

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane  
Mira de Bejaia  
Faculté de Technologie  
Département des Mines et géologie



# Memoire de Fin d'Etudes

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de master en Génie  
Minier

Option : Valorisation des ressources minérales

Thème

---

## ESSAI D'ENRICHISSEMENT DU MINERAI DE FER DE GARA DJEBILET (TINDOUF-ALGERIE) PAR SEPARATION MAGNETIQUE ET LIXIVIATION

---

Présentée par:

**MENTA Abderrahmene**

**HASSAINE Ouahab**

Devant le jury :

**Président : Mme BOUNAB. Samia**

U.A.M. B

**Promoteur: Mr AYADEN Brahim**

U.A.M. B

**Examineur : Mme SOUCI Zahia**

U.A.M. B

Année universitaire : 2020-2021

*Ce n'est pas parce que les choses sont  
difficiles que nous n'osons pas, c'est parce  
que nous n'osons pas qu'elles sont  
difficiles.*

*(Sénèque)*





## **Dédicaces**

On dédie ce modeste travail de mémoire de fin d'étude en mines et géologie à:

- \* A nous même
- \* A nos familles et parents
- \* A nos enseignants
- \* A nos amis et camarades

## Remerciements

Le présent manuscrit, qui est le fruit de cinq longues années d'études, n'aurait jamais vu le jour, si ce n'était l'assistance, la collaboration et la contribution de plusieurs personnes qui ont œuvré et veillé à ce qu'il s'achève et prenne cette forme. Il nous est bien agréable de leur adresser nos remerciements et ce n'est pas avec ces quelques termes, si vénérables soient-ils, que nous arriverons à leur rendre hommage ni leur avouer reconnaissance et gratitude.

La première personne à qui nous adresserons en premier, c'est Monsieur **AYADEN Brahim** nous tenons à le remercier sincèrement en tant que promoteur de mémoire et un grand Monsieur qui, s'est toujours montré à l'écoute.

Nous exprimons aussi nos profondes considérations à Mesdames les membres du jury: Madame **SOUICI Zahia** examinatrice de notre travail et la présidente de notre soutenance Madame **BOUNAB. Samia** pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre travail et nous avoir fait l'honneur de l'examiner.

On ne saurait oublier tous nos collègues, enseignants, du département des Mines et Géologie de l'université A-mira- bejaia, pour leurs Encouragements et soutien.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Merci à tous et à toutes



## Table des matières

LISTE DES TABLEAUX.....	I
LISTE DES FIGURES.....	III
DEDICACES.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
1.INTRODUCTION GENERALE.....	01

### CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES MINERAIS DE FER.

I.1.Introduction.....	03
I.2 Origines des minerais de fer.....	03
I.2.1 Processus de formation de fer .....	03
I.2.2. Processus physiques .....	04
I.2.3. Processus chimiques.....	05
I.3.La métallurgie de fer.....	05
I.4 Type Des Gisements de fer.....	06
I.4.1 Gisements sédimentaires.....	06
I.4.2 Gisements ignés .....	07
I.4.3 Gisements hydrothermales .....	07
I.4.4 Gisement enrichissement surfacique.....	08
I.5. Types des mineraux de fer .....	08
I.6. Fer oolithique .....	12
I.7.Conclusion.....	12

### CHAPITRE II :LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILET

II.1.Introduction.....	13
II.2.Généralité sur le minerai de fer de Gara Djebilet.....	13
II.3. Situation Géographique.....	14
II.4. La géologie de la région.....	15
II.4.1 Bassin de Tindouf.. ..	15
II.2.2 Gisement de fer de gara djebilet.....	16
II.2.2.1. Le Carbonifère .....	17
II.2.2.1.1 Le Carbonifère marin.....	17
II.2.2.1.2 .Carbonifère continentale.....	17
II.4.3 . la position de gisement de Gara Djebilet.....	18
II.5. Formation de gisement.....	19....
II.6. Minéralisation .....	19
II.6.1 Caractéristiques minéralogiques.....	20

II.7. Essais de valorization et d'enrichissement.....	20
II.7.1.Principaux résultats obtenus.....	21
II.7.1.1. Enrichissement du minerai.....	21
II.7.1.2. Agglomération et pelletisation.....	22
II.7.2. Elaboration de l'acier .....	23
II.7. Conclusion .....	24

## **CHAPITRE III:APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE**

III.1.Introduction .....	25
III.2. La lixiviation.....	25
III.2.2.Techniques de lixiviation .....	26
III.2.2.1 Lixiviation par percolation .....	27
III.2.2.2. Lixiviation par agitation .....	27
III.2.2.3. Lixiviation sous pression.....	28
III.2.3. Types de lixiviation .....	28
III.2.3.1. Lixiviation chimique .....	29
III.2.3.2. Lixiviation bactérienne.....	29
III.2.4. Paramètres de lixiviation .....	31
III.2.5. Cinétique de lixiviation .....	32
III.3. Séparation magnétique .....	32
III.3.1. Principe de séparation magnétique.....	33
III.3.2. Théorie de séparation magnétique.....	33
III.3.3. Types de séparation magnétique .....	33
- A-Séparation magnétique à basse intensité (SMBI) .....	33
-B- Séparation magnétique à haute intensité (SMHI) .....	34
-C- Séparation magnétique à haut gradient du champ.....	34
-D-Séparation magnétique par voie sèche .....	34
-E- Séparation magnétique par voie humide .....	34
III.4.Conclusion.....	35

## **CHAPITRE IV:ENRICHISSEMENT DU MINERAI DE FER DE GARA DJEBILET**

IV.1.Introduction :	36
IV.2. Expérimentale :	36
IV.2.1. Préparation mécanique de l'échantillon :	36
IV.2.1.1. Concassage :	36
IV.2.1.2 Broyage :	37
IV.2.1.3 Analyse granulométrique par tamisage :	37
IV.2.2. Les essais d'enrichissement réalisé :	38
IV.2.2. 1. Grillage :	38

IV.2.2.2. séparation magnétique :.....	39
IV.2.2.3. Grillage et séparation magnétique :.....	40
IV.3. Lixiviation.....	40
IV.3.1.Réactifs utilisés .....	40
IV.3.2. Mode opératoire .....	41
IV.4.Caractérisation minéralogique et chimique.....	42
IV.4.1.Analyse par fluorescence des rayons X (FX).....	42
IV.4.2.Analyse par Diffraction à rayon X (DRX) .....	42
IV.5.Résultats et discussion.....	42
IV.5.1.Résultats de l'Analyse par fluorescence des rayons X (FX).....	42
IV.5.2.Résultats de l'Analyse par Diffraction à rayon X (DRX) .....	43
IV.5. 3.Résultats de grillage magnétisant.....	43
IV.5. 2.Résultats de séparation magnétique (avant et après grillage magnétisant) <b>Erreur</b>	<b>!</b>
<b>Signet non défini.</b>	<b>45</b>
IV.5. 3.Résultats de lixiviation .....	49
IV.5.4.Discription des résultats de la lixiviation .....	55
IV.6.Conclusion :.....	55
Conclusion générale.....	56
Références bibliographie.....	58

Résumé.

Abstract.

# LISTE DES TABLEAUX

---

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I

#### GENERALITES SUR LES MINERAIS DE FER

<b>Tableau .I.1.</b> Caractéristiques des différents types des minerais de fer .....	4
--	---

### CHAPITRE IV

#### ENRICHISSEMENT DU MINERAI (GDJ) PAR SEPARATION MAGNETIQUE ET LIXIVIATION

<b>Tableau IV. 1.</b> Résultats de la FX de l'échantillon (A).....	43
<b>Tableau IV. 2.</b> Résultats de la séparation magnétique de l'échantillon (D).....	45
<b>Tableau IV. 3.</b> Résultats de la séparation magnétique de l'échantillon (E) .....	46
<b>Tableau IV. 4.</b> Résultats de la FX de l'échantillon (B).....	49
<b>Tableau IV. 5.</b> Résultats de la FX de l'échantillon (C).....	50
<b>Tableau IV. 6.</b> Résultats de la FX de l'échantillon (D).....	51
<b>Tableau IV. 7.</b> Résultats de la FX de l'échantillon (E) .....	53

# LISTE DES FIGURES

---

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

#### GENERALITES SUR LES MINERAIS DE FER

<b>Figure I. 1.</b> Minerai d'hématite spéculaire.....	9
<b>Figure I. 2.</b> Minerai de limonite jaune.....	9
<b>Figure I. 3.</b> Minerai de goethite.....	10
<b>Figure I. 4.</b> Minerai d'ilménite .....	10
<b>Figure I. 5.</b> Minerai de magnétite .....	11
<b>Figure I. 6.</b> Minerai de pyrite .....	11
<b>Figure I. 7.</b> Minerai de siderite .....	12

### CHAPITRE II

#### GISEMENT DE GARA DJEBILET

<b>Figure II.1.</b> Situation géographique du champ du bassin de Tindouf.....	14
<b>Figure II.2.</b> : Situation géographique du gisement de fer de Gara Djebilet.....	15
<b>Figure II. 3.</b> Emplacement du Bassin de Tindouf et les principaux dépôts de roches.....	16
<b>Figure II.4.</b> le carbonifère de gisement de Gara Djebilet .....	17
<b>Figure II.5.</b> la position les trois lentilles (parties) de gisement de fer de Gara Djebilet .....	18
<b>Figure II. 6.</b> Vue générale du gisement de fer, Gara Djebilet.....	20

#### ENRICHISSEMENT DU MINERAI (GDJ) PAR SEPARATION

#### MAGNETIQUE ET LIXIVIATION

<b>Figure IV. 1:</b> Echantillon représentatif de fer oolitique de GDj.....	36
<b>Figure IV. 2:</b> Echantillon après concassage .....	37
<b>Figure IV. 3:</b> Concasseur a mâchoire.....	37
<b>Figure IV. 4:</b> Broyeur à disques de laboratoire .....	37
<b>Figure IV. 5:</b> Charbon naturel (coke).....	39
<b>Figure IV. 6:</b> Four a moufle d'une capacité de 1300C° .....	39
<b>Figure IV. 7:</b> Séparateur magnétique a base intensité.....	39
<b>Figure IV. 8:</b> Agitateur magnétique .....	41
<b>Figure IV. 9:</b> Presse hydraulique.....	41
<b>Figure IV. 10:</b> Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (A).....	43
<b>Figure IV. 11:</b> Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (B).....	44
<b>Figure IV. 12:</b> Diffractogramme par rayon X de l'échantillon C) .....	45
<b>Figure IV. 13:</b> Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (D).....	46
<b>Figure IV. 14:</b> Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (e).....	47
<b>Figure IV. 15:</b> Histogramme des éléments majeur de chaque échantillon.....	48
<b>Figure IV. 16:</b> Résultat d'analyse chimique par FX de l'échantillon brut .....	49
<b>Figure IV. 17:</b> Résultat d'analyse chimique FX de l'échantillon (C) après grillage a 900°C .....	51
<b>Figure IV.18:</b> Résultat d'analyse chimique par FX de l'échantillon (D) après séparation magnétique a basse intensité .....	52

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure IV.19:</b> Résultats d'analyse chimique par FX de l'échantillon (E) après grillage et séparation magnétique.....	53
--	----

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'Algérie est un pays de Nord de l'Afrique avec une Bande côtière vers 1300Km et ,avec une surface près de 3millions de Km<sup>2</sup> ,c'est un pays riche en surface par les différents types de végétations et animales et en sub-surface par les différents types des trésors miniers et les hydrocarbures ,le Sahara algérien représente plus 70% de la Totalité de la surface et le sous-sol de Sahara algérien cache les différents types des métaux et minéraux en plus des hydrocarbures .

En dohrs des hydrocarbures , le fer est. l'une des principes richesses minérales de l'Algérie. L'exploitation des gisements de minerai de fer a toujours eu une place preponderant dans l'industrie extractive du pays .Le traitement des minéraux peut être considéré comme l'ensemble des procédés et techniques de préparation, de séparation et de purification d'espèces minérales ou d'éléments chimiques précieux, à partir d'une matière première, pour obtenir un concentré industriellement utilisable [1].

La lixiviation des minéraux est une méthode appliquée pour récupérer des métaux précieux à partir de minerais. L'utilisation de l'acide chlorhydrique pour la dissolution d'un minerai de fer aboutit généralement à une solution à forte concentration de fer ferrique .Le fer de la solution de lixiviation est important dans l'hydrométallurgie. L'élimination ou la récupération à partir d'une solution riche en chlorure peut être effectuée par précipitation ou par des techniques d'extraction au solvant [2].

Le minerai de fer de Gara Djebilet en Algérie a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des divers bureaux d'études, qui ont abouti à des résultats différents. Pourtant, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés et/ou sont en cours dans le monde, notamment dans les pays disposant de gisements de minerai de fer oolitiques similaires à celui de Gara Djebilet. Ces gisements présentent un certain nombre de caractéristiques complexes qui rendent inadéquates les méthodes traditionnelles de valorisation du minerai de fer. La concentration faible de fer et les teneurs relativement élevées de phosphore et de silice rendent les techniques traditionnelles inutilisables [3,4]. À ce jour, aucun procédé de déphosphoration du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet n'a montré une fiabilité et une efficacité permettant son enrichissement définitif.

## INTRODUCTION GENERALE

---

A travers cette modeste étude d'enrichissement du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet, une tentative d'application de la lixiviation en combinaison de la séparation magnétique, sous différents paramètres et conditions expérimentales, à savoir : la granulométrie ( $-63\mu\text{m}$ ), le grillage magnétisant à  $900^{\circ}\text{C}$  et les concentrations de l'agent lixiviant .

Pour ce faire, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est basé sur la bibliographie et les généralités sur les minerais de fer ; définitions, classification, origines et formations géologiques des gisements, dont une importance particulière est donnée aux minerais de fer oolithique.

Le second chapitre est consacré à la présentation du gisement de Fer du Gara Djebilet ; de point de vue générale , sa situation géographique et géologique.

La théorie des procédés et méthodes d'enrichissement appliqué dans le cadre de ce travail est présentée au troisième chapitre.

Le dernier chapitre concerne la partie expérimentale, où il est traité ; la caractérisation, les protocoles d'essais expérimentaux et l'exposition des résultats et leurs interprétations. Le mémoire se termine par une conclusion générale avec des recommandations et perspectives.

## **I.1.Introduction**

Le fer est l'élément parmi les éléments les plus abondants dans la nature, il constitue 4,7 % en masse de la croûte terrestre. On ne le trouve pas comme élément natif ou sous forme métallique ou à l'état pur à la surface terrestre par contre on le trouve généralement en combinaison avec d'autres éléments, soit sous forme d'oxyde, soit sous forme d'un sulfure.[5]

Nous collectons des informations sur les conditions géologiques et minières pour répondre à une question afin de mieux comprendre les généralisations sur le minerai de fer et le fer oolithique.

Ce chapitre fait donc l'objet d'un bref aperçu sur les généralités du minerai de fer et estimation de l'importance de cette matière naturelle dans l'industrie, les types du minerai de fer en fonction des éléments accompagnons, l'origine du minerai de fer, et son processus de formation, les types de gisements, une brève description sur le fer oolithique, on finira ce chapitre par une conclusion du chapitre.

## **I.2 Origines des minerais de fer**

### **I.2.1 Processus de formation de fer**

Lors de la formation naturelle du minerai de fer, il se produit des couches des oxydes de fer qui sont disposées avec des couches riches en silice partiellement décomposée, ce qui présente un minerai de fer de faible teneur.[5]

La formation d'un gisement du minerai de fer peut être liée à:

- Sédimentation directe
- Activité ignée (volcanique)
- La désagrégation à la surface ou proche (Métamorphique).

Le (tableau I.1) présente le processus de formation géologique ainsi que le type du minerai de fer obtenu avec ces principaux minéraux.[6]

# CHAPITRE I:GENERALITE SUR LE MIENERAI DE FER

**Tableau I.1.** Caractéristiques des différents types des minerais de fer [7]

Type	Teneurs	Couleur	Observation
<b>CARBONATES</b>			
Sidérite (FeCO <sub>3</sub> )	48,20% fer 37,99% CO <sub>2</sub> 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
<b>SILICATES</b>			
Chamosite, Stilpnomelane Greenalite, Garniérite.			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. Les minerais de ce type, bien que d'une importance assez limitée en tant pour la production de minerai de fer, présentent un certain intérêt en tant que source de minerais oxydes.
<b>SULFURES</b>			
Pyrite (FeS <sub>2</sub> )	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivre	Cette roche est souvent connue sous le nom d'or des fous du fait de sa grande ressemblance avec l'or. Elle est la roche contendante du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer qu'elle contient mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est le sous-produit le plus communément extrait.
Marcassite (FeS <sub>2</sub> )	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivre	Très proche de la pyrite, de même composition chimique mais de forme cristalline différente.

## I.2.2. Processus physiques

Le minerai de fer diffère selon les facteurs climatiques comme le Niveau et le degré de la température et le niveaux de la pression atmosphérique, le fer se présente sous plusieurs formes allotropiques. Dans les conditions normales de pression et de température, c'est un solide cristallin avec une structure cubique centré (fer  $\alpha$  ou ferrite) ; à partir de 912 °C, il devient cubique, a faces centrées (fer  $\gamma$  ou austénite). Au-delà de 1394 °C, il redevient cubique centré (fer  $\delta$ ). Il fonda 1535 °C. La transformation en Fe $\epsilon$  (structure hexagonale compacte) ne se rencontre qu'à des

# CHAPITRE I:GENERALITE SUR LE MIENERAI DE FER

---

pressions supérieures à 110 kilos bars. Le fer est ferromagnétique : les moments magnétiques des atomes s'alignent sous l'influence d'un champ magnétique extérieur et conservent leur nouvelle orientation après la disparition de ce champ. Des courants de convection riches en fer liquide dans la couche externe du noyau terrestre (noyau externe) sont supposés être à l'origine du champ magnétique terrestre. S'il est exposé à l'air libre soumis dans l'eau salée, il rouille et s'il n'est pas entretenu, il va progressivement se dégrader jusqu'à ce que plus rien ne reste de son état solide naturel.[4]

## I.2.3. Processus chimiques

Laissé à l'air libre en présence d'humidité, le fer métal se corrode en formant de la rouille  $Fe_2O_3$ . La rouille étant un matériau poreux, la réaction d'oxydation peut se propager jusqu'au cœur du métal, contrairement, par exemple, à l'aluminium, qui forme une couche fine d'oxyde imperméable. En solution, il présente deux valences principales

- $Fe^{2+}$  (le fer ferreux) qui présente une faible couleur verte.
- $Fe^{3+}$  (le fer ferrique) qui possède une couleur rouille caractéristique.

