت) بمعدل متوسط يزيد عن 50 بالمائة ، و في 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 حلولا عاجلة، و لحل هذه المشكلة البيئية، التسيير المتكامل عن طريق تثمين النفايات المنجمية مطلوب من جهة من أجل تخفيض حجم المخزونات و من ناحية أخرى للحد من أثارها البيئية. إن التثمين والإدارة المتكاملة للنفايات المنجمية هما مصدر قلق رئيسي للصناعة المنجمية الجزائرية

الكلمات المفتاحية: منجم حديد ، بوخضرة ، مخلفات التعدين ، خام الحديد ، معالجة التعدين