

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département des Mines et Géologie

*Mémoire de fin d'étude*

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

Option : Valorisation des Ressources Minérales

*Présenté par*

*M<sup>elle</sup> TALHA ABIR*

*M<sup>elle</sup> TIGHLIT LYNDA*

*Thème*

---

*Contribution à l'étude d'enrichissement de minerai de fer (Gara Djebilet) par méthode de torréfaction et d'attaque au chlorure de calcium*

---

Soutenu le 10 / 10 / 2021 devant le jury composé de :

Présidente : Mme. S. BOUNAB

Examineur : Mr. A. AKDIM

Encadreur : Mme. Z. SOUICI

U.A.M. BEJAIA.

U.A.M. BEJAIA.

U.A.M. BEJAIA.

Année Universitaire : 2020/2021

## *Remerciements*

*Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont à « ALLAH » le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promotrice Mme SOUICI, maitre de conférences à l'université de Bejaia pour L'orientation, la patience et la compétence qui ont constitué un apport considérable.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres de jury Mme BOUNAB et Mr AKDIM d'avoir accepté d'évaluer notre mémoire de fin d'étude.*

*Nous remercions ainsi Mr RAHAL ABDELGHANI en particulier pour sa grande culture scientifique et sa disponibilité.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers tous les enseignants de L'université Abderrahmane Mira qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce travail.*

*Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Abir & Lynda*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents. Ma mère pour m'avoir accompagné tout le long de ma vie, Je lui dois une fière chandelle. Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours rester fidèle aux valeurs morales que vous m'avez apprises.*

*A toutes mes adorables sœurs « Youssra », « Chaima », « Razika », ainsi que toute ma famille.*

*À mon binôme « Lynda » et sa famille et à tous mes amis qui ont toujours été présentes pour m'aider et m'encourager.*

*A ceux qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles de ma vie surtout « Hizia ».*

*Abir. T*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents. Ma mère pour m'avoir accompagné tout le long de ma vie, Je lui dois une fière chandelle. Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours rester fidèle aux valeurs morales que vous m'avez apprises.*

*A mes chers frères «Ahmed», « Mouloud », «Nassim», « Fawzi». A tous mes adorables sœurs « Nassima », « Sabrina », « Souraia », « Noura », « Aziza », « Hania », et mes nièces et neveux et mes belles sœurs, ainsi toute ma grande famille.*

*À mon binôme « Abir » et sa famille et a tous mes amies qui ont toujours été présents pour m'aider et m'encourager.*

*Lynda. T*

# *Sommaire*

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

## Chapitre I : Etude Bibliographique Sur Les Minerais De Fer

Introduction .....	1
I.1 Quelques notions utilisées : .....	1
I.3 Classification du minerais de fer.....	2
I.3.1 La teneur en fer .....	2
I.3.2 Le type de minerai .....	3
A. Les Sulfures.....	3
B. Les Carbonates .....	3
C. Les Oxydes / Hydroxyd de Fer .....	3
I.4 Les gangues associées aux minerais de fer .....	7
I.5 Les potentialités minières en Algérie.....	7
I.5.1 Minerai de fer.....	8
I.5.2 Production du minerai de fer en Algérie.....	8
I.5.3 Evolution de la production minière algérienne du minerai de fer et du fer métal de 2010 à 2015 .....	9
I.5.4 Les principaux gisements de fer .....	9
I.5.5 Les différents types de gisement de fer en Algérie.....	10
1. Gisements de Ségrégation .....	10
2. Gîtes de substitution dans les calcaires .....	10
3. Filons proprement dits et gisements d'allure filonienne .....	10
4. Les gisements sédimentaires .....	10
I.6 Gisement de fer sédimentaire.....	10
A. Les gisements de fer rubané (BIF : Banded Iron Formation) .....	10
B. Les gisements de fer oolithiques .....	10
I.7 Principaux types de dépôts de fer présents dans les sédiments .....	11
I.7.1 Origine et type des formations de fer.....	11
A. Fer rubané.....	11
B. Fer oolithique .....	11
I.7.2 Caractéristiques du fer oolithique .....	11

## Sommaire

I.7.3 Formation d'oolithe .....	12
I.7.4 La minéralogie des minerais de fer .....	13
I.8 Origines des minerais de fer .....	14
I.8.1 Processus de formation .....	14
I.8.2 Processus physiques et chimiques .....	15
I.8.3 Processus mécanique .....	15
I.9 Domaines d'utilisation du minerai de fer.....	15
Conclusion.....	15

### Chapitre II : Généralités Sur Le Gisement De Fer De Gara- Djebilet

Introduction .....	16
II.1 Situation Géographique .....	16
II.2 Contexte Géologique .....	17
II.2.1 Géologie Régionale .....	17
a.1 Le Massif Yetti- Eglab .....	18
a.1.1 La Série Inférieure.....	18
a.1.2 Le Précambrien Supérieur .....	18
1. La Série Du Yetti.....	18
2. La Série De Guelb-El-Hadid .....	18
a.1.3 Le Précambrien Supérieur .....	18
a.2 Le Bassin De Tindouf.....	19
a.2.1 Le Cambro-Ordovicien.....	19
A. Le Silurien .....	19
B. Le Dévonien Inférieur .....	19
C. Le Dévonien Moyen.....	20
D. Le Dévonien Supérieur.....	20
E. Le Carbonifère.....	20
F. Le Carbonifère Inférieur.....	20
G. Le Carbonifère Supérieur .....	20
a.3 Les Dépôts Détritiques Quaternaires .....	21
II.3 Structure Du Bassin De Tindouf .....	23
II.3.1 Evolution Géodynamique Du Bassin De Tindouf.....	24
A. l'orogénèse panafricaine .....	24

## Sommaire

B. la compression taconique (Caradocien) .....	24
C. la compression calédonienne.....	24
D. les mouvements hercyniens majeurs .....	24
II.4 Le magmatisme Mésozoïque du bassin de Tindouf .....	25
II.4.1 En affleurement .....	25
II.4.1.1 Le flanc nord du bassin de Tindouf .....	25
A. sills .....	25
B. dykes.....	25
C. Cheminées .....	25
II.4.1.2 Le flanc sud du bassin de Tindouf.....	26
A. en dykes.....	26
B. en sills.....	26
C. en massifs intrusifs .....	26
II.4.2 En sondage.....	27
II.5 La mine de Gara Djebilet.....	28
II.5.1 Stratigraphie du gisement .....	31
II.5.2 Caractérisation de minerai du gara Djebilet .....	31
II.6 Minéralogie de minerai.....	33
Conclusion.....	33

### Chapitre III : Préparation Des Echantillons Et Méthodes D'analyses

Introduction .....	34
III.1 Echantillonnage .....	34
III.1.1 Echantillonnage .....	34
III.1.2 Protocole de l'échantillonnage du minerai de gara djebilet .....	34
III.2 Prélèvent des échantillons .....	35
III.3 Préparations des échantillons pour l'analyse .....	35
III.3.1 Concassage .....	37
III.3.2 Division .....	37
III.4 Analyse granulométrique .....	38
III.5 Caractérisation physico-chimique du minerai de fer de gara djebilet.....	38
III.5.1 Préparation des échantillons.....	39
III.5.2 Méthodes d'analyse.....	39

## Sommaire

III.5.2.1 Diffraction des rayons X (DRX) .....	39
III.5.2.2 Analyse Par Fluorescence X (FX).....	41
III.5.2.2.1 Principe D'analyse .....	41
III.5.2.3 Analyse par infrarouge (IR) .....	42
III.5.2.3.1 Principe d'analyse .....	42
Conclusion.....	42

### **Chapitre VI : Caractérisation Physico-Chimique Et Traitement Du Minerai De Fer De Gara Djebilet-Tindouf**

Introduction .....	43
VI.1 Analyse granulométrique .....	43
VI.2 Caractérisation physico-chimique du minerai de fer de gara djebilet.....	45
VI.2.2 Fluorescence X (FX).....	51
VI.3 Traitement du minerai de gara djebilet .....	52
VI.3.1 Etude des paramètres influant sur la qualité du minerai .....	53
A. Effet de la température sur le minerai brut.....	53
B. Effet De La Distribution Granulométrique Sur La Réduction Du Phosphore .....	54
C. Effet De L'additif CaCl <sub>2</sub> Sur La Teneur En Phosphore Dans Le Minerai De Fer 56	
Conclusion.....	57

#### **Conclusion générale**

#### **Références bibliographiques**

#### **Annexes**

#### **Résumé**

#### **Abstract**

## Liste Des Figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1:</b> (A, B, C) Types de minerai de fer.....	3
<b>Figure I.2:</b> minéral d'hématite. ....	4
<b>Figure I.3:</b> minéral de limonite. ....	4
<b>Figure I.4:</b> minéral de Magnétite. ....	5
<b>Figure I.5:</b> minéral de Pyrite. ....	5
<b>Figure I.6:</b> minéral de Sidérite. ....	6
<b>Figure I.7:</b> minéral de Goethite.....	6
<b>Figure I.8:</b> Evolution de la production minière algérienne de fer et de fer métal de 2010 à 2015. .....	9
<b>Figure I.9:</b> BandedIron Formation : BIF.....	11
<b>Figure I.10:</b> gisement Fer oolithique.....	11
<b>Figure I.11:</b> Hématite remplaçant les fragments crinoïdes et les oïdes carbonatés au Jurassique sédimentaire. ....	13
<b>Figure I.12:</b> Sphaéra-sidérite constituée de sphérulites de sidérite fibreuse (lumière polarisée plane).....	14

### Chapitre II

<b>Figure II.1:</b> Situation géographique du gisement de fer de Gara Djebilet.....	16
<b>Figure II.2:</b> Carte géologique du gisement de fer de Gara Djebilet de sud-Ouest Algérien (d'après la carte géologique de l'Algérie au 1 :10000000, BRGM). ....	17
<b>Figure II.3:</b> Stratigraphie simplifiée des bassins cratoniques de Tindouf. L'échelle verticale est la même pour tous les logs. ....	22
<b>Figure II.4:</b> Structure du bassin de Tindouf. (A) Structures plissées dans la partie nord du bassin. (B) Coupe du bassin de Tindouf, avec une forte exagération verticale (x25).....	23
<b>Figure II.5:</b> Coupe Nord-Sud dans le bassin de Tindouf. ....	25
<b>Figure II.6:</b> Positionnement des roches magmatiques dans les sondages du bassin de Tindouf. .....	28
<b>Figure II.7:</b> Situation géographique de la zone. ....	30
<b>Figure II.8:</b> Vue générale du gisement de fer, Gara Djebilet.....	30
<b>Figure II.9:</b> Formation de minerai. ....	31

## Liste Des Figures

### Chapitre III

<b>Figure III.1:</b> Echantillon brut de minerai de fer de Gara Djebilet .....	35
<b>Figure III.2:</b> Protocole de préparation du minerai de fer de Gara-Djebilet .....	36
<b>Figure III.3:</b> Concasseur à mâchoire à double effet. Photo prise au laboratoire du département des Mines et Géologie .....	37
<b>Figure III.4:</b> Diviseur à riffle Jones .....	37
<b>Figure III.5:</b> Tamiseuse de marque RETSCH .....	38
<b>Figure III.6:</b> Broyeur type RETSCH .....	39
<b>Figure III.7:</b> Un faisceau de rayons X .....	40
<b>Figure III.8:</b> diffractomètre à rayons X .....	40
<b>Figure III.9:</b> Pastille prête.....	40
<b>Figure III.10:</b> Appareil de FX.....	41
<b>Figure III.11:</b> Pastille prêt pour L'analyse de FX.....	41
<b>Figure III.12:</b> Appareil d'IR .....	42

### Chapitre VI

<b>Figure VI.1:</b> Courbe granulométrique de l'échantillon du minerai de fer initial.....	45
<b>Figure VI.2:</b> Analyse par DRX de l'échantillon brut.....	46
<b>Figure VI.3 :</b> Analyse par DRX de la fraction 4mm.....	46
<b>Figure VI.4:</b> Analyse par DRX de la fraction 2mm.....	47
<b>Figure VI.5:</b> Analyse par DRX de la fraction 1mm.....	48
<b>Figure VI.6 :</b> Analyse par DRX de la fraction 0,5mm.....	48
<b>Figure VI.7:</b> Analyse par DRX de la fraction 0,250mm.....	49
<b>Figure VI.8:</b> Analyse par DRX de la fraction 0.125mm.....	49
<b>Figure VI.9:</b> Analyse par DRX de la fraction 0,063mm.....	50
<b>Figure VI.10:</b> Analyse par DRX de la fraction <0.063mm.....	50
<b>Figure VI.11:</b> Evolution de la teneur en fer en fonction des tranches granulométriques. ....	51
<b>Figure VI.12:</b> Evolution de la teneur en phosphore en fonction des tranches granulométriques. .....	52
<b>Figure VI.13:</b> Four de laboratoire <b>SELECT-HORN</b> température maximale 1500°C.....	53
<b>Figure VI.14:</b> Spectre IR du minerai de fer oolithique (brut, grillé à 800°C, grillé à 900°C).54	

## *Liste Des Figures*

<b>Figure VI.15:</b> Effet de la granulométrie sur la réduction du phosphore pendant une torréfaction à 800°C.....	55
<b>Figure VI.16:</b> Effet de la granulométrie sur la réduction du phosphore pendant la torréfaction à 900°C.....	55
<b>Figure VI.17:</b> Effet de l'additif CaCl <sub>2</sub> sur la teneur en phosphore pendant la torréfaction du minerai de fer à 800°C. ....	56

## *Liste Des Tableaux*

### **Chapitre I**

<b>Tableau I.1:</b> Les différents types du minerai de fer. ....	2
<b>Tableau I.2:</b> Différents types de gangue dans les minerais de fer. ....	7
<b>Tableau I.3:</b> Types de formation, Processus de formation géologique et type du minerai de fer obtenus avec les principaux minéraux ferrifères. ....	14

### **Chapitre II**

<b>Tableau II.1:</b> Résultats des analyses. ....	32
<b>Tableau II.2:</b> Composition chimique de minerai de fer de Gara Djebilet après essai de bouletage. ....	33

### **Chapitre VI**

<b>Tableau VI.1:</b> Résultats de l'analyse granulométrique du minerai de fer concassé .....	44
<b>Tableau VI.2:</b> Résultats de l'analyse granulo-chimique du minerai de fer de Gara Djebilet par FX. ....	51

## *Liste Des Abréviations*

**BIF** Banded Iron Formation

**BEPRIP** Bureau européen de la prévention et de la réduction intégrée de la pollution

**Cm** Centimètre

**DRX** Diffraction des rayons X

**FX** Fluorescence des rayons X

**FFR** formation de fer rubané

**FFG** formation de fer granulaire

**g** Gramme

**IR** Infrarouge

**mm** Millimètre

**m<sup>2</sup>** Mètre carré

**SOMIFER** Société des Mines de Fer d'Algérie

**PDF-ICDD** Powder Diffraction File - International Center for Diffraction Data

**RIR** Reference Intensity Ratio

**µm** Micromètre

**%** Pourcentage

**Y** Rendement

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

Le minerai de fer demeure une substance indispensable et stratégique dans l'industrie sidérurgique et cimentière. La demande croissante en fer dans le marché mondial lui confère une grande importance et un grand intérêt dans l'économie nationale de chaque pays, puisqu'il représente le plus fort volume de minerai produit dans le monde (Australie, Chine, Inde, Etats-Unis...).

L'Algérie est l'un des pays riches en termes de gisements de fer. Un intérêt particulier a été porté sur le gisement de Gara Djebilet situé dans la wilaya de Tindouf. Ce dernier est classé parmi les plus grands gisements dans le monde, il est riche en minerai de fer oolithique avec des réserves exploitables de l'ordre de 1,7 milliards de tonnes à 57% de fer [1]. Toutefois, il impose une grande difficulté dans son exploitation, du fait que son minerai de fer ne répond pas aux conditions sidérurgiques nécessaires à son utilisation dans l'industrie. Pour cette raison, un projet de la valorisation de ce gisement est pris en charge par des scientifiques et industriels afin de se focaliser sur sa caractérisation en recherchant des procédés innovants et propres, permettant l'augmentation de sa teneur en fer et la réduction de la teneur en phosphore à des niveaux permettant son exploitation.