Le fer ferrique ( $Fe^{3+}$ ) peut être réduit par du cuivre métallique, par exemple, réaction à l'origine du procédé de gravure des circuits imprimés par le trichlorure de fer,  $FeCl_3$ . [4]

## I.3. La métallurgie de fer

La microstructure d'un acier est déterminée par la composition chimique et le traitement thermomécanique appliqué pendant le processus de fabrication. On distingue trois types d'aciers en fonction de leur teneur en carbone :

Tout d'abord les aciers hypo-eutectoïdes qui contiennent jusqu'à 0,77 % de carbone et sont malléables. Puis les aciers eutectoïdes à 0,77 % de carbone. Et enfin les aciers hypereutectoïdes supérieurs à 0,77% de carbone.

La microstructure d'un acier dépend aussi du traitement thermique qui lui confère des phases. On en distingue trois : inférieure à 912 °C, de 912 à 1394 °C et supérieure à 1394 °C.

## I.4 Types De Gisements de fer

D'après le mode de formation d'origine des gisements du minerais de fer et les factures météoriques et environnementales en plus des éléments accompagnons et accessoires, on peut classerles gisements du minerai de fer en quatre catégories, cités comme suit :gisements sédimentaires, gisements ignés, gisement enrichissement surfacique; et Gisements hydrothermales [8] :

### I.4.1 Gisements sédimentaires

Ils présentent les ressources plus exploitées au monde. Ils comportent des couches des sédiments riches en fer et silice et des roches méta-sédimentaires principalement composées des grains grossiers ou fines de quartz et des oxydes de fer, carbonates ou silicates.[9]

La formation sédimentaire du minerai de fer est généralement formée par une variété des environnements marins et rarement des marécages continentaux.[10]

Les gisements de fer rubané (BIF) sont presque exclusivement de la période précambrienne (il y a 1,8-2,6 milliards d'années). Ils sont des roches sédimentaires métamorphosés et se composent généralement des minéraux de fer à couche minces et de silice (quartz). Le fer se résulte peut-être de la sidérite carbonatée.[11]

» Les gisements de fer rubané BIF sont classés en deux types :

- Le type supérieur qu'est formé près de la coté de plateforme continentale en association avec la dolomite, quartzite et schiste argileux.
- Le type algoma (roches sédimentaires d'origine chimique de l'Archéen constituées d'une alterance de minéraux riches en fer et chert) est toujours associé aux ceintures de roches vertes de l'Archéen. Ces gisements sont les plus anciens, les plus nombreux mais de plus petite taille, qui est associé avec les activités volcaniques.[12]

» Les gisements sédimentaires oolitiques sont des roches de fer oolitiques massives stratiformes dans des sédiments calciques terrigènes. Ils sont âgés de protérozoïque au crétacé et étaient une source importante de minerai avant 1970, de mauvaise qualité avec une teneur (30-50% Fe) en relation avec les dépôts de BIF (55-65% Fe).[13]

Deux types sont identifiés :

# CHAPITRE I:GENERALITE SUR LE MIENERAI DE FER

---

- Le type Clinton qui comporte des minéraux profonds de couleur rouge à violet composé d'hématite, sidérite et chamosite.
- Le type minette qui comporte des minéraux brunâtres à brun verdâtre foncé, composé principalement de sidérite ou minéraux silicatés.

Ces gisements sont formés dans un environnement marin peu profond et accumulé le long des marges continentales passives pendant les périodes de flux monter et descendre, extension et le changement de niveau global de la mer.[14]

## I.4.2 Gisements ignés

Il y a deux types de formation :

- La ségrégation magmatique d'une fonte riche en magnétite non miscible en association avec des couches intruses mafiques-ultramafiques ; Ils se produisent sous forme des coutures massives cumulé-texturales souvent minés pour leurs concentrations économiques en Titane et/ou vanadium (ex : Complexe de Bushveld, L'Afrique du sud).[5]

- L'injection des fluides riches en magnétite dans les roches encaissantes (ex : skarns de fer). Les skarns de fer (ou dépôts métasomatiques) sont principalement dérivés de granitique à l'intrusivemafique et peut héberger dans une variété des types des roches.

Ces dépôts sont massifs, d'une forme irrégulière à tabulaire qui continue pour être une accumulation dans plusieurs pays (ex : Pérou et Russie)[13].La concentration minérale dans les roches ignées se produit comme des flux distinctifs dans les successions volcaniques ou comme des couches dans le magma qui est refroidi au niveau profond de l'écorce terrestre.[15]

## I.4.3 Gisements hydrothermales

La formation de ce type se déroule par la circulation des solutions aqueuses chauffées riche en fer d'origine magmatique, métamorphique ou sédimentaire. Ces gisements se forment sur la base de la plupart des oxydes de fer-Cuivre-Or .Les gisements hydrothermaux sont composés essentiellement de magnétite-hématite qui ont remplacés les roches para ou diamagnétique (ex : minerai de fer de Kiruna-Suède). Ces gisements usuellement possèdent une signature magmatique et les roches de mur adjacent sont généralement intensément altérés. L'hématite porte les veines de quartz au sein des zones faussées qui sont aussi une partie de ce groupe.[16]

## I.4.4 Gisement enrichissement surfacique

Résultent du processus d'érosion subaérienne, généralement de pourtour ferrugineux de faible teneur, communément BIF. L'érosion des minéraux inertes durs ou denses se produit dans une roche au niveau de la surface ou proche de ceux-ci, pour survivre l'érosion chimique et transporter dans les systèmes hydrogéologiques et reconcentrer dans les différents environnements.

L'enrichissement implique la lixiviation de la partie supérieure d'un dépôt minéral (zone d'oxydation) et ré-déposition des minéraux ferreux dans le niveau inférieur (zone d'enrichissement secondaire ou super gène). L'hématite terreuse et les oxy-hydroxydes de fer tel que la Goethite, limonite et lépidocrocite qui sont les minéraux principaux qui sont produit lors du processus d'enrichissement surfacique ou proche-surfacique.[13]

## I.5. Types des minéraux de fer

L'industrie sidérurgique, et la variété des produits proposés sont les indices qui présidait à la mise en œuvre d'une technique fort complexe expliquent une terminologie des substances ferrifères naturelles tout à la fois riche et généralement peu précis. Il est certain que les types de minerais les plus fréquemment rencontrés sont bien définis, souvent même on connaît le sens de variation de certains de leurs paramètres. Les espèces minéralogiques constituant la masse essentielle des minerais de fer sont peu nombreuses et assez différenciées du point de vue physique pour être aisément reconnues.

Une classification pratique s'est donc naturellement mise en place, fondée sur l'espèce ferrifère dominante. Elle donne globalement une indication sur plusieurs caractéristiques du minerai : dureté, porosité, teneur en fer, teneur en produits volatils.[13]

- **Hématite**

L'hématite (figure I.1) est un oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de couleur rouge ou fer oligiste qui est caractérisé par son eau de lavement, très tachant pour les vêtements. C'est le type de minerai le plus utilisé au niveau industriel et aussi le plus répandu. [17]



**Figure I. 1.**Minéral d'hématite spéculaire

- **Limonite**

La limonite (figureI.2)est à la fois oxyde et hydroxyde de fer, elle a une couleur de rouille ou jaune. Elle est abondante dans les minerais oolithiques. Les deux principaux minéraux dont fait partie la limonite est la goethite et la lépidocrocite. Notons que ce minerai n'est plus utilisé aujourd'hui dans les industries sidérurgiques car il contient du phosphore.[17]



**Figure I. 2.**Minéral de limonite jaune

- **Goethite**

La goethite est un hydroxyde de fer ( $\text{FeO-OH}$ ) de couleur brune, jaunâtre ou noire. Elle fait partie de la famille de la limonite. On rencontre souvent la goethite associée à l'hématite, la goethite se transforme d'ailleurs en hématite si elle est chauffée(voir la figure I.3). C'est pourquoi lorsque la quantité est suffisante ce minerai peut être exploité commercialement.[17]



**Figure I. 3.**Minéral de goethite

- **Ilménite**

L'ilménite (figureI.4)est un oxyde de fer et de titane ( $\text{FeTiO}_3$ ) très répandu dans la région d'Havre St-Pierre-Canada, localité située sur la Côte Nord Québécoise. Ce type de minerai est important pour l'extraction du titane. Sa poudre est de couleur noir et elle n'est pas magnétique contrairement à l'hématite et la magnétite. L'on retrouve deux types principaux d'ilménite, celle contenant du manganèse porte le nom de pyrophanite et celle contenant du magnésium geikelite.[17]



**Figure I. 4.**Minéral d'ilménite

- **Magnétite**

La magnétite est un oxyde de fer ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Ce type de minerai possède des propriétés magnétiques exceptionnelles et est abondant sur le pôle nord du globe terrestre(voir la figureI.5). La magnetite est un très bon minerai de fer.[17]



**Figure I. 5.**Minéral de magnétite

- **Pyrite**

La pyrite est un sulfure de fer ( $\text{FeS}_2$ ) appelée "or des fous" à cause de sa grande ressemblance à l'or. On utilise la pyrite pour l'extraction du soufre qu'elle contient (53.5% de soufre) et pour la production d'acide sulfurique. La pyrite nécessite une conservation dans des endroits secs, en présence d'humidité elle se désagrège en acide sulfurique et en oxyde de fer (Figure I.6). Cette pierre produit de l'anhydride sulfurique si elle est chauffée, elle ne respire jamais la vapeur qui est dégagée.[17]



**Figure I. 6.**Minéral de pyrite

- **Sidérite**

La sidérite (figure I.7) est un carbonate de fer ( $\text{FeCO}_3$ ) de couleur gris pâle ou jaune pâle. Elle devient brune ou noire en présence d'humidité. Elle contient 62% de fer et 38% de gaz carbonique. La sidérite est rarement pure à l'état naturel, on la rencontre le plus souvent avec le titane ou le nickel. Lorsque le minerai du fer est concentré il contient peu d'impureté, peut être exploité commercialement. La sidérite devient magnétique lorsqu'elle est chauffée et s'altère en limonite ou goethite.[17]



**Figure I. 7.**Minéral de sidérite

## **I.6. Fer oolithique**

Les minerais de fer oolithiques possèdent des grains à structure concentrique dont l'accumulation peut conduire à la formation d'un sédiment ou d'une roche purement oolithique, appelée anciennement oolithe par extension. Surtout abondantes dans le Jurassique, en Europe, les oolites sont connues du début du Paléozoïque à nos jours. Ces grains, généralement petits et sphériques à ovoïdes (de 0,5 à 2 mm de diamètre en moyenne), doivent leur nom à leur ressemblance avec des pontes de poissons. La structure en couches concentriques, autour d'un noyau (nucléus) quelconque, souvent minuscule, implique une formation par accroissements successifs de l'enveloppe.[18]

## **I.7.Conclusion**

On peut classer le minerai de fer selon plusieurs facteurs (la composition minéralogique, la composition chimique, la granulométrie...etc.),sa teneur en élément utile ses caractéristiques magnétiques .....etc.

Un minerai de fer est considéré pauvre lorsqu'il doit subir un traitement parfois complexe permettant d'éliminer la plus grande partie de la gangue. Les teneurs en fer des minerais actuellement exploités varient entre 25 à 60 %.

# **CHAPITRE I:GENERALITE SUR LE MIENERAI DE FER**

---

# **CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

## **II.1.Introduction**

Dans ce deuxième chapitre,nous allons décrire le désert et le Sahara algérien en générale et la région de Tindouf et de Gara Djebilet en particulier. Nous commençons nôtre chapitre par des généralités sur le gisement de fer de gara Djebilet,ainsi que la problématique et les difficultés qui se posent au niveau du minerai : sa localisation géographique, sa géologie générale, les couches de minerai, la puissance du gisement et sa surface, et les essais de traitement et d'enrichissement effectués sur ce minerai et nous terminons par une conclusion du chapitre.

## **II.2.Généralités sur le minerai de fer de Gara Djebilet**

Le gisement de fer de Gara Djebilet est l'un des plus grands dépôts naturels de fer oolithique dans le monde, découvert en 1952 par le géologue Français M Gevin, située à Tindouf en Algérie. Il est l'un des plus grands gisements de fer dans le monde. Ses réserves sont estimées à 3,5 milliards de tonnes, dont 1,7 milliard de tonnes sont exploitables.[19]

Le gisement de Gara Djebilet s'étend sur plus de 131 km<sup>2</sup>, ses réserves exploitables sont estimées à 2 milliards de tonnes de minerai avec une teneur de 58,57% de fer.[20]

Le 12 mars 2017, la Société nationale de fer et de l'acier (FERAAL) signe avec l'entreprise chinoise Sinosteel Equipment & engineering un protocole d'accord de réalisation des études de faisabilité pour le développement du gisement. Le contrat inclut aussi la réalisation par des centres de recherche chinois des essais de déphosphoration et d'enrichissement sur quatre procédés différents.

Les laboratoires algériens ont pu atteindre un taux de déphosphoration avoisinant 0,30% à 0.17%.[21]

Feraal compte commencer l'exploitation industrielle du minerai de Gara Djebilet en 2021-2022. Le projet permettra de placer l'Algérie en tant que leader de l'industrie sidérurgique et métallurgique africaine.[19]

## CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE

### II.3. Situation géographique

Le gisement de Gara Djebilet est situé à 130 Km au Sud Est de la ville de Tindouf, près de la frontière Algéro-mauritanienne, à 380 Km à vol d'oiseau de l'océan atlantique et à 1600 Km au sud de la côte Algérienne. Le gisement est facilement accessible par route à partir de la ville de Tindouf (130Km) est régulièrement desservie par la compagnie algérienne aérienne à partir d'Alger, et est également reliée à Béchar par route (980 Km). La wilaya de Béchar est à son tour connectée au Nord du pays par route et chemin de fer (fig.1). La topographie générale de Gara Djebilet est celle d'un immense plateau dont l'altitude varie autour de 400 à 600m au-dessus du niveau de la mer, située légèrement au Sud de la 27<sup>ème</sup> parallèle. La région de Gara Djebilet fait partie des zones d'aridité extrême (40mm de chute de pluie annuelle en moyenne) ou la période des fortes chaleurs va de juin à septembre inclus, avec des températures maximales de l'ordre de 40°. [22]

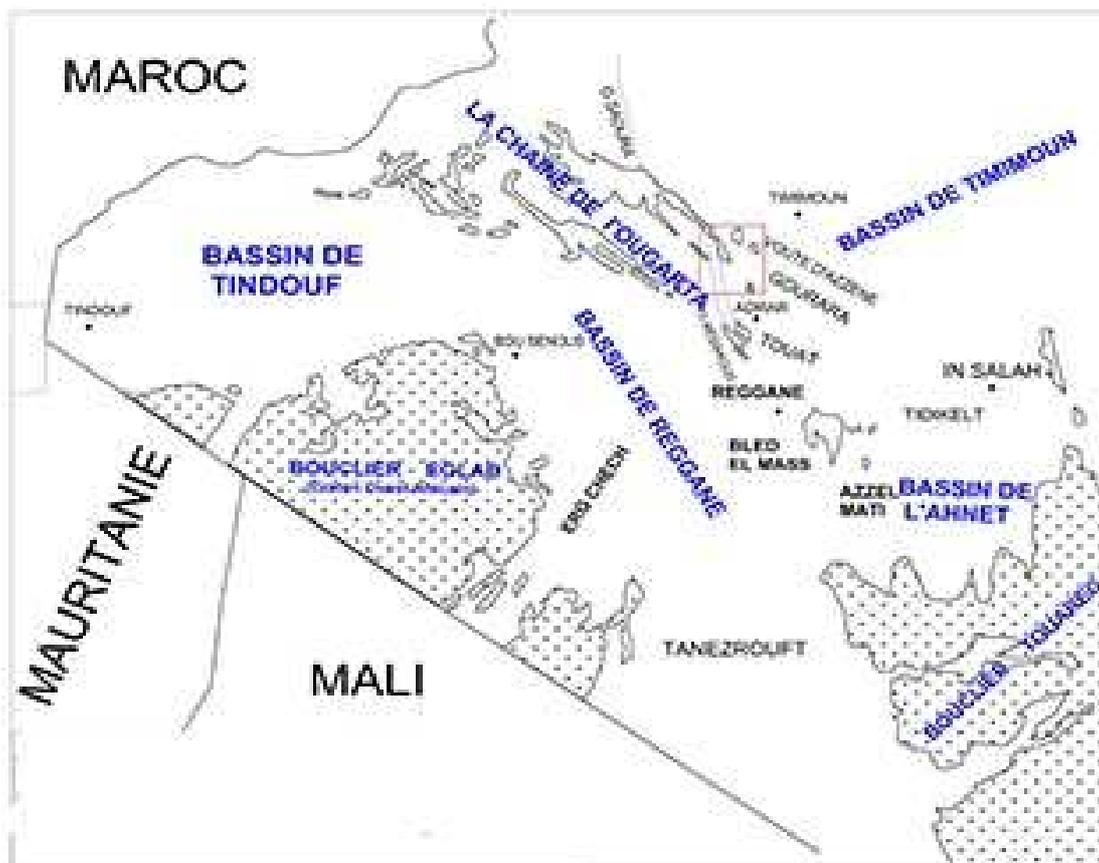


Figure II.1.Situation géographique du champ du bassin de Tindouf

## CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE

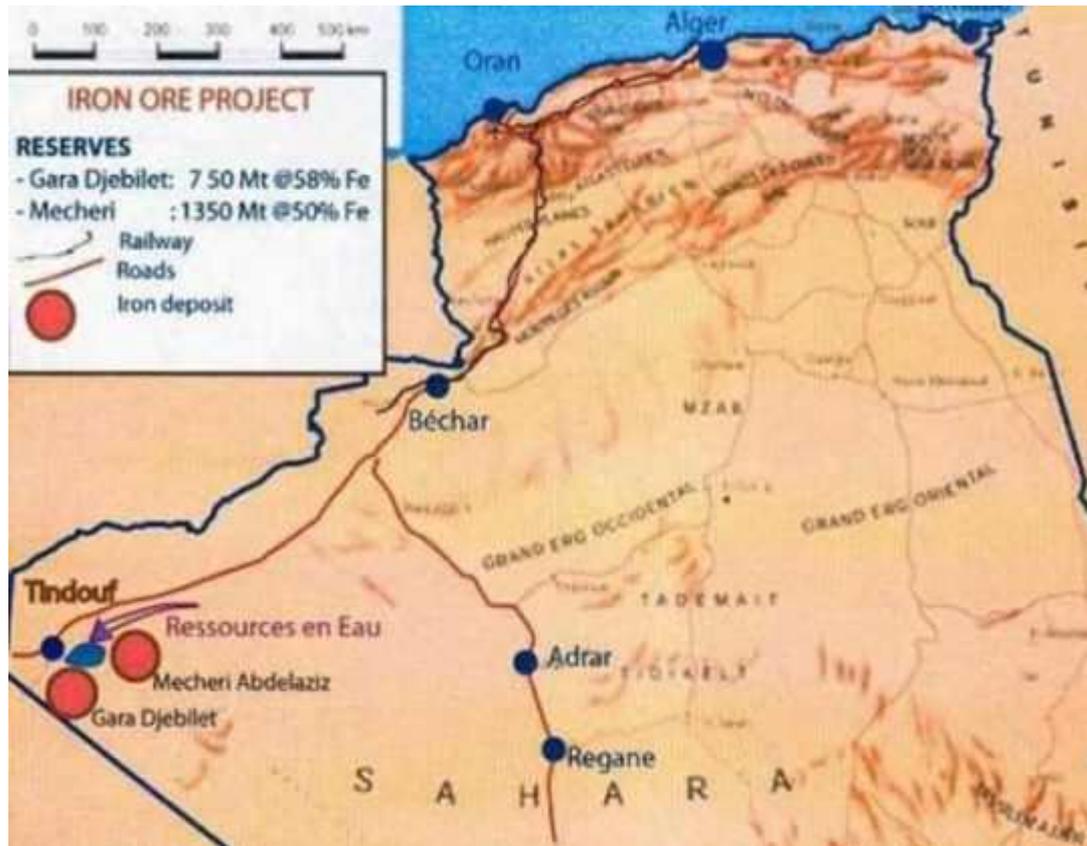


Figure II.2. : Situation géographique du gisement de fer de Gara Djebilet[23,24]

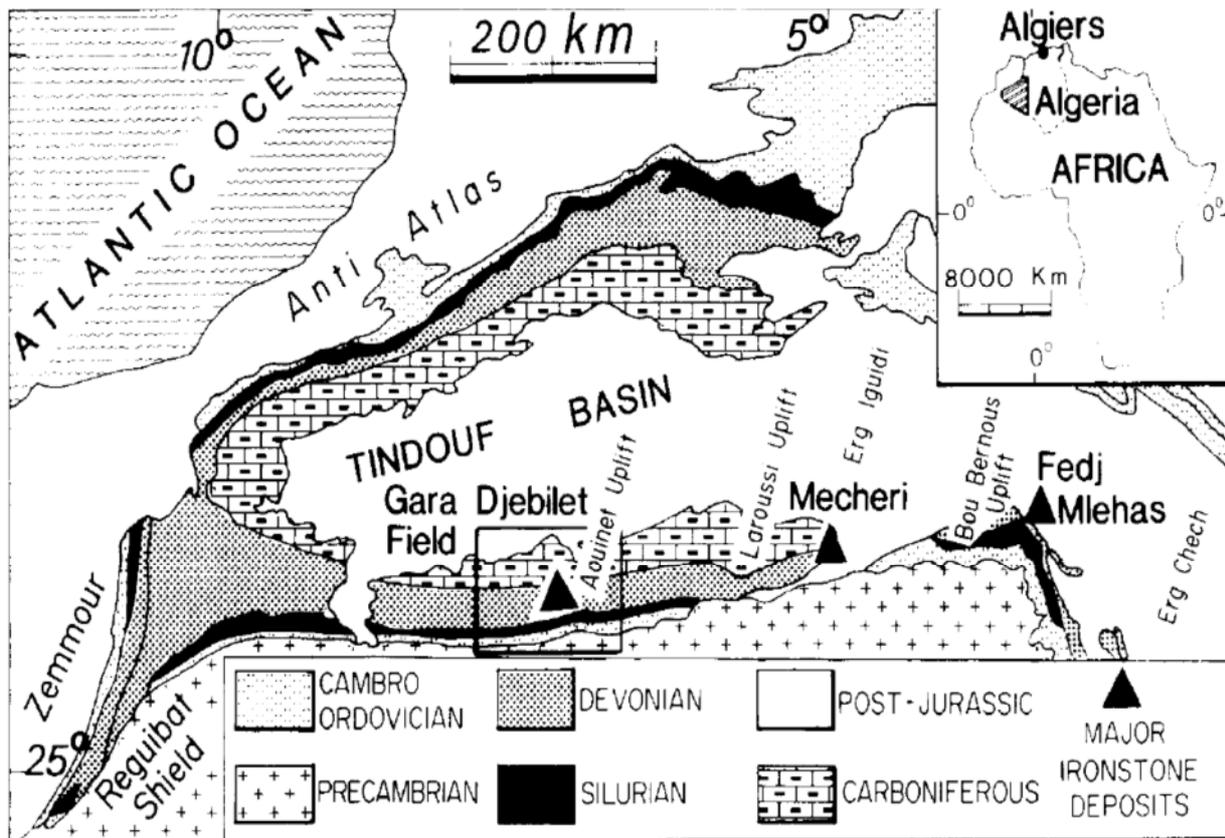
### II.4. La géologie de la région

#### II.4.1 Bassin de Tindouf

Le Bassin de Tindouf est un bassin asymétrique post-silurien, de direction sud-Ouest à Nord-Est, couvrant plus de 120000 km<sup>2</sup>, lié au Nord avec les montagnes marocaines de l'Anti-Atlas, au Sud par le Bouclier de Rgueibat, à l'ouest par la dépression d'El Aioun, et à l'est par la dépression d'Erg Chech. L'essentiel du bassin est situé en Algérie, avec certaines parties dans le Sahara Occidental, au Maroc, en Algérie, en Mauritanie, et en Libye(figure II. 2).

Le bassin est formé de roches sédimentaires marines cambro-ordoviciennes à carbonifères, surmontées par des roches sédimentaires crétacées continentales, et une couverture cénozoïque. De nombreux dépôts de roche ferrugineuse oolithique sont présents au sein des roches sédimentaires du Silurien et du Dévonien(figureII. 3.).[17]

## CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE



**Figure II. 3.**Carte géologique du Bassin de Tindouf et les principaux dépôts de roches Ferrugineuses oolithiques du sud de l'Algérie.

### II.4.2 Gisement de fer de Gara Djebilet

Il est formé de 3 zones : Est, Ouest et centre. Les ressources estimées dans les années soixante-dix sur le gisement de Gara Ouest approchent le milliard de tonnes. Les caractéristiques géologiques du gisement sont schématisées par trois couches : D1, D2 et D3. Les couches D1 et D3 sont non ferromagnétique et ont une concentration élevée en silice. Tandis que la couche D2, en grande partie ferromagnétique, est caractérisée par des teneurs en fer et en phosphore de 54% et 0,8% respectivement. Le minerai de fer de Gara Djebilet est un minerai oolithique avec des oolithes de petites dimensions comprises entre 100 et 400  $\mu\text{m}$ .

Le fer est présent sous forme de différents minéraux (magnétite, maghémite, hématite, goéthite, apatite, chamosite, anapaite, collophane etc.). Le phosphore est présent sous forme d'apatite et de structure comprenant du fer et du phosphore.

## CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE

### II.4.2.1. Le Carbonifère :

sont dernières formations Paléozoïques du ce bassin ( Permien non daté).On distingue:

**II.4.2.1.1. Le Carbonifère marin :** Le Tournaisien est gréseux-calcaire à l'Ouest et devinrent argileux-gréseux au niveau méridienne, l'épaisseur augmenter d'Ouest en Est de (50à150m).

-Le Visien inférieur présente une croissance vers l'Est (80 à 300m), et sans discontinuités .

-Le Visien supérieur commence par marnes et grès .L'épaisseur décroît vers l'Est 600-550m.

**II.4.2.1.2 .Carbonifère continentale :** Le Namurien n'y est que supposé au sien de 300m de terrains argilo-gréseux d'un environnement laguno-lacustreLe Westphalien ,existé au droit de la ville ,a 80m d'argile et grès végétale(Figure II.4.)[25]

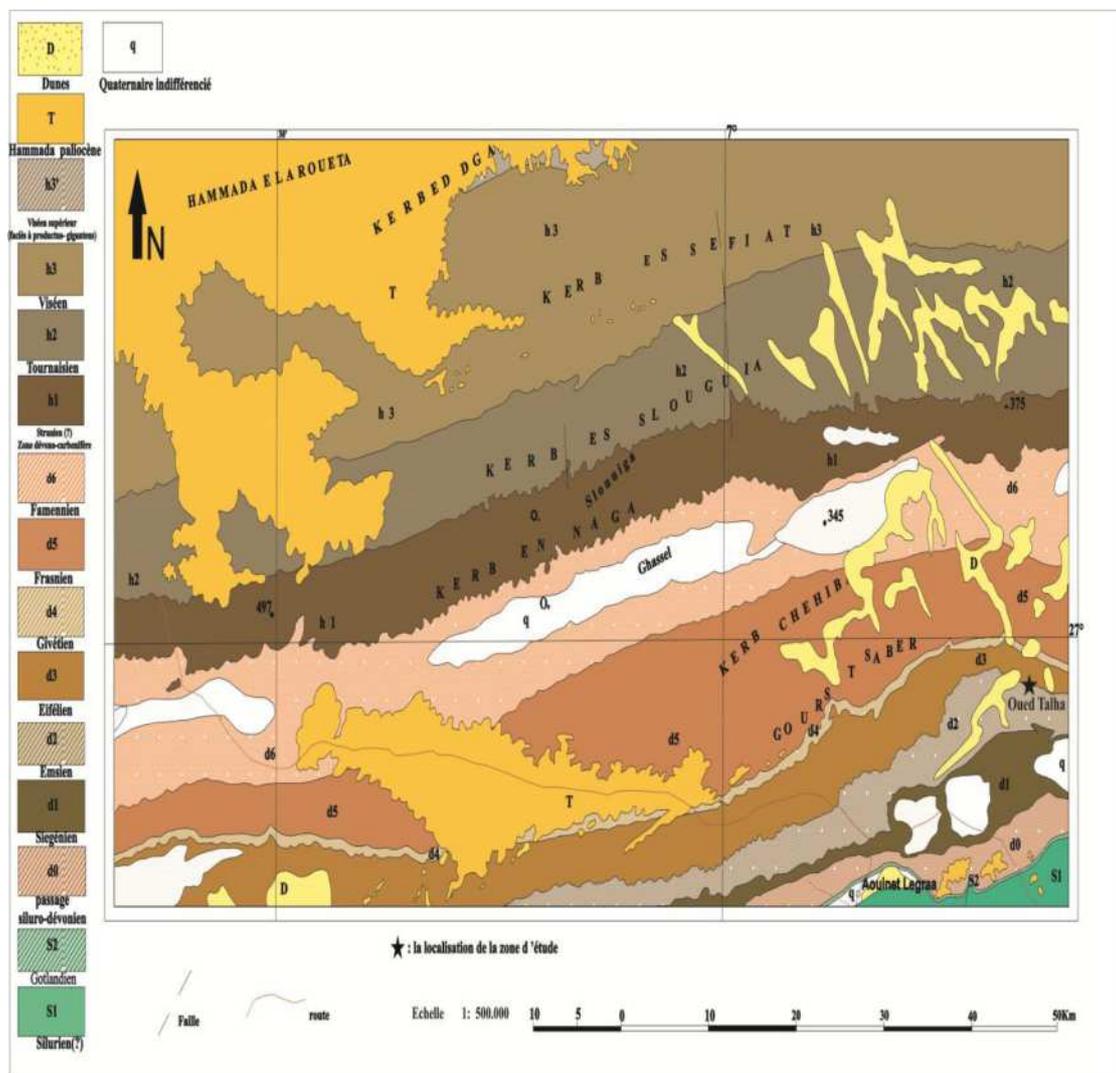


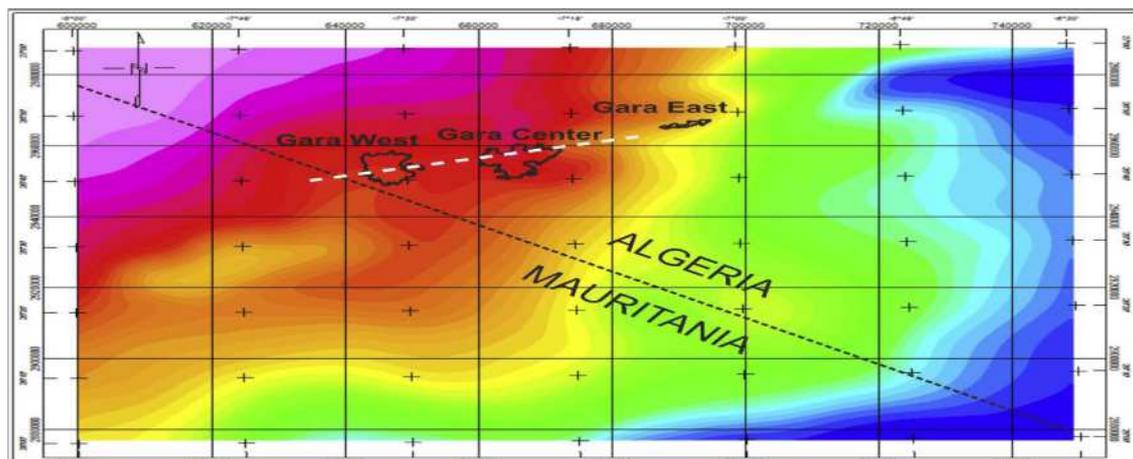
Figure II.4.:le carbonifèrede gisement de Gara Djebilet [25]

## CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE

### II.4.3 . la position de gisement de Gara Djebilet

Le gisement de fer de Gara Djebilet, Il affleure d'Ouest en Est sur 50Km. Il est composé de trois lentilles de minerais oolithique d'origine sédimentaire (figure II.5), toutes situées dans le même niveau stratigraphique que l'on attribue au sommet du dévonien inférieur (Emsien) et allongées approximativement dans la direction (WSW-ENE).Le corps du minerai est subhorizontal et s'enfonce en pente douce et régulière de 2°vers le Nord .

Les lentilles de ce gisement sont d'extension kilométrique (figure II.5), distant l'une de l'autre d'environ 9Km avec une superficie totale de 130 Km<sup>2</sup>. La puissance de la formation ferrugineuse varie de 15à 30m et la minéralisation se présente sous la forme de trois niveaux superposés. Le niveau le plus riche est magnétique avec une puissance moyenne de 8,5m et une teneur de 58%Fe, cette couche couvre 34Km<sup>2</sup> a Gara Ouest, et 72Km<sup>2</sup> a Gara centre.[26]



**Figure II.5 :**Position les trois lentilles (partie) de gisement de fer de Gara Djebilet .[27]

### II.5. Formation de gisement

La formation de Gara Djebilet est constituée de trois cycles, devenant plus grossiers vers le haut, de roches sédimentaires argileuses à sableuses, entre des séquences plus fines vers le haut, formées de schistes du Silurien supérieur de la formation de la Sebkhha Mabbes, au niveau de la base, ainsi que des conglomérats, des grès, des siltites du Dévonien inférieur de la Formation de l'Oued Talha au niveau du sommet.[22]

## **CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

Les roches ferrugineuses oolithiques du champ de Gara Djebilet se présentent sous la forme de lentilles au sommet du cycle le plus élevé, alterné avec des arénites quartziques chlorotiques à ferrugineuses. Interprète chaque cycle devenant plus grossier vers le haut comme représentant une séquence de dépôt de barrière insulaire, avec des variations de faciès au sein de chaque cycle, représentant différentes parties de la barrière insulaire.[23]

Les roches sédimentaires littorales, le long de la partie orientée vers la mer des îles, sont constituées de grès ferrugineux à laminations, avec une faible teneur en coquilles. Les grès de plage sableuse en recouvrement contiennent des lits entrecroisés planaires tabulaires de taille moyenne. Le litage entrecroisé planaire tabulaire à grande échelle (ensembles de 1 à 1,5 mètre d'épaisseur) caractérise un faciès de d'une éolienne riche en végétaux fossiles. De tels faciès de d'une éolienne sont une caractéristique très répandue du champ de Gara Djebilet.[28]

Le dernier cycle recouvrant le faciès de dune commence avec des grès argileux à laminations parallèles, représentant un environnement d'avant littoral intérieur, évoluant vers le haut en des roches ferrugineuses oolithiques. La roche ferrugineuse possède une teneur en quartz décroissant vers le haut, et est interprétée comme indicatrice d'un contexte de dépôt de lagon ou de baie. Au sein des lentilles de roches ferrugineuses, les faciès de roches ferrugineuses quartziques sont visibles au plus près de la barrière, alors que le faciès de roche ferrugineuse non détritique intervient au-dessus ou vers la terre.[29]

### **II.6. Minéralisation**

La minéralogie des lentilles de roches ferrugineuses oolithiques est caractérisée par la magnétite, de l'hématite, de la goethite, de la maghémite, de la chamosite, de la sidérite, de l'apatite, et du quartz. Trois principaux types de minerais sont visibles, et répartis verticalement au sein de chaque lentille. Elles consistent en un faciès de minerai inférieur non magnétique, d'un faciès magnétique, et d'un faciès supérieur non magnétique. Sur le plan pétrographique, les minerais se différencient en trois types, à savoir les types cimentés, détritiques, et non détritiques.