Le problème majeur du gisement de Gara Djebilet est l'existence d'un taux élevé de phosphore, pour cela un enrichissement et une déphosphoration du minerai est indispensable avant toute exploitation. Dans cette optique, nous avons choisis notre thématique afin de contribuer à une solution en se basant sur la caractérisation du minerai (tout venant).

L'objectif de cette présente étude est d'effectuer une caractérisation physico-chimique (analyses granulo-minéralogique et minéralogiques) en premier lieu. Ces analyses sont d'une importance capitale pour mieux cerner les caractéristiques naturelles du minerai de fer, à faciliter les études en matière d'extraction et d'exploitation du gisement de Gara Djebilet, de façon à répondre aux exigences sidérurgiques en vigueur et pour être exploité et utilisé directement dans l'industrie. En deuxième lieu, une torréfaction est effectuée pour réduire la teneur en phosphore du minerai dans de différentes conditions expérimentales comme la concentration du chlorure de calcium, la granulométrie du minerai de fer, et la température de torréfaction.

Le mémoire s'articule en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre**, présentera la situation générale du minerai de fer : le type, l'utilisation, la demande, la production de minerai de fer oolithique, ainsi que le type et la formation des gisements de minerai de fer oolithique, et la situation actuelle et les perspectives du minerai de fer.
- **Le deuxième chapitre**, est consacré une présentation générale du gisement de Gara Djebilet, qui aborde sa situation et la géologie.

## *Introduction Générale*

- **Dans le troisième chapitre**, on s'intéresse aux conditionnements de l'échantillon prélevé et aux méthodes d'analyse.
- **Le quatrième chapitre**, englobe tous les résultats de l'analyse physico- chimique du minerai seul et les résultats de la torréfaction (déphosphoration) avec leurs discussions.

Nous terminons ce manuscrit par une synthèse globale des chapitres, donnée sous forme de conclusion générale.

# *Chapitre I*

## **Introduction**

Le fer est le quatrième élément chimique le plus abondant dans la croûte terrestre. La majeure partie du minerai de fer de teneur importante extraite est destinée à l'exportation et la quasi-totalité de la production mondiale (98 %) est destinée à l'industrie sidérurgique. A l'état natif, le fer provient du minerai (roche contenant du fer) après extraction. Le minéral se présente généralement sous forme d'oxydes (hématite, magnétite, goethite et limonite), de carbonate (sidérite) ou de sulfure (pyrite). [1]

Le présent chapitre porte sur le fer et ses minerais, les gisements de fer en Algérie et dans le monde, la classification des minerais ainsi que l'origine des minerais de fer.

**I.1 Quelques notions utilisées :** Dans le domaine minier, plusieurs notions sont utilisées telles que :

- **Gisement de fer :** est un corps minéral d'une taille suffisante, contenant une teneur en fer et une composition chimique avec des caractéristiques physico-économiques qui lui permet d'être une source minérale immédiate ou potentielle. [2]
- **Le minerai riche :** ce qui donne des minerais marchands sans aucune transformation (run of mine), ou après concassage-criblage, parfois après un traitement simple n'affectant qu'une faible partie du tout-venant (débouillage, élimination ou enrichissement des parties les plus fines souvent plus chargées en impuretés). Les minerais riches titrent en général entre 55 et 67 % de fer.
- **le minerai pauvre :** est un tout-venant qui doit subir un traitement parfois complexe permettant d'éliminer la plus grande partie de la gangue. Par enrichissement, on obtient généralement des concentrés pour agglomération. Les teneurs en fer des minerais actuellement exploités s'échelonnent entre 25 et 50 %. [3]

## **I.2 Types de minerais de fer**

Les minéraux de fer peuvent être classés selon plusieurs paramètres : la composition minéralogique, la composition chimique, la granulométrie ...etc. La composition chimique est la plus souvent utilisée pour classer les différents types de minéraux (tableau I.1).

Tableau I.1: Les différents types du minerai de fer. [4]

Minerais	Formule chimique	Teneur théorique possible (%)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Dureté
Hématite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	5,1	5 – 6
Magnétite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72	5,2	5,5 – 6
Martite	α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70	5,3	5,5 – 6,5
Goethite	FeO(OH)	63	3,3 – 4,3	5 – 5,5
Sidérite	FeCO	48	4	4
Chamosite	(Mg,Fe,Al) <sub>6</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>14</sub> (OH) <sub>8</sub>	45	3,1	3
Pyrite	FeS <sub>2</sub>	47	4,9	6 – 6,5
Limonite	FeO(OH).n(H <sub>2</sub> O)	63	3-4	5 – 5,5
Lépidocrocite	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	60	4,1	5
Greenalite	Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	45	2,9	3
Ilménite	FeTiO <sub>3</sub>	37	4,7-4,79	5 – 6

### I.3 Classification du minerais de fer

La classification du minerai de fer selon sa teneur et son type :

#### I.3.1 La teneur en fer

Selon la teneur en fer, les gisements du minerai de fer algériens sont divisés en trois catégories :

- **Minerais pauvres** : Fe ≤ 30 %
- **Minerais moyens** : 30 % < Fe < 50 %
  - Tébessa : Boukhadra (48%) ; Aïn Babouche (40%),
  - Miliana : Zaccar (48%),
  - Tizi Ouzou : Béni Douala (48%),
  - AïnDefla : Rouina (43%).
- **Minerais riches** : Fe > 50 %
  - Tindouf : Gara Djebilet (56%) ; Mechri Abdelaziz (52%),

- Tébessa : Ouenza (59,50%) ; Khanguet El Mouhad (52%),
- Béjaïa : Timezrit (52%),
- AïnTémouchent : Béni Saf (53%),
- Annaba : AïnMokra (52%) ; Boumaïza (53%),
- Sétif : Anini (55%),
- Souk Ahras : Chaâbat El Ballout (53%)
- Jijel : Sidi Maarouf (50%).

### I.3.2 Le type de minerai

- A. Les Sulfures** : Pyrite et Pyrrhotite ( $\text{FeS}_2$ ,  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) ; Aïn Sedma (Collo), Littoral entre Cherchell et Ténès.
- B. Les Carbonates** : Sidérite ou sidéroses ( $\text{FeCO}_3$ ) ; Sud-Oranais, Sebabna, Ras el Maden, Zaccar, les Babors, Sidi Maarouf, Tissimiran, Ouenza, Boukhadra, Khanguet el Mouhad.
- C. Les Oxydes / Hydroxyd de Fer** : Hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Hydro-hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$ ), Goethite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), Limonite ( $\text{FeO} (2\text{H}_2\text{O})$ ). Goethite Gara Djebilet et MechriAbdelAziz (Tindouf), Aïn Babouche (Tébessa), Béni Saf (AïnTémouchent). La figure I.1 représente les trois minerais. [1]



**A : Pyrrhotite**



**B : Sidérite**



**C : Goethite**

**Figure I.1:** (A, B, C) Types de minerai de fer. [1]

On abordera, ci-après, quelques minéraux et minerais de fer les plus répandus :

- **Hématite**

L'hématite est une espèce minérale composée d'oxyde de fer (III) de formule  $Fe_2O_3$ , elle est connue aussi sous le nom de « fer naturel », un nom qui a été utilisé dans le domaine d'exploitation minière quand certains minerais de fer (hématite (figure I.2)) ont une teneur en fer de 66% et peuvent alimenter directement le haut fourneau. [5] La plupart des gisements d'hématite sont d'origine sédimentaire telle que les gisements de fer rubané (BIF). Leurs formations ne sont pas comprises entièrement, bien qu'il soit connu qu'ils sont formés par la précipitation chimique du fer des mers peu profondes il y a environ 1.8 – 2.6 millions d'années, pendant la période précambrienne. [6]



**Figure I.2:** minéral d'hématite. [7]

- **Limonite**

La limonite (figure I.3) est à la fois un oxyde et un hydroxyde de fer. Elle a une couleur 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 minéral n'est plus utilisé aujourd'hui dans les industries sidérurgiques, car il contient du phosphore. [7]



**Figure I 3:** minéral de limonite. [7]

- **Magnétite**

La magnétite (figure I.4) est un oxyde de fer de formule chimique  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Ce type de minéral possède des propriétés magnétiques exceptionnelles et est abondant sur le pôle nord du globe terrestre. La magnétite est un très bon minerai de fer. [7]



**Figure I.4:** minéral de Magnétite. [7]

- **Pyrite**

La pyrite (figure I.5) est un sulfure de fer ( $\text{FeS}_2$ ) communément appelé "*or des fous*" à cause de sa grande ressemblance avec l'or. On utilise la pyrite surtout pour en extraire la grande quantité de soufre qu'elle contient (53,5% de soufre et 46,5% de fer) et pour la production d'acide sulfurique. La pyrite demande d'être conservée dans un endroit sec, en présence d'humidité elle se désagrège en acide sulfurique et en oxyde de fer. Cette pierre produit un gaz toxique, il s'agit de l'anhydride sulfurique si elle est chauffée. [7]



**Figure I.5:** minéral de Pyrite. [7]

- **Sidérite**

La sidérite (figure I.6) 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 est concentré et contient peu d'impureté, il peut être exploité commercialement. La sidérite devient magnétique lorsqu'elle est chauffée et s'altère en limonite ou en goethite. [7]



**Figure I.6:** minéral de Sidérite. [7]

- **Goethite**

La goethite (figure I.7) est un hydroxyde de fer ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) 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. C'est pourquoi lorsque la quantité est suffisante ce minerai peut être exploité commercialement. [7]



**Figure I.7:** minéral de Goethite. [7]

**I.4 Les gangues associées aux minerais de fer**

Chaque minerai contient des impuretés, appelées « gangue ». La présence de certains éléments aura un impact positif ou négatif sur les propriétés du minerai ou les performances métallurgiques du haut fourneau. [8]

Idéalement, le minerai de fer ne contient que du Fe et de l'oxygène, mais il contient généralement des éléments qui ne sont pas requis par différentes industries. [8]

Il existe plusieurs éléments principaux, dont l'argile (kaolinite, alumine, gibbsite... etc.), les oxydes (dioxyde de silice, oxyde de calcium, oxyde de magnésium... etc.). La plupart des minéraux de fer contiennent du SiO<sub>2</sub> et de l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Le tableau I.2 présente les différents minéraux de gangue associés au minerai de fer.

**Tableau I.2:** Différents types de gangue dans les minerais de fer. [9]

<b>Minéral</b>	<b>Formule Chimique</b>
<b>Quartz</b>	SiO <sub>2</sub>
<b>Calcite</b>	CaCO <sub>3</sub>
<b>Kaolinite</b>	Al <sub>4</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>
<b>Gibbsite</b>	Al(OH) <sub>3</sub>
<b>Minnesotaite</b>	(Fe <sup>2+</sup> ,Mg) <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
<b>Stilpnomelane</b>	K(Fe <sup>2+</sup> ,Mg,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>8</sub> (Si,Al) <sub>12</sub> (O,OH) <sub>27-n</sub> (H <sub>2</sub> O)
<b>Chlorite</b>	(Fe,Al,Mg) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
	MnO <sub>2</sub>
<b>Ankerite</b>	Ca(Fe, Mg, Mn)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>

**I.5 Les potentialités minières en Algérie**

L'Algérie est connue pour son potentiel minier diversifié. L'Algérie a une longue histoire de recherche et d'extraction du fer. L'essentiel du potentiel géologique se situe dans le sud-ouest du pays, avec 3,5 milliards de tonnes à 57% de gisements de fer, à savoir les gisements de Mécheri Abdelaziz et Gara Djebilet situés à 250 kilomètres à l'est de Tindouf. Le potentiel dans le nord du pays est estimé à environ 70 millions de tonnes, répartir entre les gisements d'Ouenza et de Boukhadra (60 millions de tonnes) dans la wilaya de Tébessa et l'indice Djebel Anini (12 millions de tonnes) dans la wilaya de Sétif (60 % de fer).

### **I.5.1 Minerai de fer**

Le minerai de fer est composé de roches et de minéraux, dont le fer peut être avantageusement extrait. Les minéraux gris foncés et jaune vif qui sont extraits sont généralement riches en oxydes de fer et en carbonates. Le fer lui-même existe généralement sous forme de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de goethite, de limonite ou de sidérite. Le minerai de fer est la matière première pour la fusion primaire, et le minerai de fer lui-même est la principale matière première pour la fabrication de l'acier. Lorsque son contenu est supérieur à 54%, il est considéré comme riche et ne nécessite aucune valorisation à part son calibrage. Lorsqu'il est inférieur à 54 %, il est considéré comme pauvre et doit être valorisé pour en permettre la commercialisation. Il existe deux qualités de minerai de fer à haute teneur : la première est un minerai ou « minerai en morceaux » de plus de 8 mm, et la seconde est un « minerai fin » de moins de 8 mm. [10]

### **I.5.2 Production du minerai de fer en Algérie**

La production algérienne de minerai de fer est passée de 944 000 tonnes en 2015 à 610 000 tonnes en 2016. Cette baisse est due aux changements de direction et de propriété des mines de Boukhadra et d'Ouenza qui ont entraîné des interruptions de production. Par rapport à 2015, la production d'acier brut était de 650 000 tonnes, et l'exploitation de différentes mines en Algérie a également suscité une réflexion sur l'exploitation de Gara Djabilet.

Outre les hydrocarbures, le fer est l'une des principales richesses minérales de l'Algérie, et l'extraction des gisements de minerai de fer a toujours dominé l'industrie extractive du pays. Les ressources nationales en minerai de fer sont réparties dans 6 gisements, dont Ouenza et Boukhadra, dans l'est du pays, sont extraites par le Groupe *Arcelor-Mittal* Tébessa, avec une réserve géologique de 87 millions de tonnes et une teneur en fer de 48 %.

La production d'hématite est de 2 millions de tonnes/an, localisée dans le calcaire du récif d'Aptien. Actuellement, le gisement Chaabetel Ballout (SoukAhras) dans la même zone possède des réserves géologiques de 10 millions de tonnes et contient 53% de fer. Une minéralisation en fer se trouve au contact des strates calcaires et gréseuses du Crétacé, et son développement est relancé au stade de la recherche.

La filiale SOMIFE-spa du Groupe Ferphos, à travers ses propres mines de Khanguet (Tébessa), Sidi Maarouf (Jijel) et Djebel Anini (Sétif), dispose de réserves géologiques de 6,75 millions de tonnes, contenant 55 % de fer.