Les moyennes de données géochimiques pour la totalité du champ montrent des différences de teneur en fer entre les trois types de minerai. Les faciès inférieurs non

## **CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE**

magnétiques, magnétiques, et supérieurs non magnétiques renferment respectivement 54,6, 57,8, et 53,0 % de fer. Le minerai magnétique représente une ressource potentiellement d'intérêt économique, et contient 4,9 % de  $\text{SiO}_2$ , 4,2 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 61,4 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 19,2 % de  $\text{FeO}$ , et 1,8 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Pour une valeur de coupure de 57 pourcents de fer, une ressource de 985 millions de tonnes, à une teneur de 57,8 % de fer a été signalée.[30]



**Figure II. 6.** Vue générale du gisement de fer, Gara Djebilet.

### **II.6.1. Caractéristiques minéralogiques**

La caractérisation minéralogique du minerai de fer de Gara Djebilet, par plusieurs études, montre qu'il est principalement constitué de la maghémite, la magnétite, l'hématite et la limonite, tandis que la gangue est constituée principalement par le quartz et, occasionnellement, des minéraux en traces tels que le zircon et le rutile, par contre le phosphore qui réside dans la texture de minerai avec une proportion  $>0.8\%$  et varie d'une couche à une autre [30].

### **II.7. Essais de valorisation et d'enrichissement**

## **CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE**

Le gisement de Gara Djebilet n'est pas exploité à cause de sa teneur élevée en phosphore et surtout du fait de sa structure oolithique.[31]

Depuis sa découverte en 1952, plusieurs études ont été réalisées sur le gisement de Gara Djebilet notamment celles accomplies par :

- Direction des Mines et de la Géologie jusqu'en 1964,
- KECI (1977-1979), IRSID (1977), KRUPP (1966), NIPPON STEEL (1978) pour les comptes de BAREM et SONAREM),
- SIDER de 1977 à 1988,
- CITIC (2007) et POSCO(2008) pour le compte de SONATRACH, - URASM (Plus récemment).....
- URASM (plus récemment),
- IRSID (1961,1964 ,1974),
- KRUPP (1966)
- HYLSA (1986)

### **.II.7.1.Principaux résultats obtenus**

#### **II.7.1.1. Enrichissement du minerai**

Le minerai de fer de Gara Djebilet est considéré comme un minerai acide contenant des teneurs en  $\text{SiO}_2$  relativement élevées, d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 à 5%), de phosphore (0.8%) et d'arsenic (0.03%). Depuis la découverte de ce gisement, de nombreux travaux de recherche et d'études ont été effectués par le BRMA (Bureau de Recherche Minière Algérien en 1953), par le BIA (Bureau d'Investissement en Afrique en 1959) et enfin le SERMI (Service d'Etudes et de Recherches Minières en 1961). Après l'indépendance, plusieurs études ont été dirigées par la SONAREM avec des Partenaires étrangers ayant une notoriété internationale dans le domaine minier (Ikab - suède, IRSID - France, Tempo & Kaiser Engineering - USA, INSC - Japon et Klockner-RFA).[32]

Divers schémas de traitement ont été effectués en laboratoire par des étapes multiples de broyage, séparation magnétique et flottation jusqu'au grillage magnétisant et lixiviation.

## **CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

Les essais de calcination à 1000°C du minerai de fer dans un four rotatif ont donné de bons résultats. Combiné aux procédés classiques, il est possible d'obtenir un concentré:

- Enrichi à 63% de Fe, avec un taux de récupération du fer de plus de 85% ;
- De teneur en éléments indésirables divisée par 2, mais le taux de Phosphore demeure 4 fois supérieur au niveau admissible : passage de 0,8% à 0,4% P.[33]

Les meilleurs résultats obtenus (diminution de la teneur en phosphore à 0,15-0,18% P) ont été réalisés uniquement en laboratoire, via une lixiviation sur un concentré obtenu par les procédés classiques, d'une teneur de 0,5%P. [26]

### **II.7.1.2. Agglomération et pelletisation**

Des essais d'agglomération et de bouletages (pelletisation) de minerai ont été menés entre 1970 et 1990 pour la production d'acier. Elles ont montré la possibilité de produire :

- Des agglomérés basiques auto-fondant, en partant des fines concassées (0-10mm), mais avec une faible productivité ;
- Des boulettes crues et cuites en partant de fines de broyages (50-70µm) en utilisant un liant, la bentonite ou la chaux métallurgiques hydratée .[26]

### **II.7.2. Elaboration de l'acier**

Des études et des essais ont été menés et effectués pour évaluer la possibilité de produire de l'acier de bonne qualité et qui répond aux normes de la sidérurgie et la métallurgie de fer à partir du minerai de fer de Gara Djebilet par :

- La filière métallurgique classique : Haut fourneau, convertisseur à oxygène.
- La production directe et le four à arc électrique.
- ❖ **Filière Haut fourneau, convertisseur à oxygène**

A partir de ce minerai de fer on peut produire de l'acier à teneur minimale de (0,015-0,02%P) avec quelques aménagements techniques et des désavantages économiques telle que :

## **CHAPITRE II:LE GISEMENT DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

\_ Une consommation importante de Cooke (>600kg/tonne de fonte) due à la haute teneur en alumine du minerai, nécessitant des additions massives de dolomie et de castine.

\_ Une faible productivité des convertisseurs à oxygène à cause du cycle d'affinage plus long.[33]

### **❖ Filière de réduction direct et le four à arc électrique**

SIDER, a réalisé des tests de réduction directe au gaz naturel qui ont démontré la bonne réductibilité du minerai de fer de Gara Djebilet.

Des essais semi industriels (400 tonnes de minerai de fer brut concassé) ont été réalisés par la société HYLAS (aujourd'hui TENOVA) sur ses installations pilotes de réduction directes (procédé HYL) et de fusion au four a arc électrique (Filière de réduction direct RD). Ces essais ont permis d'obtenir une éponge de fer (DRI) acceptable pour la production de l'acier de très bonne qualité et à très faible teneur en phosphore (<0,02% P) à partir de cette éponge. moyennant la combinassent des opérations de déphosphoration du minerai de fer : insufflation de chaux, oxyde de fer, injection dioxygène, décrassage intermédiaire de la scorie.[33]

## **II.8. Conclusion**

Legisement de Gara Djebilet est l'un des plus grands gisements du minerai de fer au monde et l'un des plus grands dépôts de minéraux dans le sol algérien. Il présente une teneur élevée en fer, mais sa teneur en phosphore présente un problème majeur sur la qualité finale du métal. Après la hausse des prix de fer et l'augmentation de la demande dans le marché mondiale, d'un côté et la chute des prix des hydrocarbures d'un autre côté, il est nécessaire de trouver une solution fiable et une méthode adéquate afin de valoriser et d'enrichir ce minerai.

### **III.1.Introduction**

La valorisation de minerai consiste à éliminer, idéalement au complet, les constituants non désirés, en ne laissant que les minéraux de valeur. Normalement on ne sera jamais capable d'effectuer cette séparation parfaite, de sorte qu'on se retrouvera à la fin de l'opération avec deux produits contenant tous les deux des minéraux de valeur et de la gangue, mais en proportions différentes. Le produit riche en minéraux de valeur s'appelle concentré tandis que celui riche en gangue s'appelle rejets.

le minerai de fer est variable selon sa teneur en fer et en fonction de minéral ferrifère dans le minerai valorisé, et afin de récupérer au maximum le minéral utile, des méthodes de séparation physiques sont souvent utilisées, mais restent insuffisantes et nécessitent d'autres méthodes physico-chimiques ou même complètement chimiques (la lixiviation, la flottation ...etc. ).

La lixiviation est l'une des méthodes les plus utilisées et qui accompagne d'autres procédés de séparation physiques et mécaniques. Elle trouve une large application dans le cas de traitement des minerais qui présentent une difficulté d'enrichissement et de valorisation.

Dans ce chapitre, des généralités sur les méthodes d'enrichissement par des procédés Chimique telle que, la lixiviation et par voie physique comme la séparation magnétique sont présentées.[32]

### **III.2. La lixiviation**

La lixiviation est l'art d'extraire les métaux de leurs minerais. Les minerais contiennent généralement les éléments métalliques à l'état oxydé. La majorité parmi eux sont des sulfures, des oxydes, des chlorures ou des carbonates. Cette technique est souvent utilisée pour des métaux lourds et précieux comme le cuivre, le zinc et l'uranium ; elle est basée sur des réactions chimiques visant à absorber spécifiquement la substance à extraire. La lixiviation consiste à mettre en solution, sous forme ionique, le ou les métaux recherchés.[ 34]

### **III.2.1. Réactifs de lixiviation**

Les réactifs de lixiviation les plus couramment utilisés sont [35] :

- **L'eau** : Elle est utilisée pour la lixiviation des minerais solubles dans l'eau tels que les sulfates et même les oxydes.
- **Les acides**: Les acides, sont utilisés pour l'attaque de plusieurs constituants parfois d'une manière sélective. L'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, l'acide nitrique sont les réactifs les plus utilisés.
- **Les bases** : Les bases telles que l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde d'ammonium (NH<sub>4</sub>OH) sont utilisées respectivement pour la lixiviation des bauxites ainsi que celle des minerais de cuivre et de nickel
- **Les sels solubles**: Les sulfates ferreux, les chlorures, les carbonates et cyanures de sodium permettent la lixiviation de certains minerais sulfurés tels que le CuS.
- **Les bactéries** : Les microorganismes tels que ; les thiobacillus pour les sulfures des métaux, les minerais complexes ainsi que pour les roches à faible teneur en minerai (< 0,4%). On effectue donc une biolixiviation.
- **Les gaz dissouts** : Le Dioxyde de soufre, Dichlore, Oxygène sont utilisés par exemple pour la lixiviation du Zinc.[36]
- **Critères de choix d'un réactif de lixiviation** :Plusieurs critères doivent être satisfaits pour un réactif de lixiviation, le choix de l'agent lixiviant dépend essentiellement des facteurs ci-après [37,18] :
  - Les caractéristiques chimiques et physiques de la matière à dissoudre.
  - Le coût du réactif.
  - La réactivité avec le constituant utile à dissoudre.
  - La possibilité de régénération du réactif.
  - La corrosion limitée du réacteur de lixiviation.

### **III.2.2. Techniques de lixiviation**

La lixiviation nécessite la mise en contact d'un fluide avec un solide, les techniques de lixiviation dépendent de la teneur en éléments utile ainsi que de la facilité de dissolution. On tient à signaler que toutes ces techniques citées ci-dessous

## **CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE**

---

se font soit dans les cuves ayant des différentes formes ou dans les fossés préparés.[38]

### **III.2.2.1 Lixiviation par percolation**

Dans cette technique le contact est réalisé par circulation de la solution lixiviante à travers un lit fixe des solides en couches de grain relativement perméable.

#### **a) Lixiviation en place (In-situe)**

Cette technique est utilisée lorsque la teneur en minéraux utiles est faible ou pour des minéraux pauvres, elle consiste en la lixiviation directe du minerai en place vu que les opérations de minages et de transport n'est pas rentable.

Pour réaliser cette lixiviation, on introduit dans le gisement le solvant et la solution est récupérée à l'aide d'un drain soit par irrigation ; lorsque le gisement est exposé, ou soit par injection lorsqu'il est enterré .Cette technique exige une bonne fragmentation du gisement pour permettre un contact efficace entre le réactif et le minerais et un bon isolement du gisement, vis-à-vis de l'hydraulique souterrain afin d'éviter la pollution de l'eau et une dilution des solutions obtenue.

#### **b) Lixiviation en tas**

Cette technique est utilisée pour des minerais très pauvres, l'opération se fait sur une surface plane inclinée préalablement nettoyée et imperméable, au-dessus de cette surface on dépose les minerais grenus en tas et on asperge ensuite le réactif.

La solution riche est recueillie à l'extrémité inférieure de la surface afin d'être pompée aux bassins de récupération.

#### **c) Lixiviation en stalles**

Le minerai à traiter est placé dans un réservoir rectangulaire et est placé sur la base de ce réservoir, l'agent de lixiviation est ajouté continuellement à la surface du minerai de manière ascendant. La solution riche est continuellement recueillie et évacuée du réservoir.

## **CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE**

---

### **d) Lixiviation en fosse (Vat Leaching)**

Comme pour la lixiviation en tas, le minerai doit être deschlammé ou aggloméré. Ce système constitue une alternative à la lixiviation en tas dans des régions désertiques ou semidésertiques, où les ressources en eau sont faibles et une évaporation intense. Cependant, son inconvénient vient d'investissements et de coûts opératoires plus élevés. Généralement, les fosses ont des dimensions de l'ordre de 20 à 50 m de côté et une profondeur de 4 à 6 m. Elles sont disposées l'une à côté de l'autre, et sont construites en béton recouvert d'un revêtement. Le fond est constitué par un milieu filtrant protégé par des madriers. Le chargement et le déchargement s'effectuent par une grue, et les solutions de lixiviation circulent d'une cuve à l'autre, simulant une percolation à contre-courant. [39]

### **III.2.2.2. Lixiviation par agitation**

L'agitation permet un meilleur contact entre l'agent de lixiviation et solides à lixivier. On distingue :

- Agitation pneumatique : elle se fait dans les Pachuca (réacteur cylindrique) munit d'une tubulure centrale à travers laquelle une injection d'air comprimé détermine un mouvement ascendant de la pulpe.
- Agitation mécanique : le réacteur de lixiviation est agité mécaniquement afin de permettre un bon contact.

### **III.2.2.3. Lixiviation suppression**

Cette technique permet de l'accélérer la mise en solution des éléments utiles qui sont lentes à pression atmosphérique, elle a lieu dans les autoclaves et la pulpe est injecté sous pression.

Étant donné que la cinétique réactionnelle des sulfures est lente, cette technique est recommandable pour ce type de minerais utilisés.

### **III.2.3. Types de lixiviation**

Les types de lixiviation sont classés suivant les agents lixivants utilisées [35].  
On distingue

### **III.2.3.1. Lixiviation chimique**

La lixiviation permet de extraire des éléments constitutifs de minéraux en faisant passer une solution aqueuse à travers le sol permettant la dissolution des matières solides qui y sont contenues. Cette technique est couramment utilisée dans le secteur minier pour récupérer des métaux de valeur (argent, or, cuivre, uranium, zinc...) à partir de matériaux géologiques.

La lixiviation est une réaction de formation de complexes entre les éléments des lixiviants de la solution et le métal contenu dans la roche. C'est une réaction lente limitée par la distribution des réactifs dans le solide et des produits de la réaction dans la solution.[35]

#### **A. Lixiviation acide**

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais à gangue acide, le milieu solvant est constitué de l'acide. On distingue dans cette catégorie :

- **Lixiviation acide et oxydante** : Il y a lixiviation oxydante lorsqu'il y a montée d'état d'oxydation de l'élément dans la solution que dans le solide. Ce type de lixiviation s'applique aux minerais mixtes (oxyde et sulfures). L'acide sulfurique est le solvant le plus utilisé. Les conditions oxydantes peuvent être réalisées par l'air (oxygène) ou par les ions ferriques présents (provenant des minerais ou ajoutés intentionnellement) .[40]
- **Lixiviation acide et réductrice** : Dans ce type de lixiviation, la solution lixivante est rendue réductrice par un agent réducteur tels que le  $\text{SO}_2$ , le fer ferreux, le  $\text{NO}_2$ , le metabisulfite de sodium. La réduction permet la dissolution des oxydes tels que  $\text{MnO}_2$  et  $\text{CO}_2\text{O}_3$  qui ne sont pas solubles dans l'acide sulfurique dilué.[40]

#### **B. Lixiviation ammoniacale**

La lixiviation ammoniacale est utilisée pour les minerais à gangue dolomitique ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) qui se prêtent mal à une attaque acide. Pour les minerais sulfurés, la lixiviation ammoniacale se fait en présence d'oxygène comme agent lixiviation. [18]

## CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE

---

### C. Lixiviation par cyanuration

Ce type de lixiviation est appliqué essentiellement au traitement des métaux précieux. On utilise une solution diluée de cyanure de potassium (KCN) en milieu basique pour éviter l'hydrolyse du cyanure [41,42]

### D. Complexation par la thio-urée

Certains minerais restent réfractaires à la cyanuration, en raison des rendements d'extraction inacceptables qui peuvent être obtenus malgré les soins apportés à leur préparation avant l'attaque au cyanure. Il est donc judicieux de chercher d'autres complexants de l'or permettant le traitement de tels minerais. Parmi ceux-ci, la thio-urée qui a fait l'objet d'études approfondies et de nombreux essais, notamment en vue du traitement de minerais riches en soufre et en arsenic et réfractaires à la cyanuration. Elle est représentée par la réaction suivante, en présence de l'ion ferrique qui est l'oxydant le plus habituel :

$$3 \text{Au} + 2 \text{NH}_4\text{CSNH}_2 + \text{Fe}^{3+} \rightarrow 3 \text{Au}(\text{NH}_2)_2\text{CSNH}_2 + \text{Fe}^{2+}$$

(I.4) La lixiviation est réalisée à un pH au delà de 2, ajusté par l'acide sulfurique, avec des concentrations en fer de 0,5 g/l et en thio-urée de 10g/l.[43]

### E. Lixiviation par les chlorures

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais sulfurés mais l'utilisation de l'acide chlorhydrique est exclue compte tenu de son prix qui est élevé, cependant on emploie une solution acide de FeCl<sub>3</sub>.

### F. Lixiviation par la soude caustique

Cette lixiviation est pour dissoudre les oxydes tels que la bauxite.

#### III.2.3.2. Lixiviation bactérienne

Les chercheurs du secteur métallurgique ont isolé et étudié des bactéries capable d'oxyder les minéraux à base de fer ferreux et de soufre et d'en libérer les métaux. L'équivalent de 11.5% de la production de cuivre aux Etats-Unis est fourni par un procédé avec lixiviation bactérienne. Les bactéries responsables en grande partie de l'extraction des métaux appartiennent à l'espèce Thiobacillus ferrooxidans.

### CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE

---

Elles sont classifiées ainsi étant donné leur capacité à utiliser le fer ferreux (ferrooxidans) et les composés de soufre (Thiobacillus) comme seule source d'énergie: leur seule source de carbone étant le dioxyde de carbone (CO). Ces bactéries sont en forme de bâtonnets d'environ 1.0 nm de long et 0.5 nm de diamètre. Dépendant de l'espèce, certaines possèdent un flagelle ou un pili: elles sont donc mobiles. Ainsi, l'espèce !...ferrooxidans correspond à des bactéries chemolithotrophes; c'est-à-dire qu'elles tirent leur énergie nécessaire à leur métabolisme à partir de l'oxydation de composés inorganiques (l'oxydation du fer ferreux, du soufre élémentaire, des composés et minéraux à base de soufre: sulfures, thiosulfate, tetrathionate, minéraux de pyrite, chalcopyrite, etc). Elles sont aérobies et acidophiles. Elles sont aptes à croître à un pH de 1 à 4.5 avec un pH interne près de la neutralité (pH 6.0 à 7.0). En effet, les enzymes de l'espèce !... ferrooxidans sont efficaces à pH neutre. Par des mécanismes - 30 - encore méconnus, ces bactéries parviennent à garder un potentiel de membrane (différence entre pH interne et externe) constant. Les espèces de T. ferrooxidans peuvent croître à une température de 10 à 40°C avec un optimum de croissance à 32°C. De plus, ces micro-organismes ont besoin de suppléments alimentaires: azote ammoniacal, phosphore, sulfate et magnésium (fixation CO) ainsi que des oligo-éléments présents dans leur milieu. Ils sont en mesure de fixer l'azote selon Mackintosh. La lixiviation bactérienne consiste à la mise en solution des métaux (liés aux fractions solides) par le métabolisme des micro-organismes et/ou indirectement par les produits de leur métabolisme. Les bactéries T. ferrooxidans sont en mesure d'effectuer l'oxydation de composés inorganiques par deux processus: voie directe et voie indirecte. [44]

#### A. La biolixiviation

La lixiviation bactérienne est une technique d'extraction de métaux à grands intérêts économiques d'une roche, mettant en jeu des micro-organismes capables de convertir ces métaux de la forme solide à la forme soluble, qui pourront ensuite être extraits.

Ces processus peuvent être dissociés dans les eaux des sites à déshydratation minière acide (bactéries mésophiles) ou des sources hydrothermales (bactéries thermophiles).

Lorsque les microorganismes utilisent les minéraux comme source d'énergie en saisissant des électrons pour leur enrichissement. Cette technique s'effectue sans rejet de SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. [45]

## **CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE**

---

Cette technique est naturelle, économique et important sur le plan environnemental. Elle s'effectue à des températures et pressions faibles avec une vitesse de réaction lente, mais leur inconvénient est l'obtention des solutions diluées.

### **B. La biosorption**

La biosorption est un terme utilisé pour décrire tous les processus reliés à la récupération des métaux en présence des absorbant, qui sont des cellules vivantes ou morte.

La biosorption se fait avec des bactéries active ; lorsque les interactions métaux-bactéries se fait avec des cellules vivantes (précipitations, oxydation-réduction, ...), passive ; lorsque les métaux sont transformés suite à des réactions physico-chimiques ( complexation par des substances produites par les cellules, absorption du métal sur la paroi cellulaire).[45]

### **C. La précipitation**

Le processus se fait sous des conditions anaérobies (qui se déroule en l'absence de l'oxygène) et performe une oxydation complète des sulfures à l'aide des bactéries sulfato-réducteur.

### **III.2.4. Paramètres de lixiviation**

Les réactions de lixiviation sont des réactions hétérogènes qui dépendent fortement de la finesse du minerai ; plus le minerais est fin plus grand est la surface de contact et la lixiviation s'accélère proportionnellement à cette surface de contact, l'agitation qui permet de renouveler la surface de contact entre le solide et la solution lixiviante.

Les paramètres de lixiviation consistent à définir les conditions donnant un bon rendement de solubilisation pour un coût minimum.

Les parameters important sont [18] :

- L'agitation
- La température
- Le pourcentage des solides
- Le pH
- La concentration des réactifs

## CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE

---

- La granulométrie
- Le temps

Les critères d'évaluation suivis pour une étude de mise en solution de solides sont :

- Le rendement de lixiviation, est un rapport de la quantité du métal solubilisé sur celui alimenté avant la lixiviation. Il est exprimé en pourcentage.
- La solubilisation, nous renseigne sur la quantité de métal lixivié d'une quantité donnée du minerai. Elle s'exprime en Kg/t de minerai, calculée sur base des analyses sur les solides.
- La consommation d'acide, se calcule par analyse des solutions (acidité initial et final), c'est la quantité d'acide consommé au cours de la lixiviation et s'exprime en Kg/t de minerai.

### III.2.5. Cinétique de lixiviation

La cinétique chimique nous renseigne sur la vitesse de réaction qui inclut le mécanisme des transformations chimiques ainsi que leurs vitesses.

Dans le modèle de base, interviennent plusieurs hypothèses. Dans les deux premières hypothèses, on considère que les particules solides ont une forme sphérique et gardent leur forme lors de la réaction. La troisième hypothèse suppose que la réaction chimique est effectuée dans une interface nette entre les particules solides primaires et le produit de la réaction. A cela s'ajoute d'autres hypothèses concernant l'étape de contrôle de la vitesse de dissolution.

Les modèles de lixiviation sont prévus pour mettre une relation entre la vitesse de dissolution et toute distinct variable d'une part (fraction de dissolution), et les données essentielles du minerai (le rayon initial de particule) et les paramètres opératoires d'autre part (temps de lixiviation).[42]

### III.3. Séparation magnétique

La séparation magnétique est un procédé qui utilise la force engendrée par un système magnétique pour séparer les particules présentant des propriétés magnétiques différentes. Ce type de séparation consiste à soumettre les minéraux à l'action d'un champ magnétique. Les différences de susceptibilité magnétique, entre les espèces

## CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE

---

minérales, sont alors les principaux critères qui permettent d'effectuer le fractionnement. [46]

### III.3.1. Principe de séparation magnétique

La séparation magnétique exploite les propriétés magnétiques des matériaux afin d'effectuer leur séparation. La susceptibilité magnétique est la propriété d'un matériau qui détermine son comportement dans un champ magnétique. À partir de cette propriété, les matériaux peuvent être divisés en trois classes. La première classe est composée des matériaux ferromagnétiques dont la susceptibilité magnétique est très forte. La deuxième classe comporte des matériaux paramagnétiques qui présentent une susceptibilité magnétique faible. La troisième classe est constituée des matériaux diamagnétiques possédant une susceptibilité nulle. [46]

### III.3.2. Théorie de séparation magnétique

Le sens physique de procédé de la séparation magnétique consiste en fait que le champ magnétique change la trajectoire gravitationnelle des particules possédantes les propriétés magnétiques, de qui provoque leur extraction du mélange avec d'autre minéraux, cette extraction est due au champ magnétique et au gradient de l'intensité qui exprime le changement de l'intensité du champ par l'unité de distance.[47]

### III.3.3. Types de séparation magnétique

On fonction de l'intensité du champ magnétique les séparations sont classées comme suit :

- **A-Séparation magnétique à basse intensité (SMBI):** principalement utilisée pour la séparation des matériaux ferromagnétiques ou paramagnétiques de susceptibilité magnétique élevée, et/ou les matériaux de granulométrie plus ou moins grossière. Le dispositif généralement utilisé est un aimant permanent fonctionne normalement à champ magnétique ouvert, c'est-à-dire que les lignes de force magnétique se referment dans un milieu magnétique peu perméable, air ou eau. L'aimant utilisé, a un champ magnétique profond (attire à distance) ou non (épuration ou concentration de minerais) suivant l'objectif de la séparation. L'intensité de champ varié de 80 à 160 KA/m. [48]

### CHAPITRE III: APERÇU SUR LA LIXIVIATION ET LA SEPARATION MAGNETIQUE

---

**-B- Séparation magnétique à haute intensité (SMHI):** utilisée pour le traitement des matériaux faiblement magnétiques, brut ou fin, en modes humides ou secs, le générateur du champ magnétique est un circuit conventionnel (électroaimant composé d'une ou de deux bobines en cuivre résistif entourant un noyau de fer doux ( $\mu_r = B/\mu_0 H$  très élevé)) à champ magnétique fermé d'une intensité allant de 400 kA/m à 1 600 kA/m, ou un aimant permanent à forte énergie spécifique (alliages en céramique). L'alimentation des séparateurs à haute intensité ne doit pas comporter un trop fort pourcentage de particules ferromagnétiques ou ferrimagnétiques (< 0,5 %). Il est souvent conseillé de faire passer préalablement l'alimentation dans un séparateur magnétique à basse intensité. [48]

**-C- Séparation magnétique à haut gradient du champ:** elle utilise des bobines en cuivre ou supraconductrices pour le traitement de particules ultrafines contenues dans une dispersion solide ou un fluide ainsi les matériaux qui ont des propriétés magnétiques très faibles. D'après le milieu de séparation magnétique on distingue.[49]

**-D-Séparation magnétique par voie sèche:** réservée en général aux traitements des produits grossiers (granulométrie de l'ordre du millimètre à quelques centimètres) elle s'effectue dans le champ magnétique suivant deux principaux régimes : Régime d'extraction (retirer les particules magnétiques de la masse par force magnétique) et Régime de déviation ou de maintien (déviation des particules magnétiques de leurs trajectoires par effet du champ magnétique et une force mécanique).[49]

**-E- Séparation magnétique par voie humide:** On utilise ce type de séparation magnétique lorsque le minéral magnétique est difficilement séparable vu leur granulométrie très fine (- 1mm à 40 $\mu$ m) ou lorsqu'il y a une formation d'agrégats créés par l'attraction électrostatique entre les particules en voie sèche, ou lorsque le produit à traiter est déjà sous forme de pulpe minérale et même lorsque on cherche à éviter les dégagements intenses de poussières.[50]

### **III.4. Conclusion**

La séparation magnétique et la lixiviation sont les deux méthodes très répandues dans l'enrichissement des minerais de fer, elles permettent l'élimination d'une grande partie d'impuretés non magnétiques ou de récupérer les éléments ferri-fères.

Ces deux procédés ont l'avantage de leur simplicité, notamment la séparation magnétique, avec une meilleure efficacité de purification des substances minérales. Dans la partie expérimentale au chapitre suivant, les deux procédés ont été testés pour l'enrichissement du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet, dont les protocoles d'essais et résultats obtenus sont présentés.

# CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

---

## IV.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des essais d'enrichissement du minerai (GDj) réalisés dans l'objectif de diminuer la quantité de phosphore contenu dans les échantillons. Ainsi que la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations.

## IV.2. Expérimentale :

Pour étudier le minerai de fer oolithique du Gara Djebilet, un lot d'échantillons représentatifs (Figure IV.1),est prélevé au niveau du site de Gara Djebilet àTindouf.Soit au total 6 Kg d'échantillons sous forme de fragments de diamètresd'environ de 4 à 7cm, dénommé (A).



**Figure IV.1** .Echantillon représentatif de fer oolithique de GDj

### IV.2.1. Préparation mécanique de l'échantillon :

Pour préparer notre échantillon de 6 kg de fer oolithique, nous avons passé par 3 étapes de préparation mécanique : concassage, broyage, analyse granulométrique par tamisage

#### IV.2.1.1. Concassage :

C'est un traitement mécanique qui sert à réduire les dimensions des particules de la matière première à une granularité de l'ordre de quelques millimètres.[23]

On a utilisé un concasseur à mâchoire de type laboratoire (figure IV.3) qui est disponible au niveau de laboratoire de minéralurgie du département des mines et

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

géologie, L'échantillon représentatif du minerai initial, d'une masse de 6kg, a été concassé jusqu'à un diamètre de 1cm ( $D_{80}=1\text{cm}$ ). (Voir la figure IV.2)



**Figure IV.2** .Echantillon après concassage.

**Figure IV.3** .Concasseur a mâchoire.

### IV.2.1.2 Broyage :

C'est une opération qui consiste à réduire les dimensions des grains de la matière à une dimension plus fine jusqu'à que l'échantillon devient une poudre de l'ordre de quelques micromètres.[23]

Pour suivre les étapes de la préparation mécanique des échantillons ,l'opération de broyage est réalisée à l'aide d'un broyeur a disque de (figure IV.4), on a broyé notre échantillon pendant une heure avec une vitesse de 1000t/min jusqu'à qu'on a obtenu une poudre bien fine.



**Figure IV.4**.Broyeur à disques de laboratoire

## **CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

### **IV.2.1.3 Analyse granulométrique par tamisage :**

C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en utilisant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.[23]

L'analyse granulométrique a été réalisé sur une série de tamis d'ouvertures suivantes : 0.063 mm, 0.12 mm, 0.25 mm et 0.5 mm, Afin d'obtenir les différentes fractions des particules.

### **IV.2.2. Les essais d'enrichissement réalisés :**

#### **IV.2.2. 1. Grillage :**

Le grillage est un traitement thermique à des températures supérieures appliqué sur des minéraux métalliques au contact de l'air de façon à les oxyder, le traitement thermique est traitement mécanique généralement est réalisé soit pour but de rendre l'élément plus friables, soit pour but de dégager par volatilisation des matières étranges.[23]

Après la préparation mécanique dans la chaîne de réduction dimensionnelle au niveau du laboratoire, 2 kg de a été mélangé avec 200g de charbon naturel (coke) concassé manuellement avec un mortier datât.(figure IV.5).

Le mélange obtenu a été grillé à une température de 900°C pendant 30minutes dans des creusés en céramique à l'aide d'un appareil spécialisé, c'est un four à moufle de type de laboratoire, de marque NABERTHERM qui résiste à une température maximale de 1300°C(figure IV.6), au niveau de laboratoire d'écologie du département biologie.

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE



**Figure IV .5.**Charbon naturel (coke)



**Figure IV.6.**Four a moufle d'une capacité de 1300C°

### IV.2.2.2. Séparation magnétique

La séparation magnétique permet alors de séparer ces matériaux selon leur tendance à se magnétiser, elle exploite la susceptibilité magnétique des particules afin d'effectuer une séparation. Elle est utilisée autant en industrie qu'en chimie et en biotechnologies.[23]

Dans Cette étude,l'opération est réalisée à l'aide d'un séparateur magnétique à basse intensité de type de laboratoire de département mineset géologie (figure IV.7), afin d'obtenir des concentrés comme fraction magnétique et des rejets comme fraction non magnétique.

Un échantillon brut en poudre de 1,5Kg est alimentéau séparateur magnétique à basse intensité à l'aide d'un alimentateur vibrant à 50Hz, sous une faible couche et avec une vitesse de rotation du tambour de 25 t/min.



**Figure IV.7.**Séparateur magnétique a base intensité

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

---

### IV.2.2.3. Grillage et séparation magnétique :

Une quantité de 1,5kg de l'échantillon de minerai de fer grillé à 900°C sous forme de poudre (<63µm), a été passée à une séparation magnétique à basse intensité avec les mêmes paramètres de fonctionnement du séparateur établis au cours du premier essai de séparation magnétique (vitesse de 25 t/min et à une amplitude de vibration de l'alimentateur de 50Hz).

### IV.3. La lixiviation

Les essais de lixiviation représentent la majeure partie du travail expérimental effectué dans le cadre de cette étude, pour un but de compléter l'enrichissement des échantillons issus du processus du grillage et de séparation magnétique, et dans l'objectif de réduire les teneurs en phosphore et d'augmenter les teneurs en fer dans le minerai de fer de GDj.

Quatre échantillons en poudre (-63µm) de poids de 450g chacun, ont été préparés pour les essais de lixiviation :

- Un échantillon dénommé **(B)** de minerai brut préparé par un concassage et broyage à -63µm.
- Un échantillon qui a subi un grillage magnétisant à 900°C ; (dénommé **(C)**)
- Un échantillon du concentré (Fraction magnétique) de la séparation magnétique, (dénommé **(D)**)
- Un échantillon du concentré (Fraction magnétique) de la séparation magnétique de l'échantillon grillé à 900°C. (dénommé **(E)**)

#### IV.3.1. Réactifs utilisés

L'agent lixiviant choisi pour les essais était, l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) concentré à 52,9%, de masse molaire de 63,01g/mol et masse volumique de 1,51g/cm<sup>3</sup>. L'eau utilisée pour la préparation de réactif est de l'eau distillée.

Pour la dilution de l'acide, l'équation suivante a été appliquée :

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

Où :

$C_1$  est la concentration initiale de l'acide

$V_1$  est le volume initial de l'acide

$C_2$  est la concentration recommandée,

$V_2$  est le volume nécessaire à ajouté.

### IV.3.2. Mode opératoire

Les 04 échantillons préparés sont mis en contact avec l'agent lixiviant (l'acide nitrique  $HNO_3$ ) à différentes concentrations : 20%, 30%, 40%.

Pour se faire, 150g de chaque échantillon, ont été mis en contact avec 200 ml de  $HNO_3$  dans un bécher de 500 ml pour chaque concentration de l'acide (20%, 30%, 40%), soit 150g/concentration de l'acide nitrique. Les mélanges ainsi préparés ont été mis en agitation à une durée d'une heure (60min) à l'aide d'un agitateur magnétique (figure IV.8), à une température de  $25^\circ C$  sous une hotte de laboratoire.

Après l'opération de lixiviation, les solutions sont filtrées à l'aide d'un papier filtre ayant une porosité de  $0,45 \mu m$ , et le filtrat a été récupéré dans des fioles de 250 ml. Les solides récupérés ont été séchés dans une étuve à une température de  $100^\circ C$  durant 24h. À l'aide d'une presse hydraulique (figure IV.9), les solides récupérés ont été mis en pastilles de 15g pour leur caractérisation chimique par FX. L'échantillon brut a été également préparé pour caractérisation chimique.



Figure IV.8..Agitateur magnétique



Figure IV.9. Presse hydraulique (Pastilleuse)

# CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

## IV.4. Caractérisation minéralogique et chimique

### IV.4.2. Analyse par fluorescence des rayons X (FX) :

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse élémentaire, où elle permet de déterminer les éléments ou les oxydes dans un minerai. Les échantillons analysés par cette méthode de caractérisation chimique sont les filtrés (solides) récupérés de l'opération de lixiviation ainsi que l'échantillon globale (A).

### IV.4.1. Analyse par Diffraction à rayon X (DRX) :

C'est une méthode d'analyse minéralogique des matériaux cristallisés, elle s'applique sur toute sorte de poudres ou des échantillons massifs, pour but de déterminer les différents éléments existant dans un échantillon. Cette méthode est appliquée pour la caractérisation de différents échantillons bruts et les produits d'enrichissement par séparation magnétique et le grillage magnétisant.