La minéralisation en hématite existe dans le calcaire de lias sous forme de veines et de trous. Le gisement de Rouina (Aïn Defla) assure la production de minerai de fer représenté par l'hématite, qui sert principalement à la production de ciment. [10]

### I.5.3 Evolution de la production minière algérienne du minerai de fer et du fer métal de 2010 à 2015

L'évolution de la production minière Algérienne du minerai de fer et du fer métal de l'année 2010 à 2015 est représentée dans la figure I.8. [11]

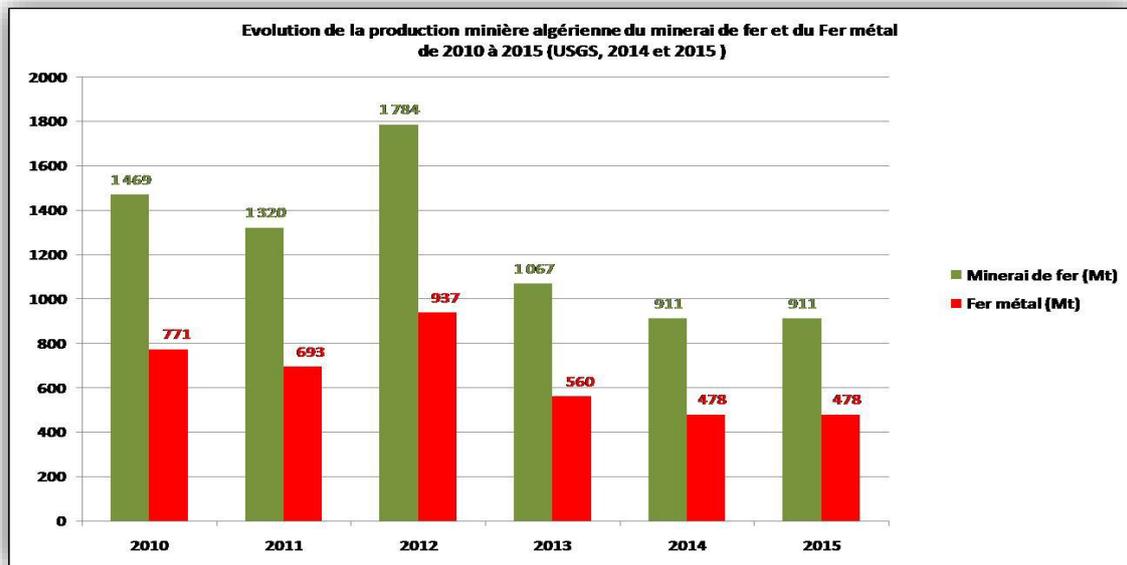


Figure I.8: Evolution de la production minière algérienne de fer et de fer métal de 2010 à 2015. [11]

### I.5.4 Les principaux gisements de fer

Les principaux gisements de fer en Algérie sont par ordre décroissant des réserves en minerai de fer :

- **Gara Djebilet** 1540 Mln de tonnes, de 56% de Fer ;
- **Mecheri Abdelaziz** 702 Mln tonnes, 52% de Fer ;
- **Ouenza** 80,3 Mln tonnes, 59,5% de Fer ;
- **Boukhadra** 41,7 Mln tonnes, 48% de Fer ;
- **Beni Saf** 15,3 Mln tonnes, 53% de Fer ;
- **AïnMokra** 5,7 Mln tonnes, 52% de Fer ;
- **Aïn Babouche** 4,2 Mln tonnes, 40% de Fer ;
- **Anini** 3,7 Mln tonnes, 55%, de Fer ;
- **Rouina** 2,8 Mln tonnes, 40 %, de Fer ;
- **Chaâbat El Ballout** 2,5 Mln tonnes, 53% de Fer. [10]

### I.5.5 Les différents types de gisement de fer en Algérie

Les gisements de fer sont divisés en trois (04) catégories : des gisements de ségrégation, de substitution dans les calcaires, de filons proprement dits et des gisements d'allure filonienne et accessoirement un peu de minerai de fer sédimentaire :

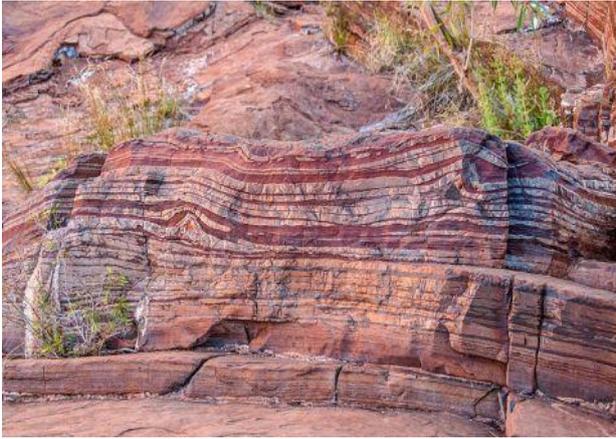
1. **Gisements de Ségrégation** : Il s'agit de petits amas de pyrites de Fer dans les parties hautes, on y observe un mélange de magnétite et d'hématite. Ils sont localisés dans un complexe de granite et de microgranite. (Exemple : mine d'Aïn Sedma).
2. **Gîtes de substitution dans les calcaires** : ils sont beaucoup les plus importants. Pratiquement, ils présentent tous les mêmes caractères morphologiques : que ce soit les minéralisations dans les calcaires carbonifères (Sud-Oranais), celles du Lias (Sebabna, Rar el Maden, Zaccar, Kabylie de Babore, Sidi Maarouf, Tissimiran, etc...), ou celles du Crétacé (Ouenza, Boukhadra, Khanguet el Mouahad).
3. **Filons proprement dits et gisements d'allure filonienne** : Il s'agit de véritables filons de minerai de Fer existant au voisinage du littoral entre Cherchell et Ténès, ainsi que dans l'Atlas Blidéen. Dans toutes les fractures, les minerais originels paraissent avoir été de la sidérose et de la pyrite de Fer, accompagnées, en plus faible quantité de cuivre gris et de chalcopyrite.
4. **Les gisements sédimentaires** : Les plus importants gisements connus de cette catégorie sont ceux de **Gara Djebilet**, de **Mechri AbdelAziz** à Tindouf et d'Aïn Babouche au sud de Tébessa, avec quelques petits gîtes de remaniement au voisinage d'amas de métensomatose (par exemple dans la région de Béni Saf), dont les affleurements sont constitués par plusieurs bancs d'un minerai d'aspect oolithique (petites grains arrondis de limonite et de quartz cimentés par de la Limonite) intercalé dans les marnes de l'Eocène. [10]

### I.6 Gisement de fer sédimentaire

Le fer est présent dans tous les types de roches sédimentaires à une concentration d'un faible pourcentage, mais dans certains cas, il forme des pierres de fer et des formations de fer avec une teneur en fer d'environ 15 %.

On a deux gisements de fer sédimentaire (figure I.9 et I.10) :

- A. **Les gisements de fer rubané (BIF : Banded Iron Formation)** qui sont des roches sédimentaires très riches en fer et sont représentées par des couches de dimensions millimétriques à centimétriques (In Ouzzal, Gour Emellalen, ... dans le Hoggar) ;
- B. **Les gisements de fer oolithiques** sont formés dans des environnements marins peu profonds et proches du littoral (Gara Djebilet, Mechri Abdel Aziz,...). [1]



**Figure I.9:** Banded Iron Formation : BIF.



**Figure I.10:** gisement Fer oolithique.

## I.7 Principaux types de dépôts de fer présents dans les sédiments

### I.7.1 Origine et type des formations de fer

#### A. Fer rubané

La formation de fer rubané (FFR, également connue sous le nom de roche ferrugineuse rubanée) est un type de roche sédimentaire riche en fer. Une FFR typique consiste en des couches alternées de quartzite pauvre en fer, de schiste, ou de chailles, et de minéraux carbonatés, silicatés, ou soufrés, pratiquement mono minéralisées d'oxyde de fer (magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ou hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )).

Les FFR peuvent présenter une texture clastique (texture granulaire, désignée comme formation de fer granulaire, FFG), une texture sédimentaire d'origine chimique, ou un rubanement à une échelle micro (mm) et macro. [12]

#### B. 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 (oolite blanche du Jurassique du Bassin parisien). 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 (cortex).

### I.7.2 Caractéristiques du fer oolithique

Il s'agit d'un petit grain sphérique calcaire ou ferrugineux, composé d'un corps central entouré de fines couches concentriques superposées et ressemblant à un œuf de poisson. Souvent l'infiltration amène, autour de ces grains de sable, le dépôt d'enveloppes concentriques de carbonate de chaux, donnant naissance à des oolithes. [13] Le minerai, qui se trouve dans la

partie supérieure du Lias et à la base de l'oolithe inférieure, se compose essentiellement de petits grains ferrugineux ou oolithes.

Agrégés par un ciment ocreux plus ou moins abondant. Les oolithes qui constituent la partie la plus riche de la masse sont à peu près sphéroïdaux et elles ont ordinairement la grosseur d'une tête d'épingle à peine perceptible à l'œil nu. Chaque oolithe est généralement formé de couches concentriques de peroxyde de fer hydraté. [14]

La plupart des oolites anciennes et actuelles sont calcaires (cortex formé d'aragonite ou de calcite) et c'est pourquoi le terme d'oolithe fut parfois pris, à tort, comme synonyme de couche de calcaire oolithique. Il existe des oolithes ferrugineuses, siliceuses, phosphatées, chloriteuses, dont le mode de formation et la répartition paléogéographique sont bien différents.

La structure à la fois concentrique et radiée des oolites calcaires anciennes ne se retrouve généralement pas dans les oolithes marins actuels. Sur les oolithes actuels, l'étude au microscope électronique de la disposition des cristaux d'aragonite dévoile des aiguilles disposées tangentiellement à la surface. Cela montre que la structure radiaire doit être le résultat d'une recristallisation. Cependant, dans le milieu de formation d'oolithes du golfe, on a pu montrer que les cristaux poussent avec une orientation radiaire lorsque l'oolithe séjourne dans les dépressions peu agitées et qu'ils se tassent en un feutrage tangentiel lorsqu'elle est entraînée par les courants dans les parties plus agitées du rivage. [15]

La croissance de l'oolithe dépend donc de l'alternance de séjours en milieu abrité et en milieu agité. [15]

### **I.7.3 Formation d'oolithe**

Un oolithe est une Petite concrétion sphérique de la taille d'un œuf de poisson (0,5 à 2 mm), formée de couches concentriques précipitant autour d'un nucléus. (Généralement calcaires, les oolithes peuvent également être ferrugineux, comme dans le minerai de fer de Lorraine.)

Il peut s'agir du :

- Bio-claste (débris d'origine biologique)
- Litho-claste (petit fragment de débris de roches)
- Grain de carbonate micritique (se solubilisant dans le contexte du milieu au moment de la formation initiale de l'oolithe). Autour du noyau se développent des «lamines» (cortex), en fines couches concentriquement superposées souvent calcaires et parfois ferrugineuses. [16]

Les oolites se forment dans des environnements marins peu profonds mais turbulents. Ils restent en permanence suspendus, et lorsqu'ils deviennent trop lourds, les couches formant le cortex se mettent en place, et ils se déposent sur les fonds marins et les sédiments.

En revanche, les oolites se forment dans des environnements marins peu profonds mais turbulents. Ils restent en permanence suspendus, et lorsqu'ils deviennent trop lourds, les couches formant le cortex se mettent en place, et ils se déposent sur les fonds marins et les sédiments.

Il y a une couche de film microbien bactérien à la surface des oolites actuelles, qui aide à précipiter le carbonate. Ce sera une précipitation induite (par opposition à une précipitation contrôlée. [17])

#### I.7.4 La minéralogie des minerais de fer

L'hématite existe dans les strates de fer précambriennes et dans le minerai de fer du Phanérozoïque (figure I.11).

Au Précambrien, l'hématite est apparue sous forme de couches minces, mais aussi sous des formes massives, ploïdes et oolithiques. L'hématite en couche mince est généralement cryptocristalline, mais si elle apparaît sous forme de ciment dans le grès, il peut s'agir d'épais cristaux rouge foncé.



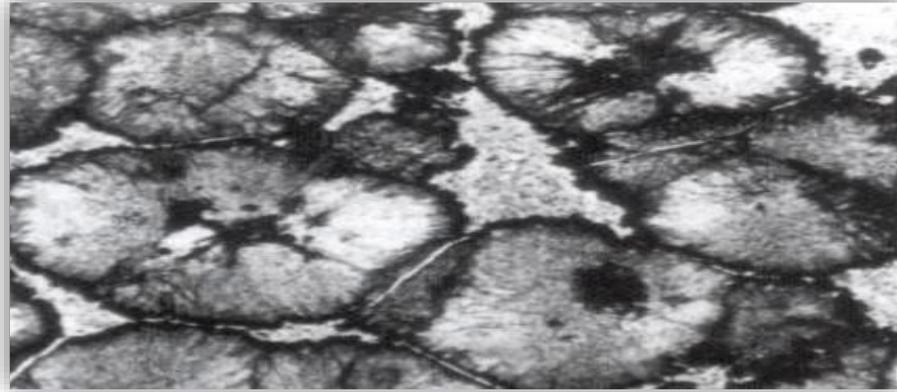
**Figure I.11:** Hématite remplaçant les fragments crinoïdes et les oolites carbonatées au Jurassique sédimentaire. [18]

Les flocons de goethite sont jaunes à bruns et généralement isotropes. Ils n'existent pas dans le minerai de fer oolithique précambrien, mais il est abondant dans le minerai de fer phanérozoïque.

La limonite est une forme ambiguë d'hydratation d'oxyde de fer, contenant de la goethite, d'autres matériaux (argile) et de l'eau adsorbée. Le terme est de préférence limité aux produits amorphes brun jaunâtre de l'altération souterraine du fer et d'autres oxydes minéraux. La magnétite est abondante dans les strates ferrifères précambriennes, où elle croise le silex, et est rare dans les strates phanérozoïques. Il apparaît sous forme d'agrégats de remplacement dans de petits cristaux ou des formations ferrifères oolithiques.

La sidérite est le composant principal des sédiments riches en fer du Précambrien et du Phanérozoïque. Il apparaît comme un ciment de nombreux oolites berthierine-chamosite du Phanérozoïque et peut remplacer les oolites et les grains squelettiques.

La pyrite est un minéral secondaire dans les sédiments riches en matière organique, tels que les estuaires et les plateaux de marée. Il se présente sous forme de particules dispersées et de cristaux (cubes), et peut également remplacer le squelette et les fragments d'olivine (figure I.12). [18]



**Figure I.12:** Sphaéra-sidérite constituée de sphérolites de sidérite fibreuse (lumière polarisée plane). [18]

**I.8 Origines des minerais de fer**

**I.8.1 Processus de formation**

Le tableau I.3 représente des informations concernant les types de minerais de fer. [18]

**Tableau I.3:** Types de formation, Processus de formation géologique et type du minerai de fer obtenus avec les principaux minéraux ferrifères. [18]

Processus	Type du gisement	Minéraux principaux
<b>Sédimentation</b>	gisement de Fer rubanée (BIF)	Magnétite, Hématite, Sidérite, Fer silicatée
	Roches Ferreuses	Chamosite, Limonite Hématite, Sidérite
<b>Activité ignée (volcanique)</b>	Séparation magmatique	Titanifère, Ilménite, Magnétite, Fer silicatés
	Pyro-métasomatique	Magnétite
<b>L'érosion à la surface ou proche</b>	Enrichissement secondaire des gisements de fer en teneur faible	Magnétite, limonite, sidérite

Lors de la formation naturelle du minerai de fer, des couches d'oxyde de fer apparaissent. Ces couches d'oxyde de fer s'alignent avec des couches riches en silice partiellement décomposée, ce qui donne des minerais de fer à faible teneur (pauvre). [19]

La formation de gisements de minerai de fer peut se faire par dépôt direct, activité de roche ignée (volcanique) ou altération superficielle ou souterraine (métamorphisme).

### **I.8.2 Processus physiques et chimiques**

Ce sont les processus les plus courants. Le processus commun de concentration de métaux ou de minéraux est la dissolution chimique des composants de la roche, leur transport en solution et leur précipitation comme des minéraux à certains sites d'élimination, généralement contrôlés par contraste. Changements chimiques ou chimiques environnementaux. Au cours du processus de cristallisation, les roches plus denses qui transportent les minéraux se sépareront sous l'action de la gravité pour former des gisements riches en fer. Pendant la période où l'eau tombe de la surface ou monte du fond à travers une formation rocheuse. [20]

### **I.8.3 Processus mécanique**

L'érosion, le transport et le dépôt sont généralement les principales raisons de ce processus de formation. Les roches qui transportent des minéraux de fer ont une densité élevée, ce qui leur permet de se déposer plus tôt que d'autres minéraux plus légers. Ce processus est responsable de la formation de certains gisements d'hématite. [20]

## **I.9 Domaines d'utilisation du minerai de fer**

L'utilisation du minerai de fer est diversifiée. Près de 98 % du minerai exporté est utilisé comme matière première pour la sidérurgie, et le reste est affecté à d'autres domaines, tels que les additifs pour la fabrication du ciment, les pigments pour la peinture et la construction, et ferrite et pigments magnétiques, catalyseurs de synthèse industriels, adsorbants de purification d'eau et de gaz et traitement de fluides faiblement radioactifs, fabrication de bijoux (notamment hématite), industrie chimique, production photochimique, alourdissant dans les boues de forage, alimentation animale, production d'engrais, enrichissement des minerais (lavage de charbon) et polissage des lentilles optiques. [21]

## **Conclusion**

L'Algérie est connue pour son potentiel minier diversifié (plus de 30 substances), essentiellement les gisements de fer. Parmi les grands gisements de fer, sont ceux de Mécheri Abdelaziz et Gara Djebilet situés à 250 kilomètres à l'est de Tindouf. Les minerais de fer sont généralement riches en oxydes de fer et en carbonates. Le fer lui-même existe sous forme de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de goethite, de limonite ou de sidérite. Lors de la formation naturelle du minerai de fer, se produit des couches d'oxydes de fer qui sont disposées avec des couches riches en silice partiellement décomposée, ce qui présente un minerai de fer de faible teneur (pauvre). La formation d'un gisement du minerai de fer peut-être :

- Sédimentation directe
- Activité igné (volcanique)
- La désagrégation à la surface ou proche (métamorphique)

# *Chapitre II*

## Introduction

Le gisement de fer de Gara Djebilet est l'un des plus grands dépôts naturels de feroolithique dans le monde, découvert en 1952 par le géologue Francis M Gevin [22]. Le bassin de Tindouf couvre une superficie de 130.000 km<sup>2</sup>. Il se situe dans la partie Sud-Ouest du Sahara Algérien.