## IV.5. Résultats et discussion

Les résultats d'enrichissement par les différents procédés de séparation (Séparation magnétique, grillage magnétisant et la lixiviation) sont présentés sur les (figure IV.10, IV.11, IV.12, IV.13 et IV.14) et le (tableau IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7)

### IV.5.1. Les résultats de l'analyse chimique.

Pour la composition chimique de l'échantillon global (A) les résultats de l'analyse chimique sont représentés dans (le Tableau IV.1). Le Tableau nous montre que l'échantillon globale est constitué principalement par les éléments majeurs tels que : Fer avec une proportion de 88.6 %, et les éléments mineurs comme l'Aluminium avec une proportion de 4.14% et le Silicium a 3.51 %, le calcium avec une proportion de 1.57% et les autres éléments sous forme de traces tels que le Phosphore avec un pourcentage de 0.611 % et Mn a 0.505 % et Mg a 0.421% et Ti à 0.218 % et Cr a 0.0142%. Cette analyse nous a montré également les pourcentages des oxydes constituants l'échantillon analysé. Selon le tableau, il est noté

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

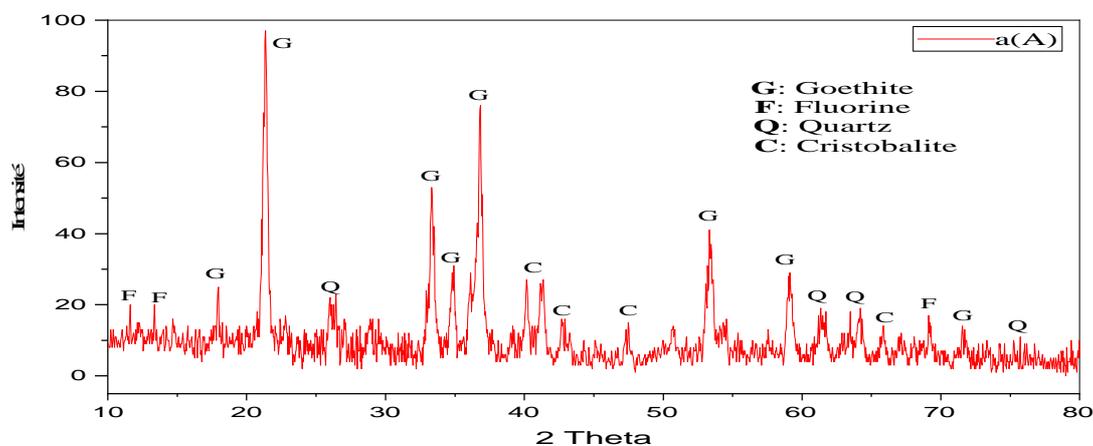
que le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  est présent à un pourcentage majeur de 84.1 % suivie de l'Alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  avec une proportion de 5.91% et dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$  avec une proportion de 5.62%. Les oxydes de faibles teneurs comme le CaO avec une proportion de 1.61 % et  $\text{P}_2\text{O}_5$  avec une proportion de 1.04 % et les autres oxydes sous forme de traces.

**Tableau IV. 1.** Résultats de FX de l'échantillon (A)

Elements	Fe	P	Si	Al	Ca	Ti	Mg	Cr	Mn
Tenure (%)	88.6	0.611	3.51	4.14	1.57	0.218	0.421	0.0142	0.505
Oxydes	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{TiO}_2$	MgO	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	MnO
Tenure (%)	84.1	1.04	5.62	5.91	1.61	0.262	0.533	0.0151	0.444

### IV.5.2. Les résultats de l'Analyse par DRX .

Suivant le diffractogramme de la DRX représenté sur la (figure IV.10), l'échantillon global (A) montre une composition minéralogique hétérogène constituée principalement des phases minérales majeures qui sont goethite, fluorite, quartz et la cristobalite. d'après ces résultats, les pics les plus intenses sont positionnés à  $2\theta = 21^\circ, 34.2^\circ, 36.8^\circ,$  et  $53.4^\circ$  et elles correspondent aux minéraux de la goethite qui est le minéral le plus dominant dans le minerai brut ce qui confirme la nature ferrifère de notre échantillon.



**Figure IV.10.** Diffractogramme par rayon X de l'échantillon globale (A)

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINÉRAI DE FER DE GARA DJEBILETE

le diffractogramme de la DRX représenté sur la (figure IV.11), pour l'échantillon (B) broyé à  $-63\mu\text{m}$ . Le diffractogramme montre une composition minéralogique différente de celle du minerai Global, puisque de nouveaux éléments ont été libérés comme la magnétite et l'hématite. L'échantillon (B) est constitué principalement des phases minérales majeures comme l'hématite et la magnétite et des minéraux accessoires comme la Magnésiofernite, la Carlinite et la Santadaraïte. D'après ces résultats, les pics les plus intenses ont été observés à  $2\theta=24,17^\circ$  et  $33,029^\circ$  et  $35,58^\circ$ , et  $54,37^\circ$  pour l'hématite et  $2\theta=35,56^\circ$  et  $57,44^\circ$  et  $62,88^\circ$  pour la magnétite qui sont les minéraux les plus dominants de l'échantillon (B).

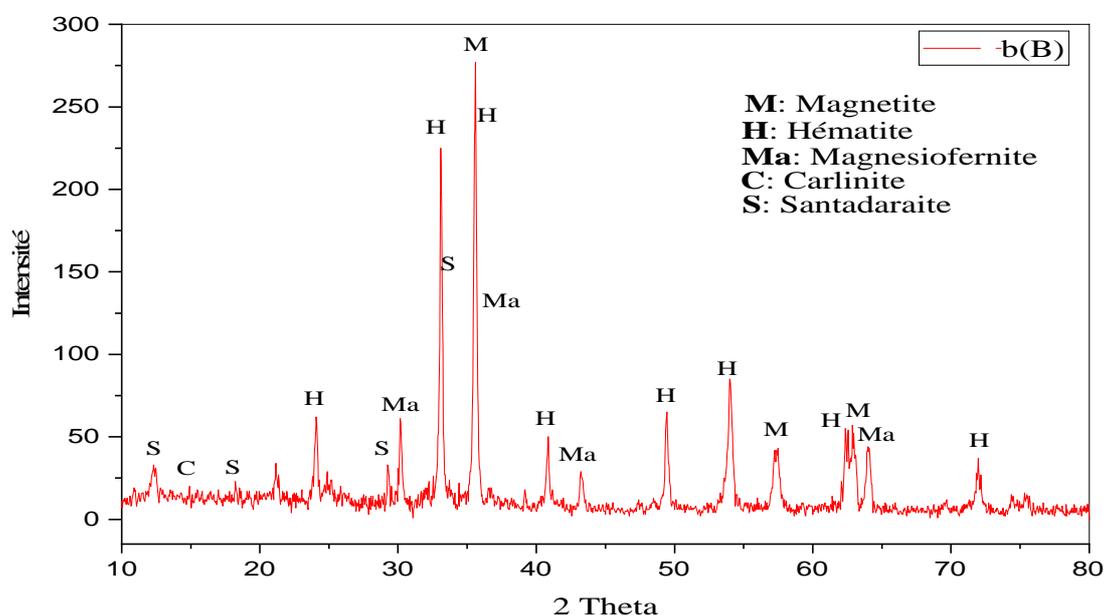
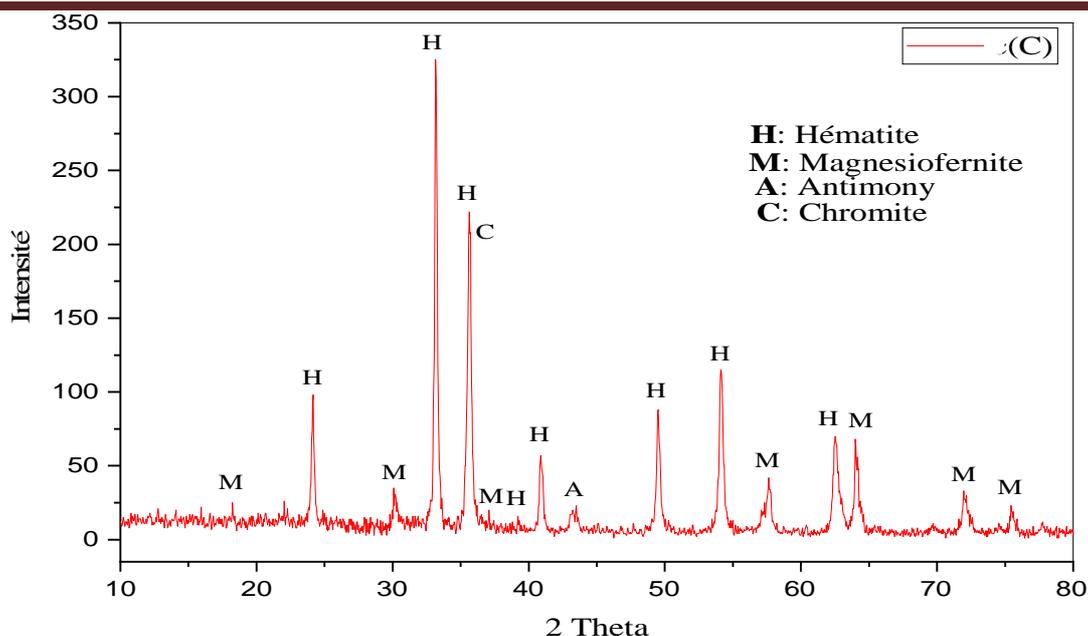


Figure IV.11. Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (B)

### IV.5. 3. Résultats du grillage magnétisant

Après le traitement thermique de l'échantillon, le diffractogramme de la DRX représenté sur la (figure IV.12) nous montre une légère variation dans l'intensification des pics et la disparition de certaines phases minéralogiques comme : la magnétite et l'apparition de nouvelles phases comme Chromite et l'Antimony. Ceci peut être expliqué par l'oxydation des constituants après l'opération de grillage magnétisant. On observe sur le diffractogramme que l'hématite est le minéral le plus dominant et représenté par les pics les plus intenses à  $2\theta=24,23^\circ$  et  $33,22^\circ$  et  $35,67^\circ$  ... et  $54,17^\circ$ .

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE



**Figure IV.12.** Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (C)

### IV.5. 4. Résultats de séparation magnétique (avant et après grillage magnétisant)

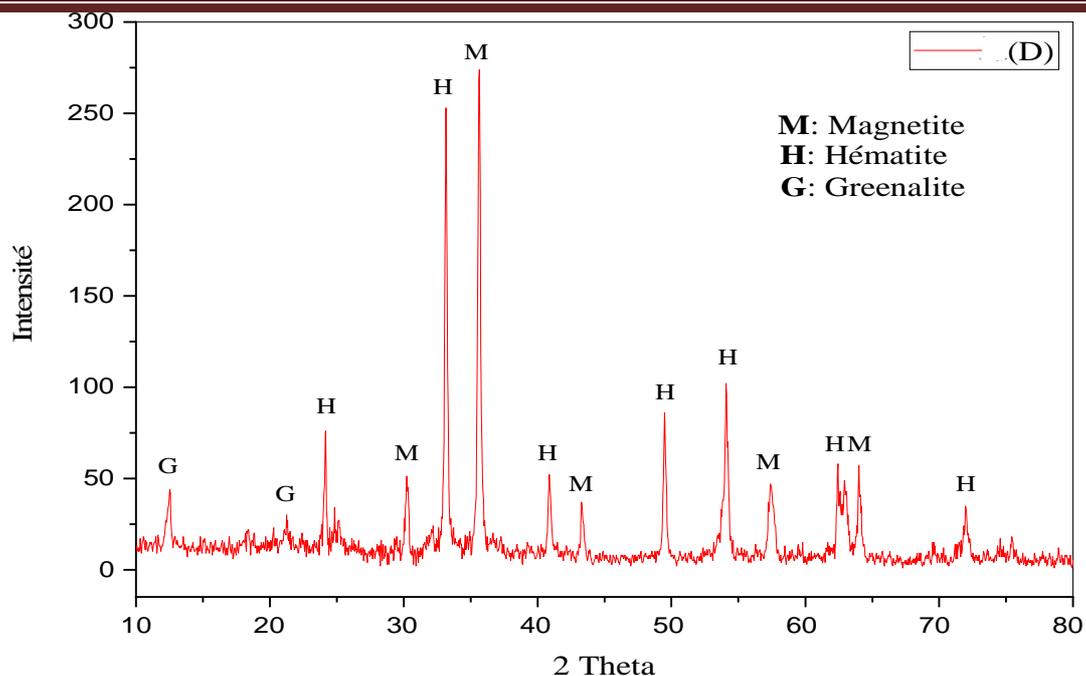
Suivant le (Tableau IV.2), le rendement de la séparation magnétique de l'échantillon brut (D) se montre élevé ou la fraction magnétique est récupérée à 60% par rapport à la fraction non magnétique de rendement de 40%

**Tableau IV. 2.** Résultats de séparation magnétique de l'échantillon (D)

Alimentation	Produits	Poids (g)	Rendement (%)
1500g	Fraction magnétique	900g	60%
	Fraction non magnétique	600g	40%

La composition minéralogique du concentré de la séparation magnétique de l'échantillon (D) est représentée par le diffractogramme de la DRX (figure IV.13), les spectres nous montrent que l'échantillon est constitué principalement de magnétite, hématite et greenalite, et que la magnétite et l'hématite sont les phases minéralogiques les plus dominantes aussi la présence de la greenalite, ce qui confirme aussi la nature magnétisante de minerai de fer de GDj.

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE



**Figure IV.13.** Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (D)

Les résultats de la séparation magnétique de l'échantillon (E), grillé à 900°C sont représentés dans le tableau IV. 3. Le tableau montre que les rendements de la séparation magnétique augmentent ce qui explique que le pourcentage de la fraction magnétique récupérée est de 80%, une différence de 20% par rapport à celle enregistrée dans (Tableau IV.3) et qui correspond à l'échantillon (D). Une diminution remarquable dans la fraction non magnétique de 20% dans cette analyse et 40% dans l'échantillon (D), soit une différence de 20%.

**Tableau IV. 4.** Résultats de la séparation magnétique de l'échantillon (E)

Alimentation	Produits	Poids (g)	Rendement (%)
1500g	Fraction magnétique	1200g	80%
	Fraction non magnétique	300g	20%

La (figure IV.14) illustre le Diffractogramme par rayons X (DRX) qui correspond à l'échantillon (D) après un grillage et une séparation magnétique.

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINÉRAI DE FER DE GARA DJEBILETE

le Diffractogramme nous montre uniquement les pics qui correspondent à l'Hématite et à la Magnétite et que l'Hématite est le minéral le plus dominant. Il est présenté par les pics les plus intenses  $2\theta=33,20^\circ$  et  $35,59^\circ$  ce qui confirme l'efficacité de la combinaison des procédés de grillage et de la séparation magnétique.

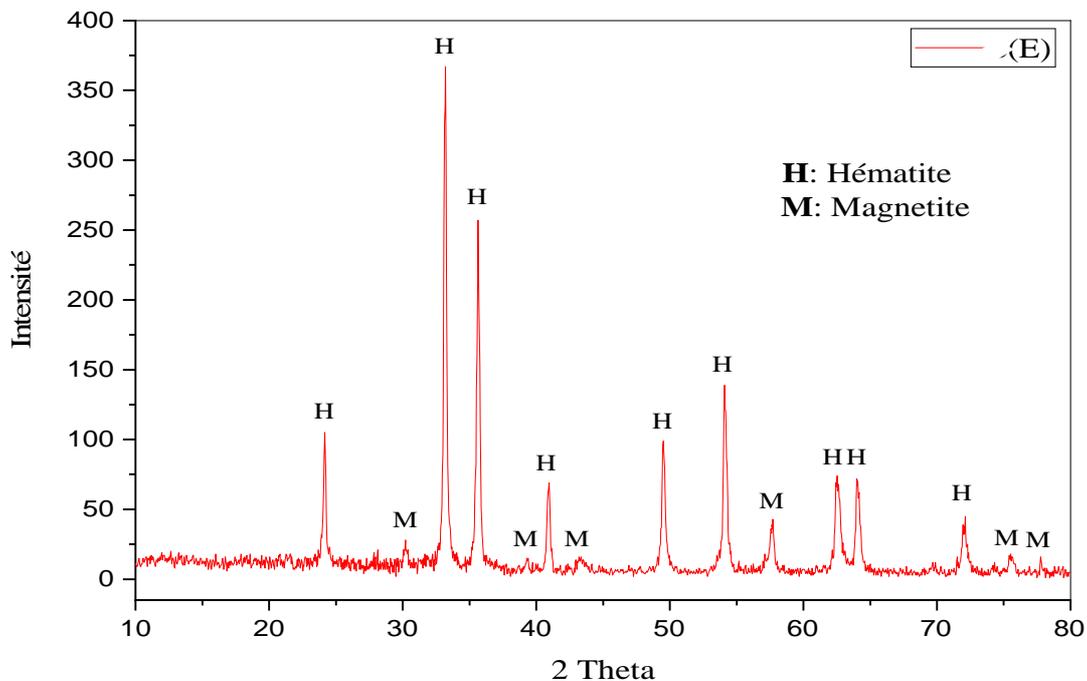


Figure IV.14. Diffractogramme par rayon X de l'échantillon (E)

L'histogramme de la figure IV.15, nous donne les différences des constituants (minéral) qui existent entre l'ensemble des échantillons traités par les différents procédés mécaniques (réduction dimensionnelle, grillage magnétisant, séparation magnétique) par rapport à ceux de l'échantillon global.

D'après les résultats mentionnés dans cette figure, on constate que la goéthite est présente uniquement dans l'échantillon du minerai brut par contre la présence de l'hématite est remarquée dans tous les autres échantillons avec une teneur élevée (pics très intenses). On constate aussi que les meilleures teneurs des éléments ferriques sont obtenues dans l'échantillon (E), après un grillage magnétisant et une séparation magnétique ce qui confirme que ces deux derniers procédés sont efficaces dans l'enrichissement du minerai de fer oolithique de GDj.

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

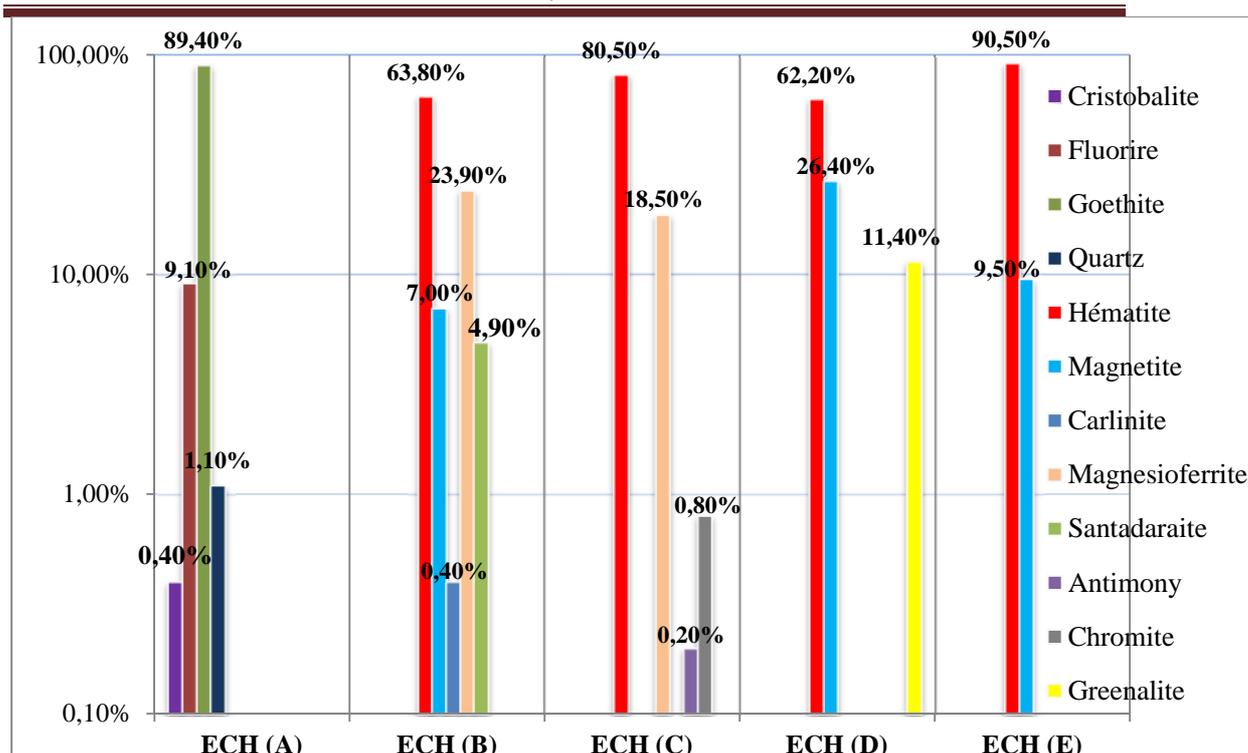


Figure IV.15. Histogramme des éléments majeurs de chaque échantillon.

### IV.5. 5. Résultats de la lixiviation

L'ensemble des résultats d'analyses chimiques par FX de différents échantillons (A, B, C, D, E) sont présentés dans les (Tableaux :IV.1, IV.4, IV.5, IV.6 et IV.7).

#### A) L'échantillon (B)

D'après les résultats du tableau IV.4), qui montrent les résultats de l'analyse chimique de l'échantillon (B) brut broyé à  $-63\mu\text{m}$ , sa lixiviation a montré une augmentation de la teneur de fer (de 88,6% à 90,4%) et une réduction de la quantité de phosphore (0,661% à 0,325%), qui explique une élimination d'environ de 54% de la quantité initiale de phosphore qui a été éliminée par la concentration en  $\text{HNO}_3$  de (20%), 0,296% à une concentration en  $\text{HNO}_3$  de (30%), 0,279% à 40% en  $\text{HNO}_3$  -en fonction de la concentration en  $\text{HNO}_3$ , on constate aussi la réduction de la quantité de certains éléments comme le chrome, silice, titane et aluminium.

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

Tableau IV. 5. Résultats de FX de l'échantillon (B)

Elements (%)		Fe	P	Si	Al	Ca	Ti	Mg	Cr
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	90.4	0.325	3.14	3.50	0.366	0.221	0.403	1.18
	30	89.7	0.296	3.84	3.79	0.393	0.197	0.327	1.07
	40	88.6	0.279	3.75	3.71	0.384	0.193	0.319	0.986
Oxydes (%)		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	86.5	0.556	6.15	5.02	0.378	0.269	0.513	1.24
	30	85.4	0.504	6.15	5.42	0.405	0.239	0.414	1.12
	40	85.2	0.462	6.28	5.83	0.416	0.21	0.316	1.03

D'après la (figure IV.16), on remarque une légère augmentation de la quantité de fer et une libération du chrome par rapport à la quantité initiale après concassage et broyage, après on constate une diminution de P et Cr à chaque augmentation de pourcentage de l'acide HNO<sub>3</sub>.

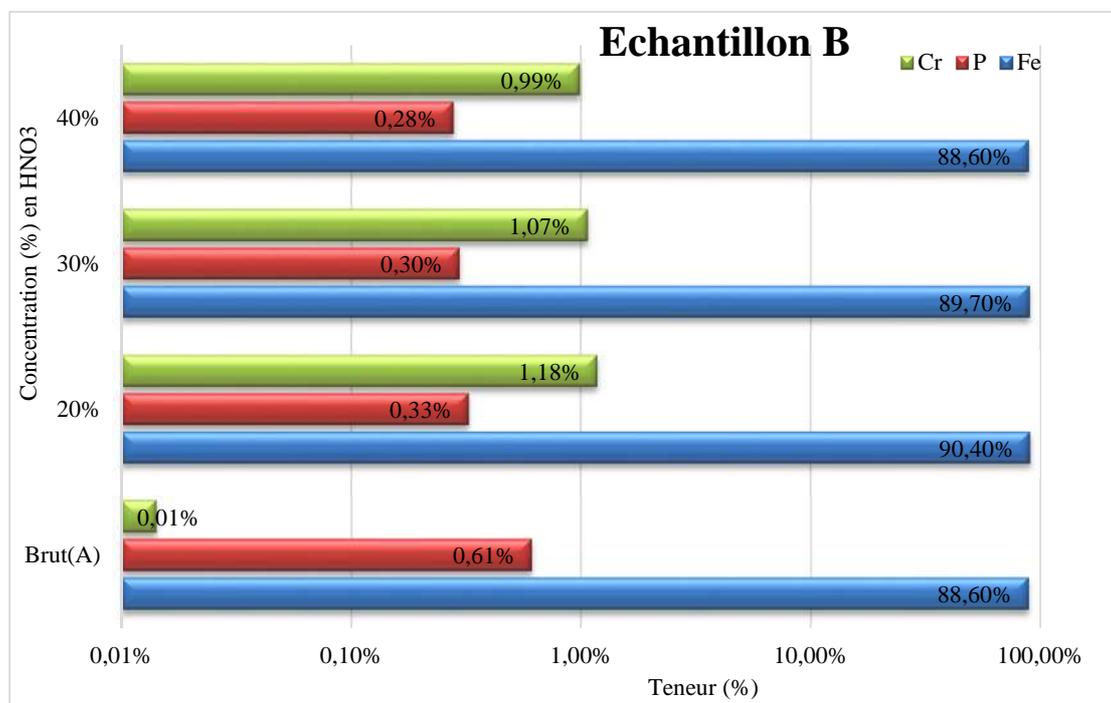


Figure IV.16. Résultats de l'analyse chimique par FX de l'échantillon (B) .

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

### B) L'échantillon (C)

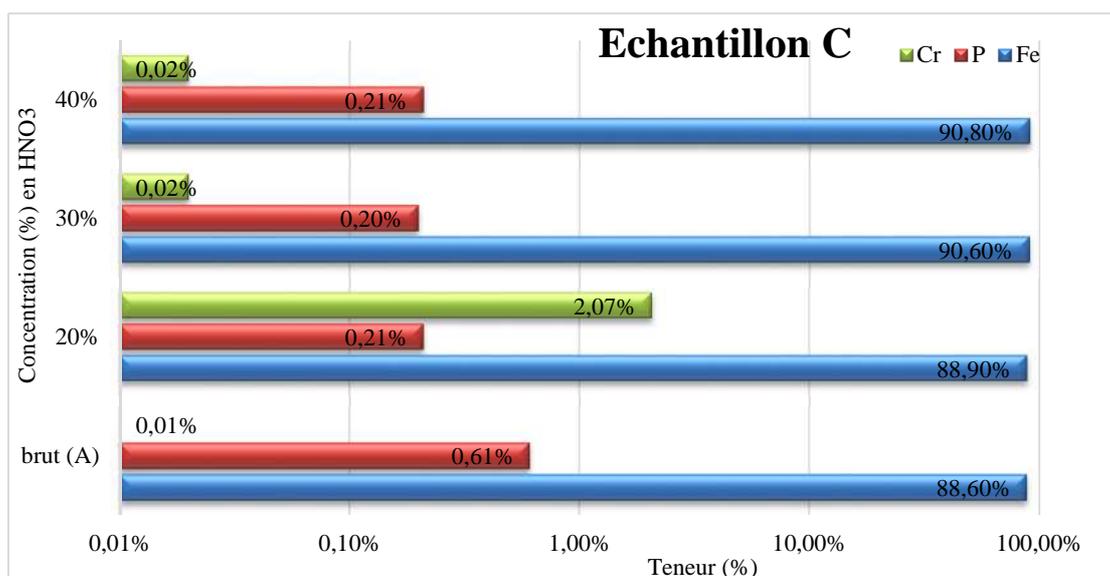
Le (Tableau IV.5) montre les résultats de la lixiviation de l'échantillon grillé (C). D'après ces résultats, on remarque que la teneur de fer s'augmente avec l'augmentation de la concentration de l'acide nitrique HNO<sub>3</sub> (88.9%, 90.6%, 90.8%) en Fe à (20%, 30%, 40%) en HNO<sub>3</sub> respectivement. D'un autre côté on constate qu'une baisse de la teneur de phosphore après de 75% de sa teneur initiale est observée dans ce Tableau. Pour les autres éléments aucune diminution remarquable n'a été enregistrée dans les valeurs de leurs teneurs.

**Tableau IV. 6.** Résultats de FX de l'échantillon (C)

Elements (%)		Fe	P	Si	Al	Ca	Ti	Mg	Cr	Mn
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	88.9	0.210	3.57	3.94	0.354	0.222	0.369	2.07	-
	30	90.6	0.200	3.58	3.99	0.335	0.240	0.362	0.0222	0.366
	40	90.8	0.205	3.99	3.91	0.346	0.238	0.366	0.0227	0.359
Oxydes (%)		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	84.6	0.358	5.73	5.65	0.364	0.268	0.468	2.16	-
	30	86.4	0.504	5.74	5.71	0.346	0.291	0.459	0.0237	0.323
	40	85.7	0.462	4.13	3.41	0.35	0.288	0.01	0.0241	0.26

D'après la Figure IV.17 on constate que le chrome a été presque éliminé (0.02%), mais pour le phosphore nous avons obtenu les mêmes résultats que l'échantillon (B) surtout avec le traitement par 40% en HNO<sub>3</sub> avec une légère augmentation dans la quantité de l'élément fer. Donc le procédé de grillage magnétisant sert à diminuer la teneur des éléments comme impuretés et aussi la libération des éléments comme l'hématite et la magnétite.

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE



**Figure IV.17** .Résultat d'analyse chimique par FX de l'échantillon (C) après grillage a 900°C

### C) L'échantillon (D)

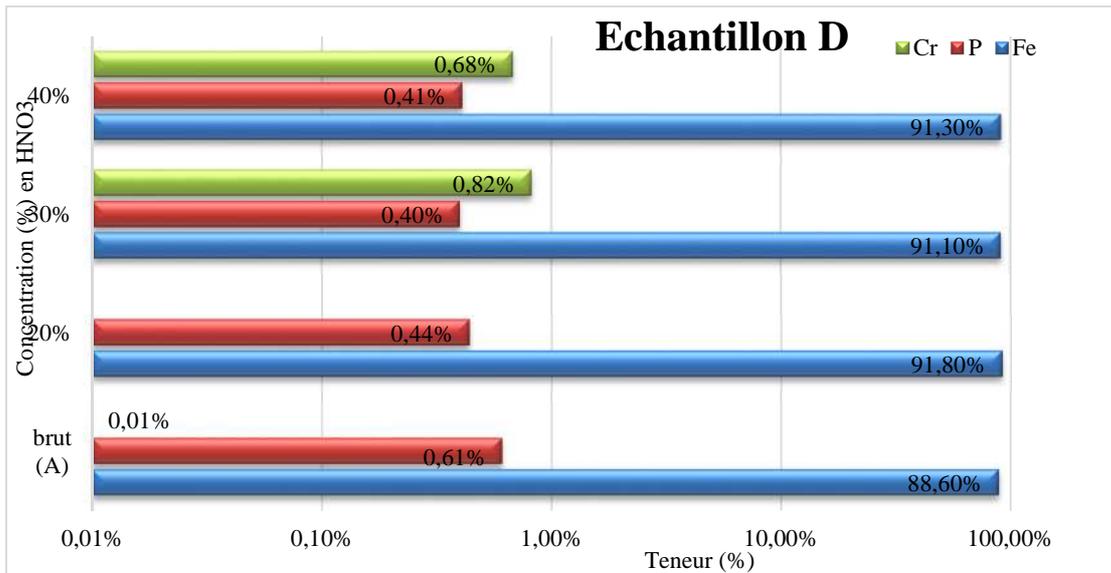
Le (TableauIV.6)présenteles résultats de la lixiviation de concentré de l'échantillon après séparation magnétique(D) ou on a eu des teneurs de fer très élevé environ 91% par contre les teneurs de P sont pas bien diminué environ 35% de teneur initiale qui a été éliminé .

**Tableau IV. 7.**Résultats de FX de l'échantillon (D).

Elements (%)		Fe	P	Si	Al	Ca	Ti	Mg	Cr	Mn
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	91.8	0.444	3.26	3.30	0.286	0.228	0.233	-	0.141
	30	91.1	0.401	3.19	3.31	0.360	0.235	0.247	0.824	-
	40	91.3	0.406	3.24	3.20	0.314	0.229	0.261	0.682	-
Oxydes (%)		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	87.9	0.759	5.26	4.75	0.296	0.278	0.297	-	0.125
	30	87.2	0.686	5.15	4.75	0.372	0.286	0.315	0.866	-
	40	87.5	0.695	5.23	4.60	0.325	0.279	0.333	0.717	-

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

Dans la figure IV.19, on observe que le fer a une teneur très élevée dans chaque concentration de l'acide, mais la teneur de phosphore par comparaison à sa teneur dans l'échantillon global on constate qu'elle est toujours élevée, et même remarque a été attiré pour la teneur en chrome .



**Figure IV18.** Résultats d'analyse chimique par FX de l'échantillon (D) après séparation magnétique a basse intensité .

### D) L'échantillon (E)

Le ( TableauIV.7) représente les résultats de la lixiviation du concentré de l'échantillon grillé et séparé magnétiquement.

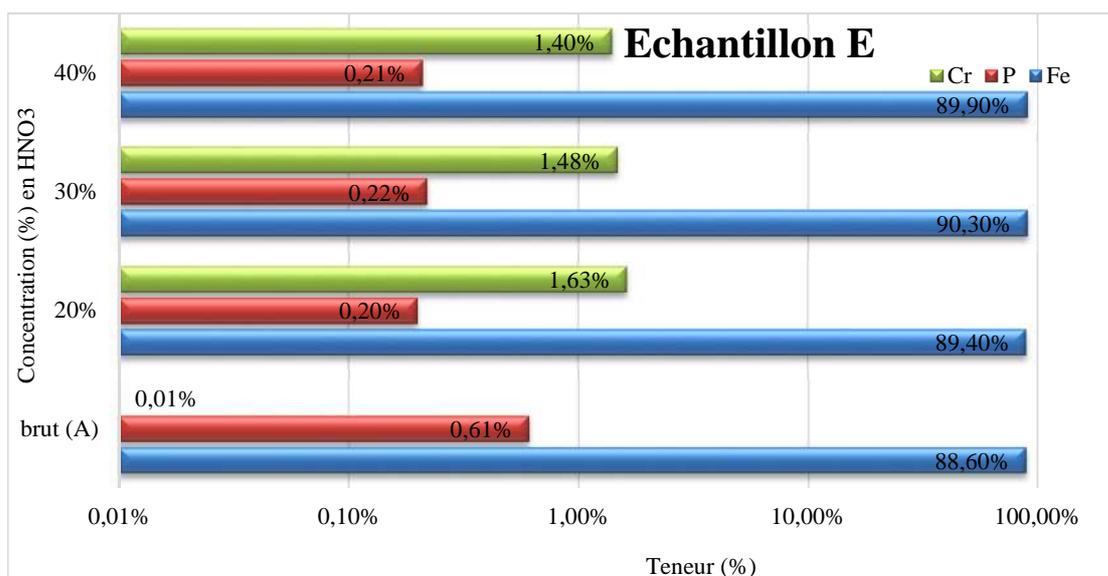
- la teneur de fer est exemplaire presque 90%
- la teneur de phosphore était diminuée jusqu'à 70%
- le chrome n'est pas éliminé mais sa teneur est vraiment faible .

## CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE

**Tableau IV. 7.** Résultats de FX de l'échantillon (E).

Elements (%)		Fe	P	Si	Al	Ca	Ti	Mg	Cr
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	89.4	0.199	3.83	3.64	0.298	0.192	0.362	1.63
	30	90.3	0.223	3.45	3.32	0.284	0.235	0.357	1.48
	40	89.9	0.206	3.78	3.45	0.281	0.269	0.344	1.63
Oxydes (%)		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Concentration de HNO <sub>3</sub> en (%)	20	85.2	0.340	6.15	5.21	0.307	0.232	0.460	1.70
	30	86.3	0.381	5.56	4.78	0.293	0.286	0.454	1.56
	40	85.2	0.351	6.08	4.95	0.290	0.325	0.437	1.46

La figure IV.19 nous montre la variation de la teneur en phosphore et de fer en fonction de la concentration en HNO<sub>3</sub> près le grillage et la séparation magnétique la nous indique que la quantité de phosphore été diminuée tandis que la teneur de fer est toujours élevée. On peut dire que les meilleurs résultats de l'enrichissement de notre échantillon sont rapportés dans cet échantillon (E).