Ce chapitre est une présentation générale du gisement de fer de Gara Djebilet, à savoir sa position géographique, et ses caractéristiques géologiques.

### II.1 Situation Géographique

Le bassin de Tindouf se situe dans le sud-ouest de l'Algérie, dans la partie la plus éloignée, à l'Ouest du Sahara algérien. Il s'agit d'une grande dépression, orientée E-O, s'étalant sur quatre pays, à savoir : l'Algérie où la majeure partie du bassin est située, le Maroc, le Sahara occidental, et la Mauritanie (figure II.1). Il est limité au Nord par l'anti Atlas marocain, au Sud par la dorsale Régui bat, à l'Est par la chaîne de l'Ougarta, et à l'Ouest par les monts d'Es Semara, au Maroc. Notre zone d'étude se limite aux frontières algériennes. [23]

Le village de Gara Djebilet est situé à 130 km au Sud-Est de la ville de Tindouf, entre la latitude 7° et 8° Ouest, et la longitude 27° et 28° Nord, près de la frontière algéro mauritanienne, à 300 km, à vol d'oiseau, de l'océan atlantique.

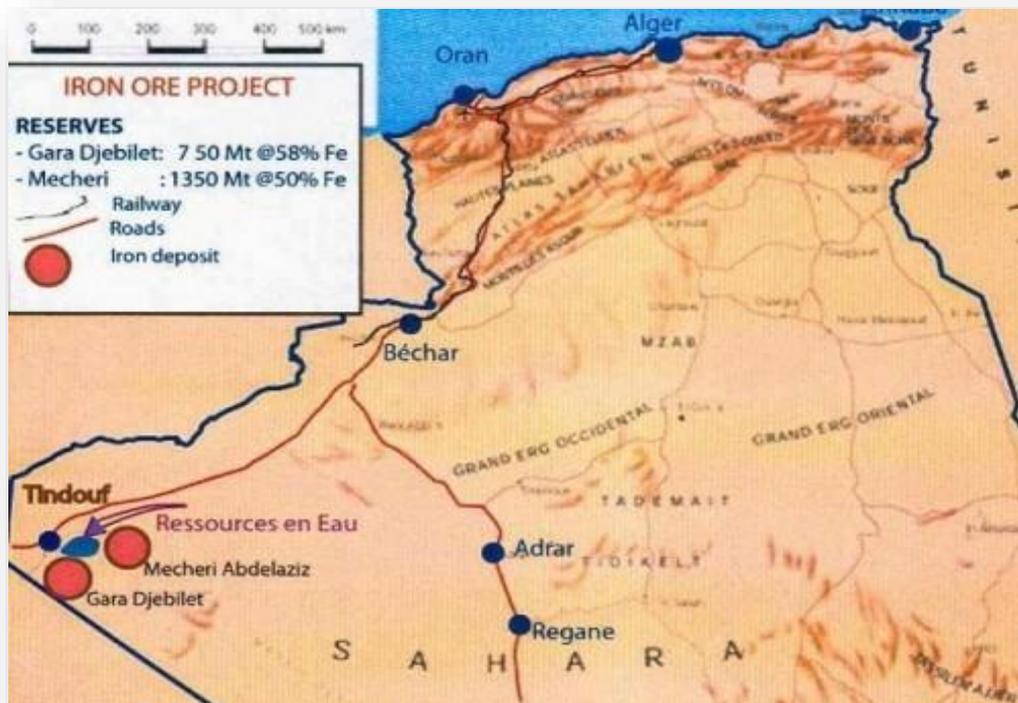


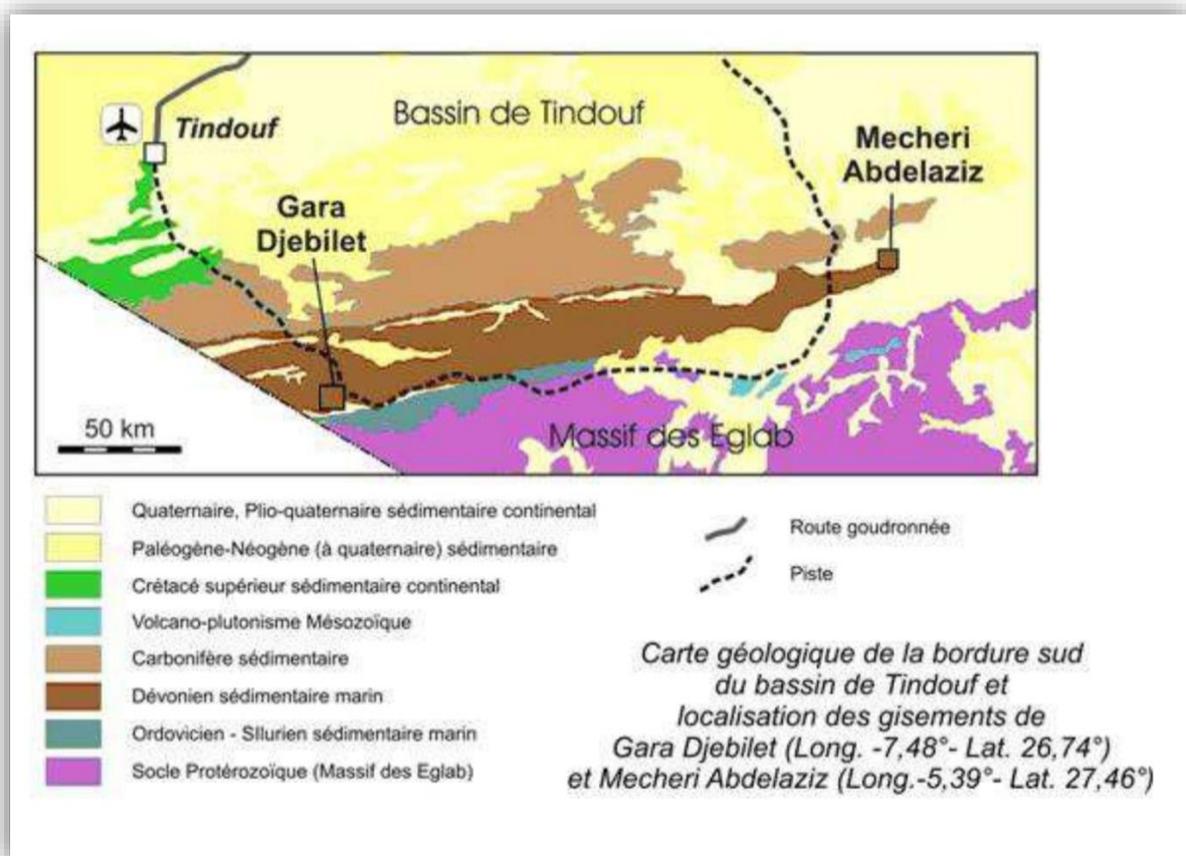
Figure II.1: Situation géographique du gisement de fer de Gara Djebilet. [24]

## II.2 Contexte Géologique

La géologie du bassin de Tindouf varie du Nord au Sud, avec un flanc nord montrant une série paléozoïque déformée, et abondamment injectée de dolérites, et un flanc sud moins déformé, où la série paléozoïque repose, en discordance, sur le socle précambrien de la dorsale Reguibat (Figure II.2). [23]

Les roches constituant le territoire de la wilaya de Tindouf appartiennent à deux unités structurales, d'âges différents : Le massif Yetti-Eglab et le bassin de Tindouf. [23]

Le bassin de Tindouf correspond à une vaste dépression dissymétrique allongée OSOENE (800 km de long sur 200 à 400 km de large), avec un flanc sud peu incliné et un flanc nord très redressé. Ce bassin est limité au nord par l'Anti-Atlas, au sud par la dorsale Reguibat, à l'est par les chaînes d'Ougarta et la dépression de Reggane et à l'ouest par le bassin d'El Aioun et les Mauritanides. La couverture sédimentaire du bassin montre un épaissement régulier, de 1500 m environ au sud pour atteindre 8000 m au nord. La partie centrale du bassin est masquée par les formations continentales « hamadiennes » crétacées et tertiaires. [25]



**Figure II.2:** Carte géologique du gisement de fer de Gara Djebilet de sud-Ouest Algérien (d'après la carte géologique de l'Algérie au 1 :10000000, BRGM). [26]

## II.2.1 Géologie Régionale

### a.1 Le Massif Yetti- Eglab

Ce massif est situé au Sud de la wilaya. Il constitue la partie Est du Craton Ouest-Africain. C'est un massif cristallin, magmato-métamorphique, partiellement recouvert de dépôts postorogéniques, terrigènes, de type molassique, fortement métamorphisés par la suite. La limite orientale n'est pas connue, celle-ci étant recouverte par les dépôts de plate-forme appartenant au Précambrien supérieur, et au Paléozoïque. [27] Vers le Nord, le massif est recouvert par les formations sédimentaires du bassin de Tindouf, ces derniers étant d'âge paléozoïque. Au Sud, les roches du socle cristallin, et des formations molassiques sont couvertes par les dépôts de la plate-forme de l'Infracambrien, (Série du Hank), appartenant au flanc Nord du bassin de Taoudenni. Au sein du Précambrien Yetti-Eglab, il a été distingué :

#### a.1.1 La Série Inférieure

À la série inférieure appartiennent le faciès de schistes cristallins, généralement à amphibolite, les gneiss à biotite, parfois à muscovite, à structure orientée et grano-blastique, et les roches effusives acides. Parmi les formations du précambrien, on y classe aussi les granites calco-alcalins à biotite, contenant parfois des amphibolites, connus sous le nom de « granites de Chegga ». [27]

#### a.1.2 Le Précambrien Supérieur : Il est subdivisé en deux séries :

1. **La Série Du Yetti** : Elle est caractérisée par des schistes-quartzitiques. Elle est fortement métamorphisée et plissée, avec un complexe de roches éruptives, principalement de laves, tufs et brèches, tous acides. A l'intérieur de cette série, plus précisément dans la partie Est du massif, on trouve les granites du Yetti-Calco-alcalins, à plagioclase et microcline, tandis que la biotite apparaît seulement en association à la muscovite.
2. **La Série De Guelb-El-Hadid** : Elle est de nature molassique, quartzito-arkosique faiblement métamorphisée et légèrement plissée. [27]

#### a.1.3 Le Précambrien Supérieur

Il s'achève par des granites ultimes, calco-alcalins, très fréquents aux Eglab, contenant un faciès migmatitique, et par de petits massifs de granites post-orogéniques subalcalins, presque entièrement dépourvus de minéraux opaques (biotite jusqu'à 5 %). Ce sont les « granites d'Aftout ».

A l'intérieur du précambrien du massif Yetti-Eglab, on trouve également de vastes intrusions basiques, généralement des diorites et des gabbro-diorites, ainsi que les intrusions acides de type rhyolitique, les deux constituent la plupart des élévations sur le périmètre en question.

Aux alentours de la limite Sud des secteurs d'étude, on trouve les dépôts de plate-forme de l'Infracambrien «la série du Hank », appartenant, sur le plan structural, au bassin de Tindouf ; où on peut distinguer trois (3) niveaux :

- Complexe détritique inférieur, presque totalement gréseux et quartzitique.
- Complexe calcaro-dolomitique, à prédominance de calcaires à stromatolithes et les dolomies.
- Complexe détritique supérieur, grès-argileux, à intercalations de roches carbonatées.

## **a.2 Le Bassin De Tindouf**

Il est situé au nord du massif susmentionné, ayant la forme d'une synclise asymétrique de direction générale WSW-ENE, limité au Sud par le dit massif, et au nord par l'Anti-Atlas marocain. A l'Est, ce bassin est limité par la dépression de Erg-Chech, et les chaînes de l'Ougarta et enfin à l'ouest par l'Atlantique. La partie orientale du bassin en question se trouve sur le territoire de l'Algérie, et la partie occidentale sur le territoire du Maroc. Les pendages des roches sont différents. Les roches constituant le flanc Sud de la synclise sont inclinées vers le Nord, sous un angle de 1 à 2°, celles du flanc Nord ont le pendage de 6 à 10° vers le Sud. La série sédimentaire entière, du Paléozoïque jusqu'au Carbonifère Supérieur, y est pratiquement représentée. [23]

Les parties centrales, et septentrionales, du bassin étant couvertes par les dépôts constituant la Hamada, la coupe complète n'est observée que sur le flanc Sud de la synclise. Le flanc Nord affleure seulement en partie, aux endroits découverts par l'érosion.

### **a.2.1 Le Cambro-Ordovicien**

Il est principalement représenté par les grès. Il débute par les quartzites et les grès à grains grossier, dits « quartzites de Djebilet ». Au-dessous de cette série, parfois même directement sur les roches cristallines du socle, reposent les grès Ordoviens à grains grossiers et à stratifications entrecroisées, appelées « grès d'Aouinet-Legraa ». [28]

#### **A. Le Silurien**

Il est représenté par le faciès argilo-schisteux, à prédominance d'argilites multicolores et gris-sombres, presque pélitiques, à graptolites, en intercalations avec les schistes gréseux et les grès à ciment fortement argileux. [28]

#### **B. Le Dévonien Inférieur**

Il débute, localement, par des microconglomérats zoo géniques de base (Lumachelles), au-dessus desquels, on trouve une série d'argiles gréseuses et de schistes argileux, surmontée par une couche d'oolites ferrugineuses, et se termine par un niveau constitué de calcaires à Crinoïdes, fortement gréseux par endroits, et de grès à grain grossier de couleur rouge et rosâtre. Les couches susmentionnées d'oolites ferrugineuses apparaissent généralement dans la région de Gara-Djebilet. A l'Est de cette région, les parties plus hautes du Dévonien Inférieur ne contiennent pas de série argileuse et sont typiquement gréseuses. [28]

### **C. Le Dévonien Moyen**

Il se caractérise par un faciès carbonaté et carbonato-argileux. En bas, ce sont des calcaires légèrement gréseux, avec des minces bancs de grès à gros grains, de teinte rose ; plus en haut, on ne trouve qu'un faciès carbonato-argileux. Ces derniers sont représentés par des marno-calcaires avec des plaques de calcaires-zoo géniques bleu-gris, des schistes argileux et des marnes jaune-verdâtres à la base desquelles, on trouve un banc de concrétions ferrugineuses avec de minces bancs de gypse. Enfin, la coupe se termine par un banc de calcaires zoos géniques (Lumachelles). [28]

### **D. Le Dévonien Supérieur**

Il est constitué par un ensemble argilo-gréseux passant, au toit, à un faciès argilo-silteux. Dans la partie inférieure de ce niveau, on observe trois couches caractéristiques de calcaire zoo génique de teinte bleue. Au toit, parmi les argiles fortement gréseuses, apparaissent de minces bancs de gypse. [28]

### **E. Le Carbonifère**

Il repose en concordance sur les dépôts du Dévonien Supérieur. Il est représenté par deux faciès à savoir :

- **Marin**, dont les dépôts sont classés parmi les formations du Strunich, du Tournaisien et du Viséen
- **Continental**, attribué au Carbonifère Supérieur (Namurien – Stéfanien).

### **F. Le Carbonifère Inférieur**

Il débute par des bancs de grès à gros grains séparés par des couches d'argilites à intercalations de calcaires et de marnes. Au-dessus, on trouve des dépôts carbonatés et carbonato-argileux passant plus haut aux argilites marines et aux grès à grains fins et moyens, contenant des lentilles de calcaires et de marnes. Au toit apparaissent les formations de calcaires et de marnes avec une faune en abondance, avec la présence de lentilles de gypse et d'anhydrite. C'est un épisode d'une sédimentation lagunaire ayant terminé la période de sédimentation marine dans le bassin de Tindouf. [28]

### **G. Le Carbonifère Supérieur**

Il est représenté exclusivement par les dépôts de faciès continental, parmi lesquels deux séries ont été distinguées à savoir : Série de Djebel Rouina et série du Merkala.

- La série de Djebel Rouina commence à la base par des argilites et les silstones, avec de minces lentilles de calcaires et de marnes. La partie supérieure de cette série est composée pour la plupart de grès à grains fins, à luminations obliques et intercalations d'argilites. Entre la série de Djebel Rouina et celle de Merkala, sus-jacente par rapport à la première, apparaît une couche de dépôts macro clastiques à

ciment carbonaté et stratification oblique, c'est la molasse du Westphalien moyen appelée également « grès Ouadene ».

- La série de Merkala est constituée d'argilites de teinte brun-rouge avec intercalations de grès à grains fins et à stratification oblique.

La série toute entière susmentionnée de dépôts Paléozoïques est recoupée par des intrusions post-carbonifères de dolérites et de gabbro-dolérites. Dans la partie centrale et septentrionale du bassin de Tindouf, les roches du sous-sol plus ancien sont couvertes par le faciès continental du Crétacé Supérieur et du Pliocène constituant la Hamada. Ce sont des argiles et principalement des grès plus ou moins argileux, par endroits marneux avec des bancs de microconglomérat. Le toit est constitué de calcaires tabulaires fortement silicifiés avec des dalles tufeuses d'origine lacustre. [28]

### **a.3 Les Dépôts Détritiques Quaternaires**

Ils sont représentés par les formations éluviales, remplissant les oueds, et les sables éoliens sur les ergs. Les alluvions sont constitués de matériel déritique, de pélique allant jusqu'aux débris de roches, absolument non classés et très peu façonnés. Les sables éoliens sont quartzo-feldspathiques, dont la fraction est composée de grains fins, accompagnée d'une quantité de fraction pélique. [28]

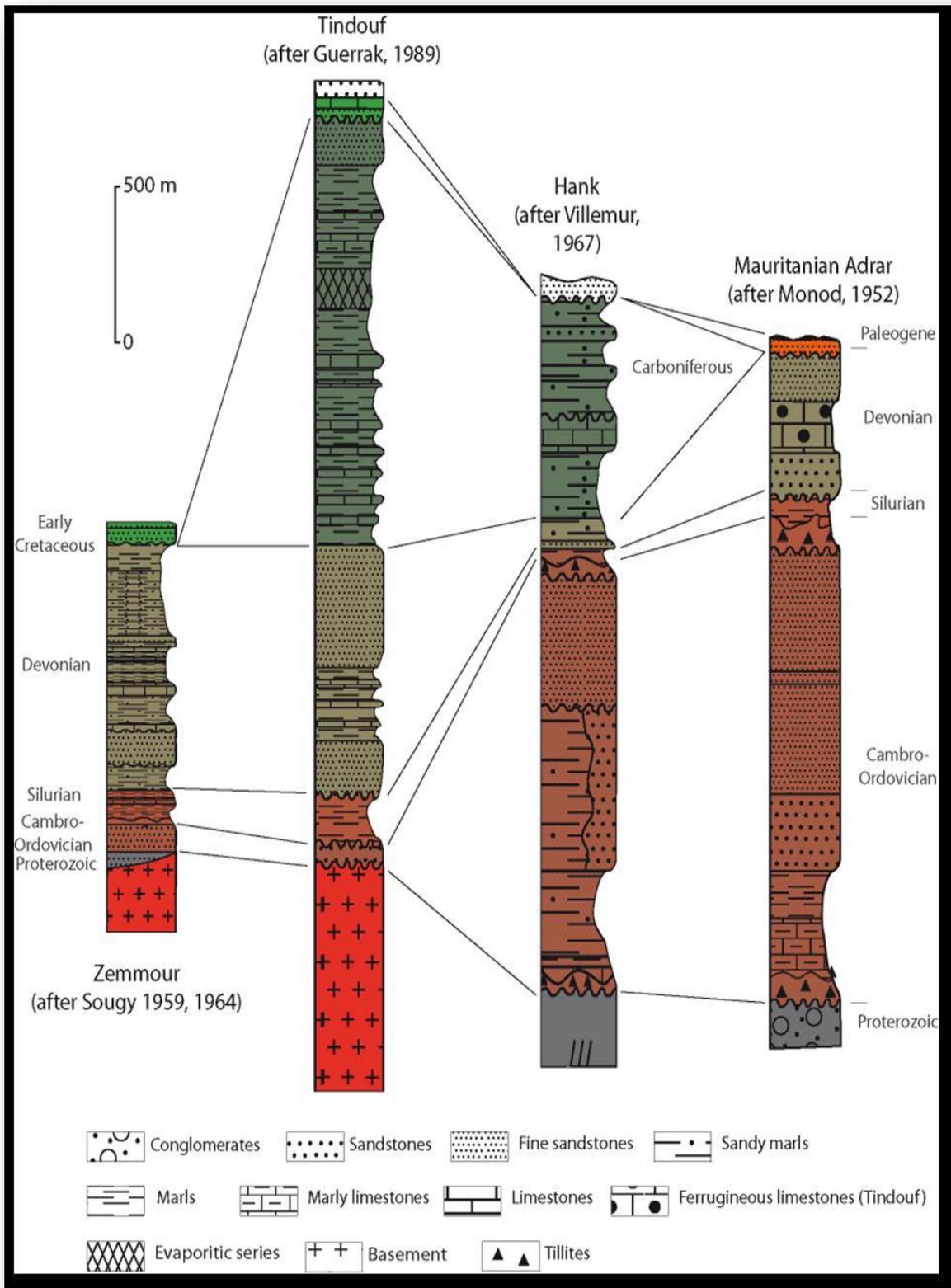


Figure II.3: Stratigraphie simplifiée des bassins cratoniques de Tindouf. L'échelle verticale est la même pour tous les logs.

II.3 Structure Du Bassin De Tindouf

Le bassin de Tindouf (Figure II.4) a été individualisé à la fin du Paléozoïque (Carbonifère supérieur). Sa marge sud est monoclinique avec un faible pendage (moyenne 1 à 2° vers le nord). La structure limite est caractérisée par la présence de trois moles ou zones hautes (Aouinet, Laroussi et Bou Bernous) séparées par les sous-bassins du Djebilet et de l'Iguidi. Le sous-bassin de Djebilet est très peu profond, tandis que le sous-bassin d'Iguidi est fortement subventionné. Certaines failles de tendance OSO-ENE ou SO-NE couvrent tout le Paléozoïque et sont injectées de diabase.

Le bord nord du bassin est très vertical, face à l'anti-Atlas marocain. L'inclinaison des couches varie de 8° à 12°. La série paléozoïque ici est fortement courbée. Les plis étaient plus lourds à l'Ordovicien et plus souples et nombreux au Dévonien, formant la ceinture anticlinale à grande échelle de ZemoulAdim Filou. La ceinture est affectée par de nombreuses failles (dont certaines sont distantes de plus de 150 km et ont un volume de rejet d'environ 200 à 400 mètres), notamment des appuis de fenêtre et des filons de diabase. Dans la partie ouest de l'anticlinal ZemoulAdim Filou, la direction des plis et des failles est NOSE, qui est parallèle à la chaîne de montagnes Ugarta. A l'est, l'adresse est OSO-ENE, qui est l'adresse près d'Anti Atlas. L'existence de cette zone persistante et fortement plissée dans la partie nord du bassin de Tindouf est due à un accident de socle important (glissement de terrain) en direction ENE. [27]

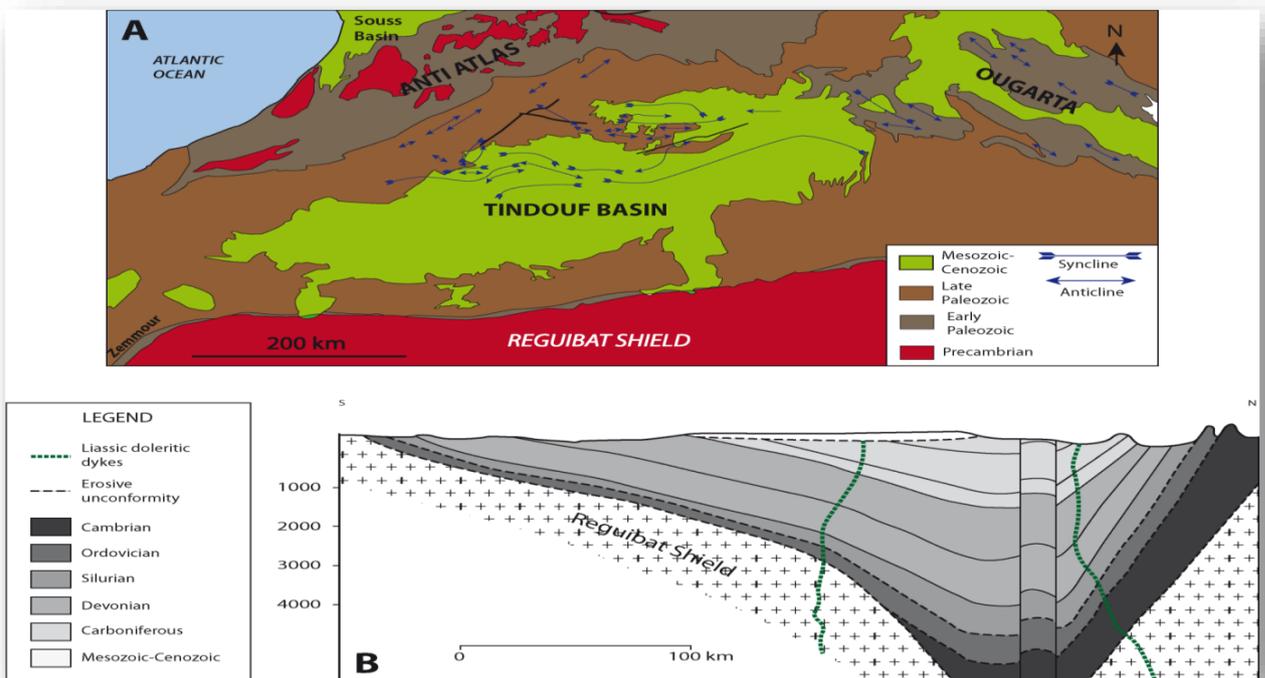


Figure II.4: Structure du bassin de Tindouf. (A) Structures plissées dans la partie nord du bassin. (B) Coupe du bassin de Tindouf, avec une forte exagération verticale (x25). [29]

### II.3.1 Evolution Géodynamique Du Bassin De Tindouf

L'évolution géodynamique du bassin de Tindouf a été déterminée par sa position entre la dorsale Reguibat relativement stable et la région de subsidence active située à la place de l'Anti-Atlas. Quatre phases tectoniques auraient affecté le bassin de Tindouf, à savoir :

- A. l'orogénèse panafricaine** : qui est le résultat de la collision entre le craton ouest africain à l'ouest et une zone mobile à l'est. Cette orogénèse aurait provoqué la création et la réactivation dans le socle des failles de direction N-S ;
- B. la compression taconique (Caradocien)** : au Caradocien, des mouvements compressifs le long des accidents sub-méridiens se produisent au Sahara. Ces mouvements provoquent des bombements régionaux sur les boucliers Reguibat et Touareg. Ils sont contemporains à la phase de compression taconique connue en Afrique. Dans le bassin de Tindouf, cette phase est soulignée par la discordance intra-caradocienne et par l'apparition de bombements N-S ;
- C. la compression calédonienne** : à la fin du Silurien et au début du Dévonien, une nouvelle phase tectonique compressive affecte le Sahara. Dans le bassin de Tindouf, elle provoque la surrection des môles d'Aouinet, de Laroussi et de Bou Bernous, séparés par les sous bassins de Djebilet et de l'Iguidi ;
- D. les mouvements hercyniens majeurs**, de la fin du Paléozoïque, ont provoqué dans la plate-forme saharienne des déformations épirogéniques qui sont responsables de la structuration des bassins comme celui de Tindouf. Ces mouvements seraient aussi responsables du plissement intense qu'a subi les formations paléozoïques du flanc nord du bassin de Tindouf.

Au début du Mésozoïque, l'ouest de la plate-forme saharienne, à l'instar des autres régions de l'Afrique de l'Ouest et du Maroc, a connu une intense activité magmatique liée aux stades précoces de l'ouverture de l'Atlantique central. Cette activité magmatique s'est traduite par la mise en place principalement de dolérites (et probablement de basaltes aujourd'hui érodés) dont l'extension est relativement importante. Cependant, malgré leur abondance, ces roches demeurent encore mal connues en Algérie. Seules, quelques études et des relevés cartographiques signalent leur importance. Les affleurements de ces roches magmatiques de l'ouest de la plate-forme saharienne (en Algérie), probablement triasico-liasiens, se localisent dans quatre zones (Figure II.5) :

- ✓ dans le bassin de Tindouf (sur les deux flancs nord et sud) ;
- ✓ sur le flanc oriental redressé du bassin de Reggane (région de Bled el Mess ;
- ✓ Affleurement d'Aïn ech Chebbi-Hassi Taïbine, Reggane, et dans le Touat situé à 85 km au nord-ouest de Reggane) ;
- ✓ dans le bassin de Béchar (entre Abadla et Béchar, et au nord-est de Béchar) En subsurface, la plupart des sondages effectués dans les bassins de Tindouf et de Reggane, ont traversé des roches éruptives injectées dans la série paléozoïque. Il en est de même pour les sondages réalisés à l'est de Béchar, où on retrouve ces roches dans la série triasique non érodée. [30]

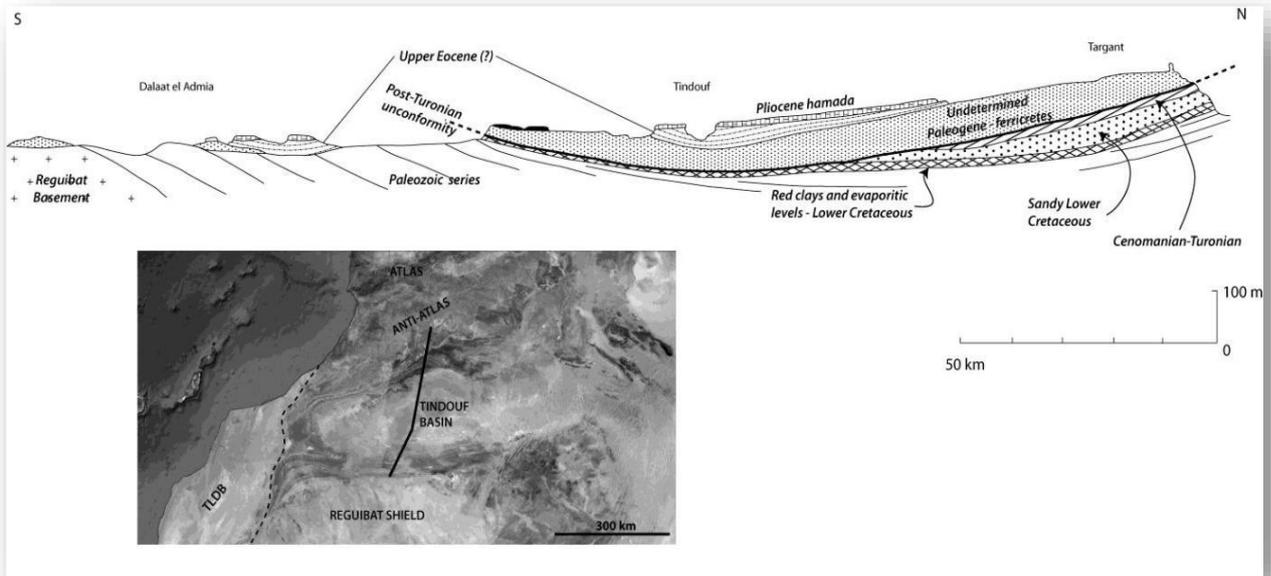


Figure II.5: Coupe Nord-Sud dans le bassin de Tindouf.