**Figure IV .19.** Résultats d'analyse chimique par FX de l'échantillon (E) après grillage et séparation magnétique

## **CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

### **IV.5.6. Discription des résultats de la lixiviation**

D'après les résultats obtenus dans la partie de la lixiviation, on observe une teneur élevée en fer (Fe) dans chaque échantillon ce qui confirme la nature ferrifère du minerai de gara Djebilet, ainsi quela présence du phosphore (P) dans tous les échantillons avec des teneurs élevées.

\_ Le meilleur résultat obtenu contient une teneur très élevée en Fe (91.8%) qui présente l'échantillon (D) avec une concentration de l'acide  $\text{HNO}_3$  de 20%.

Par contre la plus faible teneur de phosphore de (0.2%) à était remarqué dans l'échantillon (E) avec une concentration de l'acide  $\text{HNO}_3$  de 20%.

Mais en générale, l'échantillon E est l'idéal par sa teneur élevée de fer et ces faibles teneurs des autres impuretés comme (P, Ca, Mg, Cr).

Dans la partie des oxydes on remarque la présence de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dans tous les échantillons ce qui mène à conclure que le minerai de fer de gara Djebilet est de type d'hématite.

\_ D'après les résultats on constate que la concentration idéale de l'acide est à 20% ou on a eu la meilleure teneur de Fe et la faible teneur de P.

### **IV.6. Conclusion :**

Les deux procédés de broyage et de concassage présentent une étape obligatoire car elle permet de libérer les différents éléments d'un échantillon.

La concentration de l'acide joue un rôle important dans la lixiviation, une concentration élevée peut dissoudre l'élément à l'extraire.

Pour avoir des bons résultats dans une attaque chimique il fallait que les diamètres des particules d'un échantillon ne dépassent pas 0.063 mm.

La vitesse et la durée d'agitation sont des paramètres essentiels dans une attaque chimique, plus que la vitesse est grande la dissolution des impuretés donnerai des bons résultats.

## **CHAPITRE IV : ENRICHISSEMENT DE MINERAI DE FER DE GARA DJEBILETE**

---

L'application de la séparation magnétique à basse intensité est efficace pour la récupération de la fraction ferrifère du minerai de Gara Djebilet, mais la qualité des concentrés est insuffisante autant que la quantité en phosphore n'est pas diminuée. L'opération du grillage magnétisant a permis aux échantillons riches en hématite d'être réduit en magnétite, ce qui a facilité son extraction par la séparation magnétique.

La lixiviation après séparation magnétique et grillage donne des résultats satisfaisant pour la diminution de la quantité de phosphore jusqu'à des valeurs acceptables .

Des essais de lixiviation avec le changement des paramètres suivants : l'augmentation de la concentration d'acide, l'élévation de la température de la lixiviation, la vitesse d'agitation et avec la diminution de la taille des particules peuvent améliorer nos résultats.

# CONCLUSION GENERALE

---

## Conclusion générale

L'exploitation des gisements des minerais de fer a toujours eu une place prépondérante dans l'industrie extractive du pays.

Le fer est un élément ferromagnétique formé par un processus physique et chimique, ce dernier se trouve en quatre gisements tels que sédimentaires, ignés, hydrothermales, surfacique. Il existe plusieurs types de minerais de fer comme l'hématite, Limonite, Goethite, Ilménite, Magnétite, Pyrite, Sidérite.

Le gisement de fer de Gara Djebilet est l'un des plus grands dépôts naturels de fer oolithique dans le monde, découvert en 1952 par le géologue Français M Gevin, à Tindouf en Algérie.

Le minerai de Gara Djebilet est un minerai sédimentaire oolithique ayant plus ou moins subi des phénomènes d'oxydation. Les oolithes sont constitués par la sidérose et le chlorite. C'est un minerai acide contenant des teneurs en  $\text{SiO}_2$  élevées, d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 à 5%), de phosphore (0.8%) et de chrome (0.03%). Le minerai de fer de Gara Djebilet a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des organisations diverses, avec des résultats variables.

La séparation magnétique et la lixiviation sont les deux méthodes les plus répondues dans l'enrichissement des minerais de fer, elles permettent l'élimination d'une grande partie d'impuretés non magnétiques ou de récupérer les éléments ferrières.

L'analyse par DRX de l'échantillon initial montre que la majorité des pics sont prédominés par l'hématite et la magnétite et la calcite en plus des composants minéralogiques mineurs.

Les analyses chimiques et minéralogiques effectuées sur l'échantillon représentatif prélevé dans la zone étudiée montrent la forte présence d'oxyde de phosphore  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Cela affecte négativement la qualité des produits sidérurgiques.

L'effet de la granulométrie sur le phosphore pendant la lixiviation, montre comment la taille des particules influence la réduction de la quantité du phosphore. Plus la taille des

## CONCLUSION GENERALE

---

particules est fine, plus le taux de phosphore se diminue avec l'augmentation de la concentration de l'acide nitrique.

L'acide nitrique est utilisé comme réactif dans l'attaque chimique en proportion avec le minerai de fer de Gara Djebilet. L'impact de ce dernier est important puisqu'il contribue à la réduction du taux phosphore dans le concentré de fer.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

---

- [1] Ayadi, B., Characterization and choice of a Treatment of copper-iron ore Douamis (ouenza), Option: Management and valorization of mineral resources, thesis magister in mines, Badji Mokhtar University (Annaba), Algeria, 2010, pp. 4– 11.
- [2] NOUIOUA Asma (2018) LIXIVIATION ET EXTRACTION DU FER A PARTIR DE LA ROCHE FERRIQUE DE LA MINE DE L'OUENZA.thèse Doctorat LMD en Génie des procédés. Université Mohamed Khider – Biskra Soutenu publiquement le : 03/05/2018
- [3] Elmquist and R.H. Behrendt.(1994). Autogenous Mill CapacityImprovementat Hibbing TaconiteCompany, 67th AIME Proceeding, Minnesota Section, Duluth
- [4] Gross, G.A. (1970) Nature and occurrence of iron ore deposits: in United Nations, Department of Economic and Social Affairs (eds) Survey of world iron ore resources, occurrence and appraisal. pp. 13-31. United Nations, New York
- [5] Pradip, R. S., Sankar, T. A. P., &Khosla, N. K. (1993). Beneficiationstudies on alumina-richIndianiron ore slimesusingselectiveflocculants and flotationcollectors. In XVIII International MineralProcessingCongress (pp. 1289-1294). Australia: Sydney.
- [6] Environmental Protection Agency, EPA 530-R-94-030. (August 1994). Technical Resource Document, Extraction and Beneficiation of Ores and Minerals. Office of Solid Waste, SpecialWasteBranch 401 M Street, SW Washington, DC 20460. Vol 3.
- [7] BADJOU DJ Salem(2011) Etude des Propriétés Magnétiques du Minerai de fer de Sidi Maâroutf-Jijel en vue d'un Enrichissement Par Séparation Magnétique. Memoire Magister en mines . Universite Badji Mokhtar Annaba . Soutenu le 10 Janvier 2011
- [8] Klemic, H., James, H.L. and Eberlein, D.G. (1973) Iron: in Brobst D.A. and Pratt W.P. (eds) 'United States MineralResources.' US Geological Survey Professional Paper 820, 291-306
- [9] Kennedy, B.A. (1990) Surface Mining, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. 2nd Edition. pp. 48-60. Port City Press. Baltimore, Maryland
- [10] Kimberley, M.M. (1989) Nomenclature for iron formations. Ore GeologyReviews 5. pp. 1-12
- [11] Harry, K. Harold, L.J. and Donald, G.E. (1973) Iron, in United States MineralResources, US Geological Survey, Professional Paper 820, pp. 298-299
- [12] Edwards, R. and Atkinson, K. (1986) Ore DepositGeology and its influence on mineral exploration. p. 779. Chapman and Hall, London

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

---

- [13] Ferenczi, P. (2001) Iron ore, manganese and bauxite deposits of the Northern Territory. Northern Territory Geological Survey, Report 13, December 2001. pp. 13-41. Government Printer of the Northern Territory, Darwin
- [14] Van Houten, F.B. and Hou, H.F. (eds.) (1990) Stratigraphic and palaeogeographic distribution of Palaeozoic ironstones: in McKerrow WS and Scotese CR 'Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography.' Geological Society Memoir 12, pp. 87-93.
- [15] Howard, L.H. (ed.) (1987) Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Mining Engineering Handbook, 2nd ed., vol. 1. p. 212. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. New York
- [16] Pollard, P.J. (ed.) (2000) Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralisation: in Porter TM Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related ore deposits: a global prospective. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 27-41
- [17] BUMBY A J et al., 2005. The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa Original Research Article ; sciencedirect pp. 1-12.
- [18] Kashala Mpanga. Notes de cours de métallurgie des métaux non ferreux destinées aux étudiants de troisième graduat métallurgie, Faculté Polytechnique inédit, UNIKOL, 2014- 2015.
- [19] BERSI M et al., 2010. Aerogravity and remote sensing observations of an iron deposit in Gara Djebilet, southwestern Algeria. Journal of African Earth Sciences, 116, 134-150.
- [20] KKOUCHE M., 2007. Application de la datation par traces de fission à l'analyse de la thermicité de bassins à potentialités pétrolières. Exemple de la cuvette de Sbaâ et du bassin de l'Ahnet-Nord (plate-forme saharienne occidentale, Algérie), Thèse de doctorat, l'Université de Bordeaux 1.
- [21] AMROUCHE F., Nedjari A, 2004. Géodynamique du bassin de Tindouf au paléozoïque.
- [22] BITAM L et al., 1996. Les formations paléozoïques anté-carbonifères du sous-bassin de Djebilet (flanc sud du bassin de Tindouf, Nord-Ouest du Sahara Algérien). Mémoires du Service Géologique de l'Algérie, n° 8, pp. 91-111
- [23] ADJISSA MASSINISSA ; mémoire Analyse et caractérisation de minerai de fer de Gara Djebilet ouest (Tindouf \_ Algérie ).univ.bejaia-2019

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

---

- [24] FABRE, J., 2005. Géologie du Sahara occidental et central. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren
- [25] YAICHI, A., ZAOUÏ, A., & BEN ADLA, M. (2016). étude litho stratigraphique et sédimentologique du dévonien inférieur - dévonien moyen D'OUED TALHA (TINDOUF) (Mémoire de Master, UNIVERSITE de TLEMCEEN) .
- [26] FERRAL. Projet de Traitement du minerai de Gara Djebilet 2015
- [27] BERSI, M., & CHABOU MOULLEY, C. (2016). Cartographie et mode de mise en place des dykes et des sills de la province magmatique de l'Atlantique central (CAMP) dans le bassin de Tindouf. (thèse doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène) .
- [28] CHABOU A., 2001. Lithostratigraphie du bassin de Tindouf.
- [29] CHABOU M C., 2001. Etude Pétrographique et Géochimique du Magmatisme Mésozoïque de l'ouest de la Plate-forme Saharienne. Mémoire de Magister, ENSP, Alger.
- [30] GUERRAK S., 1988. Geology of the early Devonian oolitic iron ore of the Garadjebilet field, Saharan platform, Algeria. Ore geology reviews, 3(4), 333-358
- [31] DESTOMBES J et al., 1985. Sur la tectonique précoce hercynienne et le rôle des accidents antéschisteux dans le Haut-Atlas occidental paléozoïque au Sud d'Imi-n-Tanout (Maroc). Relations avec les Djebilet occidentales. C. R. Acad. SCI., Paris, sér. II, t. 301, p. 1157-1162
- [32] GUERRAK S et al., 1985. Les minéralisations ferrifères du Sahara Algérien : le gisement de fer oolithique de Mecheri Abdelaziz (bassin de Tindouf).
- [33] le rapport de projet de traitement de minerai de fer de gara Djebilet (conférence de presse, premier ministre Mr Abdelmalek Sellal 2015 ©2019 jijel.info Designed by Hurricane Media AQS 12-03-2015 00:11 ) .
- [34] Alwayai C., Traitement hydrométallurgique de minerais cupro-cobaltifère du Katanga, D.E.A., Université de Liège, 2006.
- [35] Mwepuwa Nzovu. Notes de cours de métallurgie générale destinées aux étudiants de deuxième graduat métallurgie, Faculté Polytechnique, UNIKOL, inédit, 2013-2014.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

---

[36] Blazy P., La Métallurgie extractive des métaux non ferreux, Société de l'industrie minérale, Saint Etienne, 1979.

[37] M. Jacob-Duliere, cours de métallurgie spéciale destiné aux étudiants de 5eme Mines de la faculté polytechnique de Mons, 1980-1981 ;

[38] Habashi F., Principles of Extractive Metallurgy, volume 2 Hydrometallurgy, Gordon and Breach, Science Publishers, New York, 1970.

[39] [10]. COPE (L.W.), Vat Leaching, an overlooked process. E/MJ, pp.17-24, (1999).

[40] Patrick MbwebKatshil, Etude de la lixiviation en tas du minerai cupro-cobaltifère dans les mines de la Province du Katanga en République Démocratique du Congo, International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 20 No. 2 May. 2017, pp. 575-588

[41] Willy Kitobo Samson ‘ Dépollution et valorisation des rejet miniers sulfurés du KATANGA’ « cas des tailing de l’ancien concentrateur de Kipushi ».

[42] Isabelle Piché(1989). Etude de substrats utilisés lors de la solubilisation bactérienne des métaux lourds dans les boues résiduaires anaérobies. Mémoire de fin d’étude . l’Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau)(avrile 1989).

[43] ZIANE Asma ,ZIANE Khawla(2015). Étude des facteurs influant sur l’extraction de l’or par lixiviation en tas -cas de la mine d’Amesmessamémoire de fin d’étude .université de Bejaia le 27 / 06 /2015

[44] Michel Bonan., Lixiviation de la chalcopryrite en milieu chlorure: contribution à l’étude de la cinétique et du mécanisme de la réaction, Université des sciences et technique, LILLE, 1998.

[45] Rodriguez, Y., Ballester, M.L., Blazquez, F., Gonzalez, J.A., Munoz, J.A., 2003. New information on the chalcopryrite bioleachingmechanismatlow and high temperature. Hydrometallurgy 71, pp 47-56.

[46] Rao, G.V., Markandeya R., Sharma, S.K., 2016. Recovery of Iron Values fromIron Ore Slimes of DonimalaiTailing Dam. Transactions of the Indian Institute of Metals .Volume 69, Issue 1, 1 January 2016, Pages 143-150.

[47] Serge Bouchard, Traitement du minerai, édition le Criffon d’argile, 2001, Canada.

[48] Barry A. Wills, Tim Napier-Munn .Mineralprocessingtechnology, Elsevier Science &Technology Books 2006

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

---

[49] Gosselin A., Blackburn D., Bergeron M., 1999. Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques, Direction de la Protection de l'Environnement, Sainte-Foy, Canada.

[50] Nakai Y., Mishima F., Akiyama Y., Nishijima S., 2011. Development of high gradient magnetic separation system under dry condition, *Physica C* 470, 1812-1817.

# RESUME

## Résumé

En l'absence d'une étude approfondie du traitement du gisement de minerai de fer oolitique de Gara Djebilet d'une part et en raison des caractéristiques chimiques minéralogiques complexes et d'autre part, la localisation et l'endroit désertique et le climat aride de la région ont fait que l'extraction et l'exploitation du gisement sont très difficiles.

Dans un but de réduire les quantités de  $P_2O_5$  présentes dans le minerai de fer et améliorer la qualité du concentré pour son utilisation dans l'industrie sidérurgique, des échantillons sont soumis à une caractérisation physico-chimique. Pour se faire, des techniques d'analyses ont été utilisées telles que la fluorescence des rayons X, et la diffractométrie de rayons X.

Les résultats obtenus sont très encourageants et importants en termes de récupération et de teneur en phosphore. En procédant à la lixiviation et la séparation magnétique. En outre, ce processus est effectué dans différentes conditions expérimentales, les paramètres de lixiviation étudiés liés à la concentration de l'acide nitrique ( $HNO_3$ ) utilisé pour lixivier le fer, la taille des particules de minerai de fer, et la température de grillage.

**Mots clés :** Gara Djebilet, Minerai de fer, Oolitique, Phosphore, Grillage, lixiviation.

## Abstract

In the absence of a detailed treatment study of the oolitic iron ore from Gara Djebilet deposit on the one hand and due to the complex mineralogical chemical characteristics and on the other hand the geographic and climatic situation of the region, the extraction and exploitation are very difficult. In order to reduce the presence of  $P_2O_5$  in the iron ore and to improve the quality of the concentrate for its use in the steel industry, samples are subjected to physicochemical characterization. To do this, many techniques were used, such as X-ray diffraction, and x-ray fluorescence.

The results obtained by this method are very encouraging and important in terms of recovery and phosphorus content. In addition, by leaching, this process is carried out under different experimental conditions such as: the leaching parameters studied related to the concentration of nitric acid for iron ore, the size of the iron ore particles, the roasting temperature.

**Keywords:** Gara Djebilet, iron ore, oolitic, phosphorus, roasting, leaching

## ملخص

في ظل عدم وجود دراسة متعمقة لمعالجة رواسب خام الحديد الأوليتي في غار جبيلات من ناحية بسبب الخصائص الكيميائية المعدنية المعقدة ومن ناحية أخرى فإن الوضع الجغرافي والمناخي للمنطقة صعب للغاية. من أجل تقليل وجود  $P_2O_5$  في خام الحديد وتحسين جودة التركيز للاستخدام في صناعة الصلب، تخضع العينات للتوصيف الفيزيائي الكيميائي. للقيام بذلك، تم استخدام تقنيات تحليلية مثل مضمن الأشعة السينية، قياس حيود الأشعة السينية. النتائج التي تم الحصول عليها بهذه الطريقة مشجعة للغاية ومهمة من حيث شروط الاسترداد ومحتوى الفسفور. عن طريق الترشيح. بالإضافة إلى ذلك، يتم تنفيذ هذه العملية في ظل ظروف تجريبية مختلفة، حيث تمت دراسة معاملات الترشيح المتعلقة بتركيز حامض النيتريك لخام الحديد، وحجم جزيئات خام الحديد، ودرجة حرارة التحميص.

**الكلمات المفتاحية :** غار جبيلات، خام حديد، أوليتيك، فوسفور، تحميص، ترشيح