## II.4 Le magmatisme Mésozoïque du bassin de Tindouf

### II.4.1 En affleurement

#### II.4.1.1 Le flanc nord du bassin de Tindouf

Sur le bord nord du bassin de Tindouf, un impressionnant système de roches magmatiques s'étale sur 200 km d'est en ouest, et sur près de 150 km du nord au sud (en tenant compte du flanc sud de l'Anti-Atlas au Maroc) et forme l'un des plus beaux systèmes gabbro-doléritiques du monde. Ces roches se présentent sous forme de : [31]

- A. **sills** : qui sont la forme la plus répandue dans cette zone. Leur épaisseur varie de quelques dizaines de mètres à 170 m, et sont interstratifiés dans des couches allant de l'Emsien au Viséen supérieur, avec une nette prédominance dans les formations du Famennien et du Tournaisien. Les couches sédimentaires sont métamorphosées au contact des sills. Ce métamorphisme se limite parfois à une pellicule de quelques centimètres, et peut atteindre jusqu'à 100 m. Les plus importants systèmes de sills du flanc nord du bassin de Tindouf en Algérie, correspondant à ceux de Zémoul, d'Igma, d'Oum el Ksi et de Tinfouchy, se trouvent dans les couches du Dévonien supérieur, et celui d'Oum Oulili dans le Tournaisien ;
- B. **dykes** : orientés NE-SO, qui recoupent toute la série paléozoïque depuis l'Infracambrien jusqu'au Carbonifère continental. Leur épaisseur varie de 10 à 15 m. Rappelons que plus au nord, dans le territoire marocain, le grand dyke de Foug Zguid, d'une épaisseur de 100 à 150 m et d'une longueur dépassant 200 km, appartient au même système gabbro-doléritique du flanc nord du bassin de Tindouf.
- C. **Cheminées** : se présentant sous l'aspect de petits massifs circulaires, qui recoupent les couches sédimentaires à l'emporte-pièce. Elles sont visibles au cœur des anticlinaux tels

que l'anticlinal du Zémoul et d'Oum el Ksi .Ces massifs ont souvent une forme vacuolaire due au dégagement des bulles de gaz.

Les rares descriptions pétrographiques des formations magmatiques situées en territoire algérien, sont très anciennes et indiquent que se sont essentiellement des roches très fraîches, à structures doléritiques à ophitiques, composées essentiellement de labrador, d'augite et de magnétite. Aucune étude géochimique n'a été réalisée sur ces roches. Par contre, celles situées en territoire marocain, ont fait l'objet d'analyses détaillées en éléments majeurs et en traces .Ces études ont montré que toutes ces roches sont des tholéïtes à quartz riches en titane, et qu'elles ressemblent aux dolérites mésozoïques à titane intermédiaire (ITi) de la PMAC. [31]

Les différentes études menées sur les dolérites du flanc nord du bassin de Tindouf (comme celles du flanc oriental du bassin de Reggane) semblent poser un problème quant à l'âge de leur mise en place et celui du plissement majeur qui les a affectées. En effet, ces études ont montré que les sills doléritiques sont plissés avec les couches encaissantes. Une récente étude de terrain effectuée par la Sonatrach sur le flanc nord du bassin de Tindouf en Algérie semble confirmer que les sills doléritiques sont plissés et se trouvent décalés par les mêmes décrochements qui déforment la série paléozoïque. Ceci pose le problème de l'existence d'une phase tectonique postérieure à l'hercynienne, probablement d'âge Jurassique qui aurait affecté cette partie du Sahara. [31]

#### II.4.1.2 Le flanc sud du bassin de Tindouf

Toute la série paléozoïque du flanc sud du bassin de Tindouf est injectée par un vaste système de gabbro-dolérites .Comme sur le flanc nord du bassin de Tindouf, ces roches se présentent sous trois formes [31] :

- A. en dykes** : qui correspondent au type de structure le plus répandu dans cette région. Il s'agit de longs dykes, généralement peu épais (1 à 10 m), dont un triple faisceau, orienté OSO-ENE recoupe la série paléozoïque du flanc sud du bassin de Tindouf entre les méridiens 6°10' et 8°30'Ouest. Notons aussi que les failles NE-SO et ENE- OSO recoupant cette région, sont liées aux montées magmatiques. A l'est, dans la région de Bou-Bernous, plusieurs dykes injectent des failles NE-SO ou N-S ;
- B. en sills** : qui sont rares et peu épais dans cette partie du bassin de Tindouf. Ils sont souvent injectés dans les formations argileuses du Famennien. D'autres sills affleurent parfois à l'est, dans la région de Bou-Bernous ;
- C. en massifs intrusifs** : probablement des « cheminées », sont également connues dans la région et affectent des surfaces importantes. C'est à ce type qu'il faut peut-être rattacher la formation doléritique étudiée par S. Guerrak dans la région de Mecheri Abdelaziz, et décrite comme étant un neck.

En surface, ces roches sont souvent altérées et se présentent en boules. Un métamorphisme de contact se développe autour des montées magmatiques. Cet effet est beaucoup plus intense autour des sills et des cheminées, qu'autour des dykes. Une description pétrographique sommaire des ces roches effectuée par P. Gevin montre qu'elles sont composées essentiellement de labrador et de clinopyroxène.

De l'amphibole, de la biotite et de parfois de l'olivine sont également présentes. La texture des roches est intersertale.

L'étude pétrographique de la dolérite de Mecheri Abdelaziz faite par S. Guerrak a montré aussi que cette roche présente une texture intersertale et qu'elle est composée essentiellement de plagioclases de type bytownite, et de clinopyroxène. L'olivine, l'orthopyroxène, la biotite, le quartz, l'apatite, les minéraux opaques et les minéraux secondaires (chlorite et calcite) complètent la paragenèse. L'étude géochimique effectuée sur cette dolérite a montré la nature tholéiitique de la roche. Aucune datation géochronologique n'a été effectuée sur les dolérites du flanc sud du bassin de Tindouf.

#### **II.4.2 En sondage**

Il paraît que les roches magmatiques mésozoïques sont largement répandues dans la série paléozoïque de tout le bassin de Tindouf recouvert par la Hamada du Dra, puisque presque tous les sondages effectués dans cette région recoupent ces roches. Au nord de Tindouf, ces roches sont surtout liées au Famennien. Au sud, elles ont été recoupées dans le Cambrien. Dans tous les cas, on y observe un métamorphisme de contact dans les couches situées au mur et au toit de ces formations magmatiques, ce qui prouve leur nature intrusive (Figure II.6).

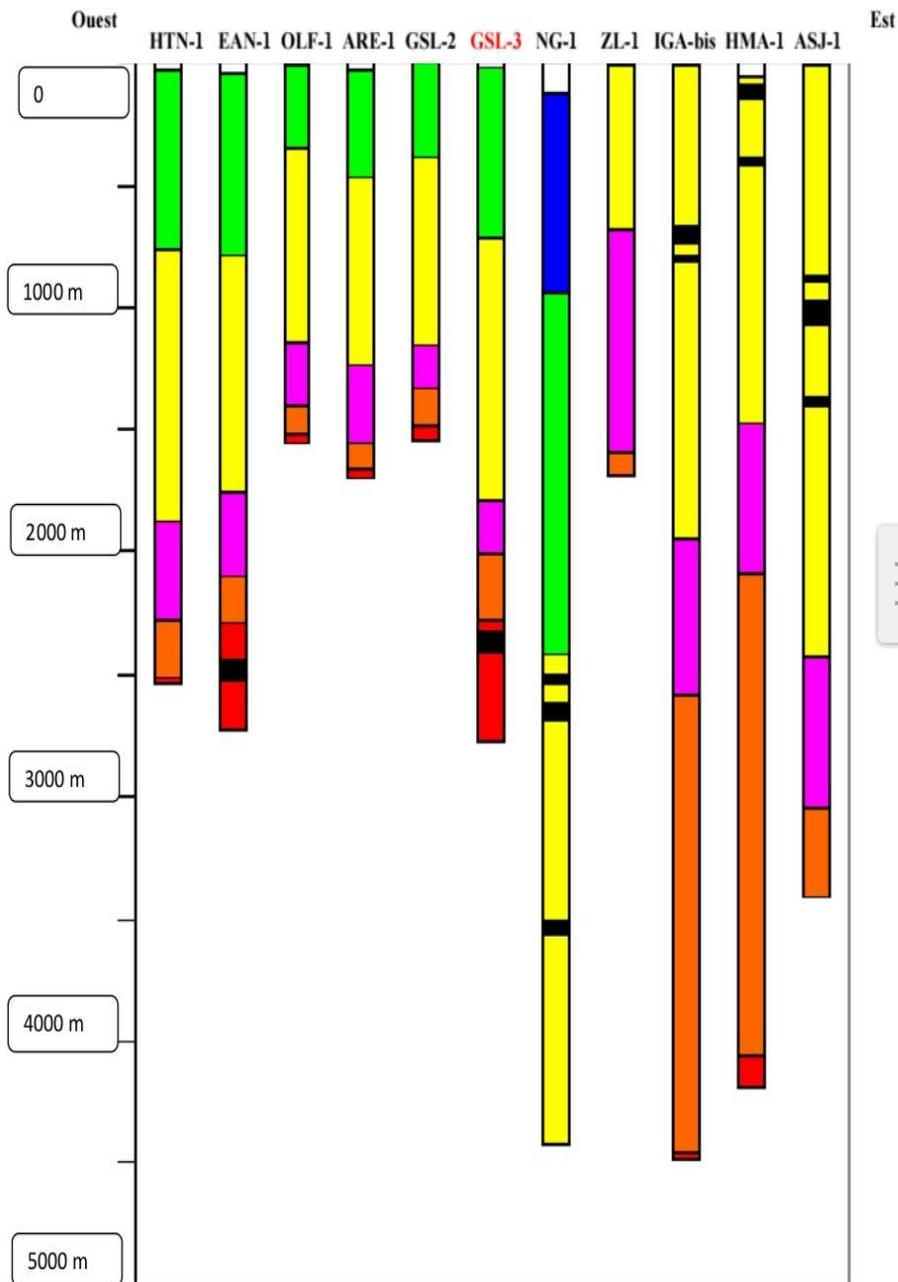


Figure 3.4 Positionnement des roches magmatiques dans les sondages du bassin de Tindouf [29]

■ Dolérite ; ■ Stéphanien+Namurien ; ■ Viséen+Tournaisien ; ■ Dévonien ;  
 ■ Silurien ; ■ Ordovicien ; ■ Cambrien + Précambrien. **GSL-3** : roche éruptive étudiée.

Figure II.6: Positionnement des roches magmatiques dans les sondages du bassin de Tindouf.

## II.5 La mine de Gara Djebilet

La mine de Gara Djebilet a été découverte en 1952. Le gisement est situé Sud-ouest du Sahara Algérien, à 130Km au Sud-est du bassin de la ville de Tindouf à ce bout de terre aux reliefs lunaires, près de la frontière algéro-mauritanienne, à 300 Km à vol d'oiseau de l'océan atlantique et à 1.600 Km au sud de la cote algérienne. C'est un gisement de fer parmi les premiers classé au monde.

Le bassin de Tindouf est délimité par la longitude 4°00' et 8°30' Ouest et la latitude 27°00' et 30°00' Nord et couvre une superficie de 130.000 km<sup>2</sup> (Figure II.7). L'Altitude de ce gisement affleurant horizontal varie entre 400 et 600 mètres au-dessus du niveau de la mer. [32]

Morphologiquement, la zone d'étude peut être divisée en deux parties : la hamada au nord, les affleurements rocheux au sud. Le coin sud-oriental est constitué par un petit morceau d'erg.

La hamada connue, au niveau régional, comme hamada de Tindouf, est tabulaire avec des petites ondulations, avec quelques falaises de direction ouest-est. Dans les dépressions se sont installées des sebkhas dont la principale, celle de Tindouf (100 km de longueur, et presque 20 km de largeur). [27]

Les affleurements rocheux sont constitués, en grande partie, par des grés paléozoïques, et par des granites, d'une manière subordonnée par des silts stones, argiles etc., du Dévonien moyen et supérieure. L'aspect des affleurements rocheux présente rarement des pentes abruptes à cause de l'érosion qui arrondi tous les angles et les arêtes des rochers.

L'hydrographie est très mal identifiable. La plus grande partie de la hamada est aréique, tandis que la sebkha de Tindouf, ainsi que les affleurements rocheux, forment des bassins endoréiques. [28]

La Figure II.8 présente une vue d'ensemble du gisement de fer de Gara Djebilet Tindouf.

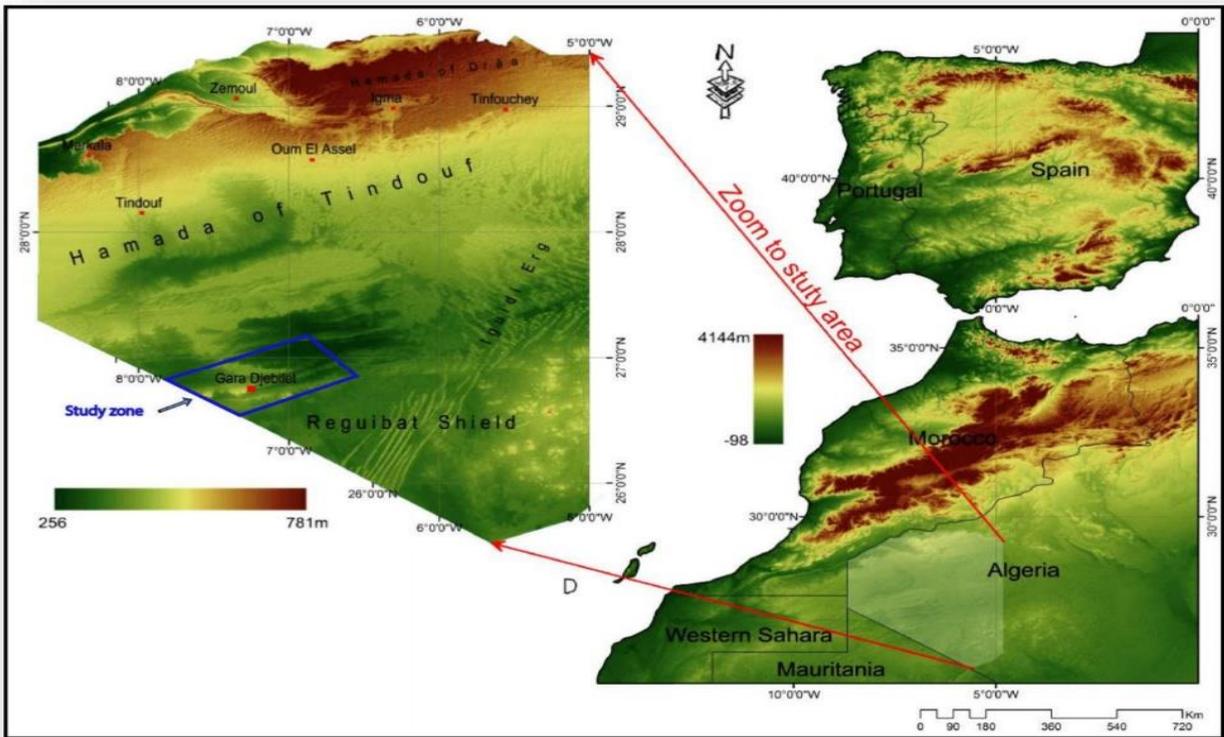


Figure II.7: Situation géographique de la zone. [33]



Figure II.8: Vue générale du gisement de fer, Gara Djebilet. [34]

II.5.1 Stratigraphie du gisement

Le gisement de gara Djebilet a 3 couches superposes :

- **La première couche (MUR)** : le minerai oolitique- non magnétique, d'épaisseur dépassé 10 mètres. La teneur de fer entre 40-57%
- **La deuxième couche (intermédiaire)** : le minerai est oolitique-magnétique. la teneur de fer plus de 57% au Gara Centre, 58% au Gara Ouest et 63% dans les autres parties qui sont riches.
- **La troisième couche (TOIT)** : le minerai oolitique-non magnétique. La teneur de fer est rare de dépasse 50%. [35]

II.5.2 Caractérisation de minerai du gara Djebilet

- **La densité** : la densité moyenne  $\approx 3.5$  pour le fer de 58% au Gara centre.
- **Porosité** : elle est au moyenne de 18% pour Gara Ouest et 15% de Gara centre. [36]

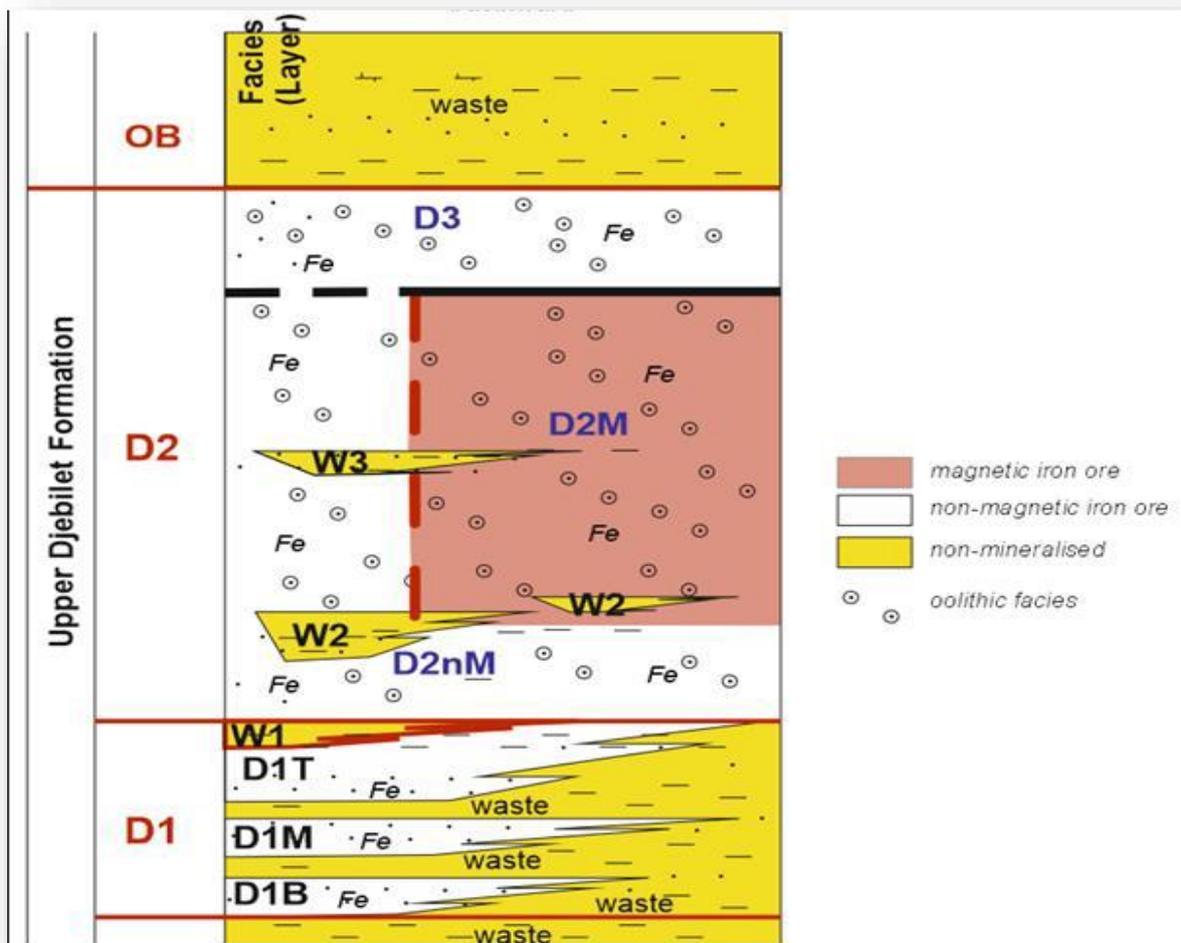


Figure II.9: Formation de minerai. [35]

Le minerai de fer oolithique du champ de Gara Djebilet se trouve dans les sédiments du Dévonien inférieur du bassin de Tindouf (Sahara algérien), en particulier dans la formation de Djebilet supérieur d'âge pragien. Trois grandes lentilles forment trois gisements individuels, s'étendant E-W sur environ 60 km, à savoir Gara West, Gara Center et Gara East.

La minéralisation est inter stratifiée avec des sédiments argileux à sableux et elle peut être liée à un paléo environnement d'île barrière, bordé par une lagune intérieure ou une baie peu profonde et une mer épicontinentale. Piégés par des hauts-fonds paléozoïques, les sédiments oolithiques présentent une minéralogie marquée principalement par la magnétite, l'hématite, la goethite, la maghémite, la chamosite (bavalite), la sidérite, l'apatite et le quartz.

Trois associations para génétiques présentent une distribution verticale avec un minerai non magnétique inférieur, un minerai magnétique et un minerai non magnétique supérieur.

Trois types de faciès pétrographiques ont été définis : un faciès cimenté (FOC) ; un faciès détritique (FOD) ; et un faciès non détritique (FOND). [37]

Les données chimiques pour l'ensemble du champ montrent une différence entre le minerai non magnétique inférieur (Fe = 54,6%), le minerai magnétique (Fe = 57,8%) et le minerai non magnétique supérieur (Fe = 53%). Le minerai magnétique, qui correspond principalement au minerai exploitable (teneur de coupure à 57%), a la composition suivante : SiO<sub>2</sub> = 4,9%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4,2%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 61,43%, FeO = 19,2% et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 1,8%. [37]

Les réserves de minerai économiques calculées correspondantes sont de 985 × 106 t, avec 57,8% de Fe.

Concernant la genèse du minerai de fer oolithique, une source méridionale est suggérée pour le fer, le dépôt se faisant dans un environnement calme. Là, les ooïdes se sont développés par un mécanisme d'accrétion intra sédimentaire autour du grain détritique dans une boue riche en fer.

Le champ de Gara Djebilet est une occurrence importante de la «ceinture de pierre de fer du Paléozoïque d'Afrique du Nord» s'étendant de Zemmour à la Libye, qui comprend également des pierres de fer d'âge ordovicien, silurien et dévonien. [37]

**Tableau II.1: Résultats des analyses. [37]**

Minerai	Magnétite	Maghémite	Hématite	Limonite	Quartz	Chamosite	Cellophane	Autres
<b>Taux</b>	16,9	34,5	18,1	8,2	4,8	15	2,3	0,2

## II.6 Minéralogie de minerai

Le minerai de Gara Djebilet est composé de nombreux minéraux ferrifères dont la magnétite, la maghémite (magnétite altérée), l'hématite, la goethite, la chamosite, la sidérite, la martite et la pyrite (Tableau II.2).

L'apatite et la crandallite sont les deux minéraux non ferrifères importants relevés. Le phosphore, élément nuisible, se localise principalement dans l'apatite authigène, mais aussi dans la crandallite et la florencite, localement les phosphates du groupe crandallite sont en partie responsables des teneurs en arsenic. [36]

**Tableau II.2:** Composition chimique de minerai de fer de Gara Djebilet après essai de bouletage. [38]

<b>Elements</b>	Fer total	Fe <sup>++</sup>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
<b>Taux %</b>	55.46	6.52	5.68	2.91	4.21	0.39
<b>Elements</b>	Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	P	MnO	PF
<b>Taux %</b>	1.23	0.07	0.51	0.84	0.29	5.24

Les propriétés chimiques des boulettes particulièrement pour le point fer a tendance à diminuer avec l'augmentation de l'indice de basicité et atteint pour les boulettes à indice de basicité égale à 2.0, une valeur de 54 %. Ceci s'explique par l'augmentation de la quantité de chaux dans le mélange à bouleter favorisant la formation de la phase silico- ferrite de calcium et d'aluminium au cours de la cuisson, fusible à basses températures. [38]

## Conclusion

Le gisement de Gara Djebilet est situé à environ 140 km au sud-est de Tindouf. Il se compose de 3 zones : la zone Est, la zone Ouest et la zone centrale. Le minerai de fer de Gara Djebilet est présent sous forme de différents minéraux (magnétite, maghémite, hématite, goethite, apatite, chamosite, anapaite, collophane etc.). Le phosphore est présent sous forme d'apatite et de structure comprenant du fer et du phosphore.

# *Chapitre III*

## **Introduction**

Le présent chapitre englobe les différentes étapes suivies pendant notre travail, commençant par l'échantillonnage jusqu'à la caractérisation. Nous avons commencé par la préparation des échantillons qui est une étape préliminaire et cruciale permettant le conditionnement des échantillons prélevés.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à la caractérisation physico-chimique. (FX, DRX, IR) des échantillons : brut et ceux des différentes classes granulométriques.

## **III.1 Echantillonnage**

### **III.1.1 Echantillonnage**

L'échantillonnage est une opération de prélèvement des échantillons qui représente toute la surface de la zone étudiée. Elle est réalisée à l'aide d'une masse métallique enveloppée par plusieurs couches de papier et nylon pour éviter toutes contaminations possibles. Les points sélectionnés concernant les affleurements rocheux des unités géologiques principales des régions étudiées. [39]

En général le prélèvement des échantillons se fait en deux temps :

1. Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai. Le matériau étant homogène, le nombre de prélèvements doit être aussi grand que possible.

2. Au laboratoire, prélèvement par partage de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ. [40]

### **III.1.2 Protocole de l'échantillonnage du minerais de gara djebilet**

Suivre un protocole d'échantillonnage bien défini a pour but l'obtention des échantillons représentatifs contenant toutes les caractéristiques physiques et chimiques de l'ensemble du site étudié. [41]

Les principales étapes qui caractérisent une démarche d'échantillonnage sont l'élaboration d'une stratégie de prélèvement, le prélèvement des échantillons sur le site, la conservation des échantillons et leur préparation pour les différentes analyses et méthode de traitement à appliquer. La valeur des résultats de la caractérisation dépend de la réalisation adéquate de toutes ces étapes. La stratégie de prélèvement repose essentiellement sur le volume et le nombre des échantillons ainsi que sur le choix des points de prélèvement des échantillons (nombre et positionnement). La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont effectués. [42]

### III.2 Prélèvement des échantillons

Les échantillons sont délivrés par la société FERAAL–Spa sous forme des roches avec différentes granulométries et ce sont de mélange de différents échantillons bruts (SP1/D2, SP1/D3, SP2/D2, SP2/D3, SP3/D2, SP4/D2, SP5/D2, (figures III.1).



Figure III.1: Echantillon brut de minerai de fer de Gara Djebilet.

### III.3 Préparations des échantillons pour l'analyse

Les sept échantillons prélevés sont mélangés et préparés au niveau du laboratoire du département des Mines et Géologie. La figure III.2 représente un diagramme des étapes de préparation. Ce diagramme se compose des étapes suivantes : homogénéisation, Division, concassages broyage...etc. Les échantillons sont préparés afin de réaliser des analyses physico-chimiques (FX, DRX, IR) et une analyse granulométrique.

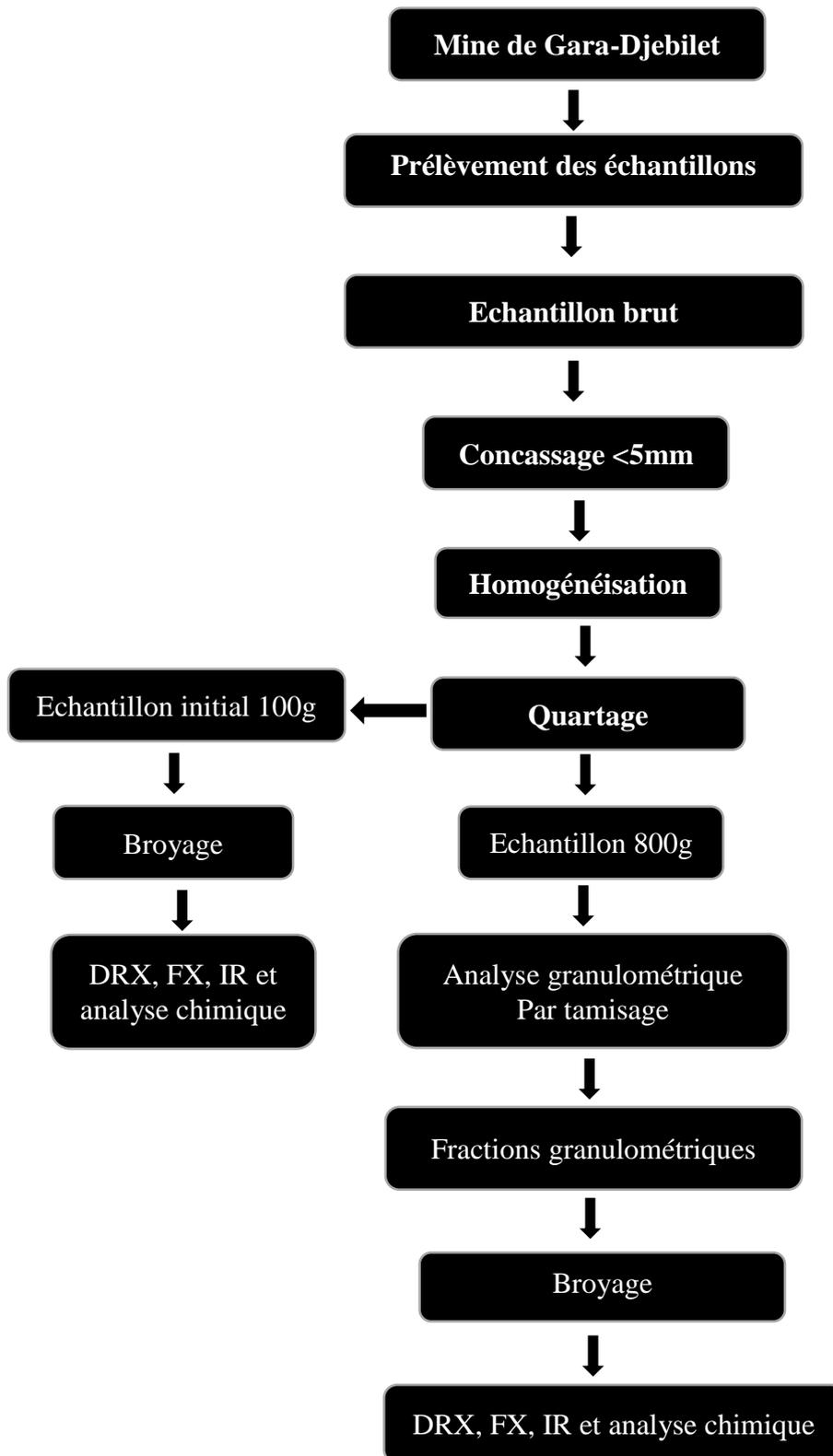


Figure III.2: Protocole de préparation mécanique du minerai de fer de Gara-Djebilet.

### III.3.1 Concassage

Le concassage est la première étape du procédé de fragmentation, il est effectué généralement par voie sèche, il consiste à réduire la dimension du minerai. Cette étape de traitement prépare le minerai à subir une autre réduction de granulométrie (broyage) ou à passer directement aux étapes de classification et/ou de concentration. En règle générale, elle ne produit pas de résidus. [43]

Cette opération est effectuée au laboratoire de préparation mécanique du département des mines et géologies au niveau de l'université de Bejaia. Le concassage des échantillons étudiés a été assuré par un concasseur de laboratoire à mâchoire type FRITSCH, il permet une réduction des morceaux jusqu'à une dimension inférieure à 5 mm et représenté sur la figure III.3.



**Figure III.3:** Concasseur à mâchoire à double effet. Photo prise au laboratoire du département des Mines et Géologie.

### III.3.2 Division

Le séparateur permet de diviser un échantillon en deux parties rigoureusement égales (figure III.4). Le volume à traiter est important et il n'est pas nécessaire de l'analyser dans sa totalité. On verse la totalité du sédiment lavé et séché dans le bac verseur du séparateur. Le sédiment va se séparer en deux sous-échantillons récupérés par deux bacs. L'opération est répétée jusqu'à obtenir le volume de sédiment souhaité.



**Figure III.4:** Diviseur à riffle Jones.

L'échantillon concassé subit une série d'opérations d'homogénéisation et de division jusqu'à l'obtention d'une masse de 800g. Cette masse est destinée à l'analyse granulométrique et 100g sera broyée et destinée à la caractérisation physico-chimique (DRX, FX et IR).

### III.4 Analyse granulométrique

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

L'analyse granulométrique du minerai étudié est effectuée sur une série de tamis d'une machine à secousse du type RETSCH (figure III.5). La machine fonctionne avec des tamis de 200 mm x 50 mm de dimensions. Cette analyse permet de déterminer les proportions relatives à chaque fraction granulométrique constituant l'échantillon primaire séché d'une masse de 800 g.

L'assemblage de tamis utilisés selon la norme européenne NE 933-2 sont de différents diamètres à savoir : 5mm, 4mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm et 63  $\mu$ m. L'échantillon du minerai de fer est tamisé pendant 10 minutes avec une amplitude égale à 5 tours/minute.



Figure III.5: Tamiseuse de marque RETSCH.

### III.5 Caractérisation physico-chimique du minerai de fer de gara djebilet

La caractérisation du minerai de fer est réalisée à l'aide de différentes méthodes : la diffraction des rayons X dont le but est de déterminer les éléments majeurs présents dans les échantillons, la fluorescence X et la spectroscopie infrarouge IR pour connaître la composition chimique des différents échantillons.

### III.5.1 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons commence par le broyage, qui est un procédé de fragmentation qui consiste à réduire la dimension du minerai à une dimension plus fine. Cette opération est effectuée au laboratoire est réalisée par un broyeur à boulets de type RETSCH (figure III.6), avec une vitesse de rotation égale à 145 tours/minute pendant 1 heure.



Figure III.6: Broyeur type RETSCH.

### III.5.2 Méthodes d'analyse

Les échantillons des différentes fractions granulométriques issus du broyage et après tamisage, Diffraction sont analysés par :

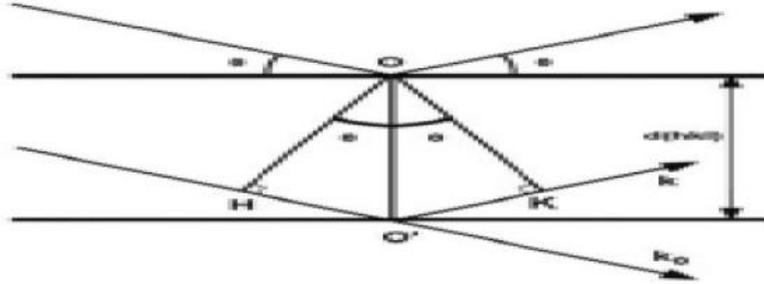
#### III.5.2.1 Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, argiles,...etc.) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs. Les atomes s'organisent donc en plans réticulaires plus au moins denses qui sont désignés par leurs coordonnées  $(h,k,l)$  dans un système de repérage de l'espace. Les plans réticulaires sont séparés par des distances caractéristiques  $(dhkl)$  selon la nature du cristal ou du minéral considéré.

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques présentant des longueurs d'onde de l'ordre de l'angström. Ces longueurs d'onde étant proches des distances interatomiques des solides que nous désirons analyser, les rayons X sont diffractés lorsqu'ils traversent un réseau cristallin. Cette diffraction est d'autant plus intense que la famille de plans est « dense » c'est-à-dire riche en atomes. Un faisceau de rayons X incident de longueurs d'onde  $\lambda$  ne sera réfléchi par une famille de plans  $(hkl)$  que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle  $\theta$  dit angle de Bragg (Figure III.7) tel que :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Avec  $n$ , nombre entier, qui est l'ordre de diffraction.



**Figure III.7:** Un faisceau de rayons X.

Un balayage d'angle de diffraction est obtenu à l'aide d'un goniomètre où l'échantillon plan effectue une rotation avec un mouvement uniforme de vitesse angulaire  $\omega$ .

En balayant le domaine angulaire (dans notre cas de  $20^\circ$  à  $80^\circ$ ), on obtient un spectre entier présentant des pics d'intensité caractéristiques des différents plans réticulaires si le matériau est cristallisé. Si le matériau est amorphe en revanche, on n'obtiendra aucun pic seulement un signal très large.

Les diffractogrammes ainsi obtenus, à l'aide d'un logiciel sont interprétés. Les positions et les intensités des pics observées sont comparés aux fichiers de référence **PDF-ICDD** (Powder Diffraction File - International Center for Diffraction Data) pour l'identification des phases minéralogiques présentes. Et éventuellement l'utilisation de **RIR** (Reference Intensity Ratio) inclus dans le logiciel **HighScore** en plus du fichier PDF-ICDD permet l'estimation semi quantitative des phases correspondantes détectées quand celles-ci sont requises et/ou possibles.

Les analyses de DRX sont réalisées au niveau du laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux et Catalyse. Groupe de Cristallographie et Simulation des Matériaux (LPCMC) de l'université de Béjaia (figure III.8).



**Figure III.8:** diffractomètre à rayons X.



**Figure III.9:** Pastille prête.

### III.5.2.2 Analyse Par Fluorescence X (FX)

#### III.5.2.2.1 Principe D'analyse

Lorsque les atomes d'un échantillon sont irradiés par un rayonnement X primaire à haute énergie, des électrons sont éjectés sous forme de photoélectrons. On a alors un déficit en électrons sur un ou plusieurs couches électroniques. L'atome devient alors un ion, il est dans un état instable. Pour retrouver une meilleure stabilité, le trou laissé sur l'orbitale va être comblé par un électron provenant d'une couche électronique plus extérieure. De telles transitions sont accompagnées par une émission d'énergie, sous forme d'un rayonnement X secondaire, c'est la fluorescence.

Permet la détermination de la composition élémentaire de l'échantillon de manière qualitative et quantitative, c'est-à-dire de déterminer la nature et la quantité des atomes qui sont présents dans l'échantillon.

La Spectrométrie de fluorescence X contrairement à la diffraction des rayons X ne permet pas d'accéder à la structure cristalline des matériaux. [44]

L'échantillon séché et pressé est utilisé pour l'analyse des éléments majeurs et traces. La pastille obtenue est soumise à une source de rayonnement X primaire. Il s'ensuit une excitation des atomes qui vont émettre un rayonnement X secondaire de fluorescence caractéristique de la composition chimique de l'échantillon à analyser.

Les analyses de la fluorescence X est réalisée au niveau de l'unité de recherche. - Université Farhat Abbas Sétif 1 - (figure III.10)



**Figure III.10:** Appareil de FX.



**Figure III.11:** Pastille prêt pour  
L'analyse de FX.

### III.5.2.3 Analyse par infrarouge (IR)

#### III.5.2.3.1 Principe d'analyse

La spectrométrie infrarouge permet de caractériser et d'identifier les molécules organiques. Le principe de cette analyse est la mesure de la diminution de l'intensité du rayonnement qui traverse un échantillon en fonction de la longueur d'onde. Les fréquences des bandes d'absorption caractéristiques correspondant aux vibrations normales des différents radicaux entrant dans la composition du minerai étudié.

Les analyses de la spectroscopie Infrarouge (IR) est réalisée au niveau du Département génie des procédés - Université Farhat Abbas Sétif 1 -(figure III.12).



**Figure III.12:** Appareil d'IR.

## Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons mentionné les différentes étapes de préparation des échantillons afin de les analyser par : diffraction X, fluorescence X, et par spectroscopie infrarouge.

# *Chapitre VI*

## Introduction

Le minerai de fer oolitique de Gara Djebilet contient en plus du fer, le pentoxyde de phosphore  $P_2O_5$ . Un composé qui affecte la qualité du concentré pour son utilisation dans l'industrie sidérurgique.

L'intérêt principal de notre travail est la maîtrise d'un procédé efficace pour éliminer le phosphore existant dans les échantillons. Une série d'essais est effectuée afin d'étudier les paramètres gouvernants la cinétique de la torréfaction. Pour cela, nous allons étudier l'influence de quelques paramètres liés à la concentration de chlorure de calcium, élément majeur de torréfaction, sa température, et la taille des particules de minerai de fer.

### VI.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique sert à identifier l'uniformité et la continuité des classes granulométriques de notre échantillon. Elle a été effectuée à l'aide d'une série de tamis sur une prise de 800g selon des ouvertures des tamis variant entre 5 mm et 63  $\mu$ m. Le refus de chaque classe a été pesé et le rendement pondéral (%) a été calculé, ce qui nous a conduits à calculer le refus cumulé (%) et le passant cumulé (%).

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont résumés dans le tableau (VI.1), et présentés dans la courbe (VI.1). Les résultats montrent l'évolution des pourcentages massiques dans les différentes fractions granulométriques.

Il ressort de cette distribution granulométrique par tamisage que les fractions grossières [+4, +2, +1, +0.5 et +0.25 mm] sont majoritaires en pourcentage massique et représente 81,33% (650,56 grammes), ce qui confirme la dureté du minerai. Le reste du produit se présente dans des fractions plus fines [+0.125, +0.063 et -0.063 mm].

Plusieurs paramètres ont été calculés en suivant la méthode de calcul ci-dessous :

#### Coefficient de Hazen

Permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (uniforme). Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$Cu = D_{60}/D_{10}$$

Ou

- Cu : Le coefficient de HAZEN ; D'après CAQUOT et KERISE ;
- Cu < 2 : La granulométrie est serrée (uniforme) ;
- Cu > 2 : La granulométrie est étalée.

**Coefficient de courbure**

Permet de savoir si la granulométrie est bien graduée ou non. Le coefficient de courbure est donné par l'équation suivante :

$$Cc = \frac{D30^2}{D10 * D60}$$

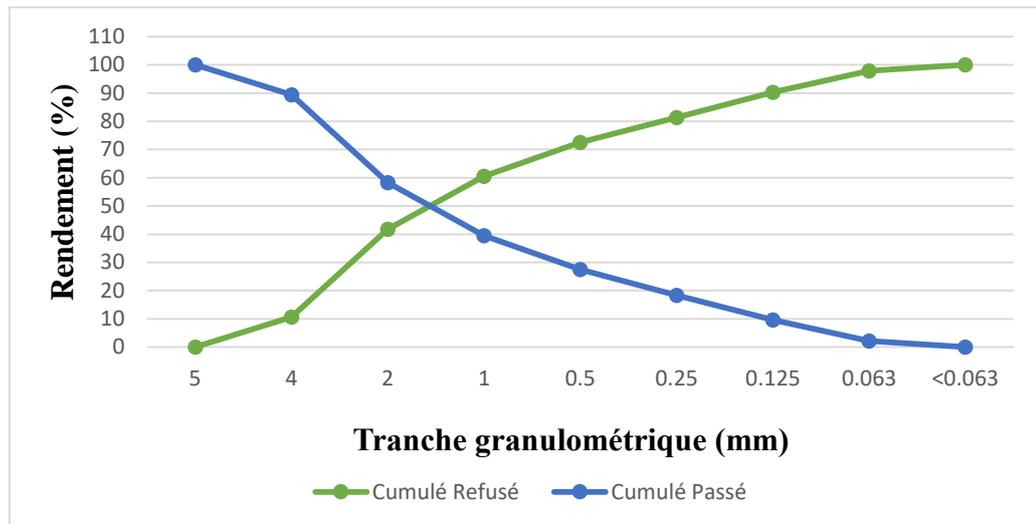
Ou { Cc : le coefficient de courbure ;  
 1 < CC < 3 La granulométrie est bien graduée ;  
 CC < 1 et CC > 3 : La granulométrie est mal graduée.

**D10, D30, D60** : représentent respectivement 10%, 30%, 60% des tamisât cumulés.

**D50** : C'est le diamètre moyen ou la valeur moyenne de la distribution de la taille des particules.

**Tableau VI.1:** Résultats de l'analyse granulométrique du minerai de fer concassé.

Classes granulométriques (mm)	Poids (g)	Rendements (%)		
		Partiel $\sum y$	Cumulé Refusé $\sum y \swarrow$	Cumulé Passé $\sum y \nearrow$
5	0	0	0	100
4	85,01	10,63	10,63	89,37
2	249	31,12	41,75	58,25
1	150,06	18,76	60,51	39,49
0,5	96,3	12,04	72,55	27,45
0,250	70,19	8,78	81,33	18,33
0,125	72,04	9,00	90,33	9,67
0,063	60,1	7,51	97,84	2,16
<0,063	17,3	2,16	100	0
<b>TOTAL</b>	800	100		



**Figure VI.1:** Courbe granulométrique de l'échantillon du minerai de fer initial.

La courbe granulométrique d'un échantillon du minerai de fer concassé à 5 mm a été réalisée par tamisage à sec.

Nous avons déterminé graphiquement les diamètres D10, D30, D50 et D60

D10 = 4 mm ; D30 = 2,75 mm

D50 = 1,5 mm ; D60 = 1 mm.

➤ **Calcul de coefficient de Hazen**

$$Cu = D60/D10$$

$$Cu = 1/4 = 0,25$$

Cu = 0,25 < 2 ; La granulométrie est serrée (uniforme).

➤ **Calcul de Coefficient de courbure**

$$Cc = \frac{D30^2}{D10 * D60}$$

$$Cc = 7,562/4 = 1,890$$

Cc = 1,890 ; 1 < 1,890 < 3 ; La granulométrie est bien graduée.

## VI.2 Caractérisation physico-chimique du minerai de fer de gara djebilet

En raison de la variabilité de la composition chimique et minéralogique des fractions granulométriques, nous allons étudier l'évolution des caractéristiques chimiques, minéralogiques de ce type de minerai en utilisant les méthodes suivantes :

VI.2.1 Diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction X de l'échantillon brut du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet est représentée sur la figure VI.2.

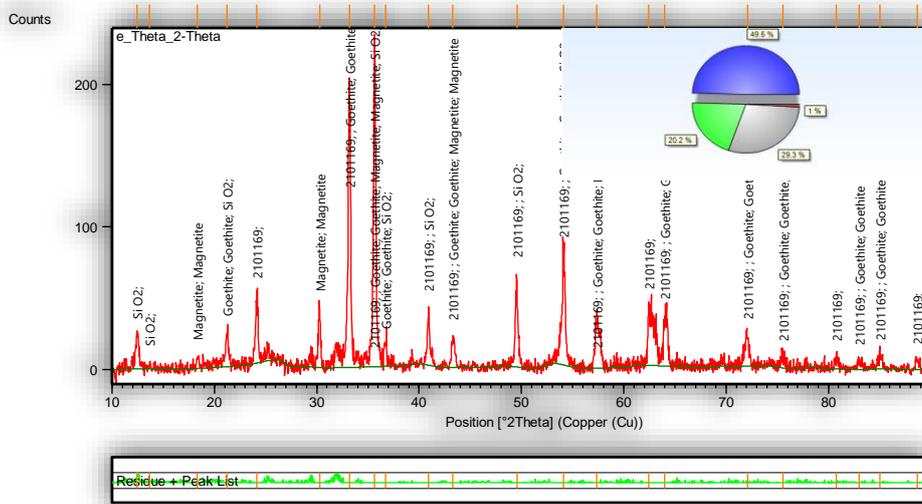


Figure VI.2: Analyse par DRX de l'échantillon brut.

Au vu de ces résultats, il apparaît que la majorité des pics sont prédominés par les phases minérales suivantes : l'hématite (49,5%) la magnétite (29,3%), et la goethite (20,2%) et enfin une phase secondaire qui constitue l'exogangue sous forme de Quartz (1%).

Pour mieux suivre l'évolution de ces minéraux par taille des grains, nous avons effectué une analyse sur les trois principales fractions des échantillons étudiés (grossière, intermédiaire et fine). Les résultats de l'analyse par DRX des tranches granulométriques sont représentés sur les figures ci-dessous :

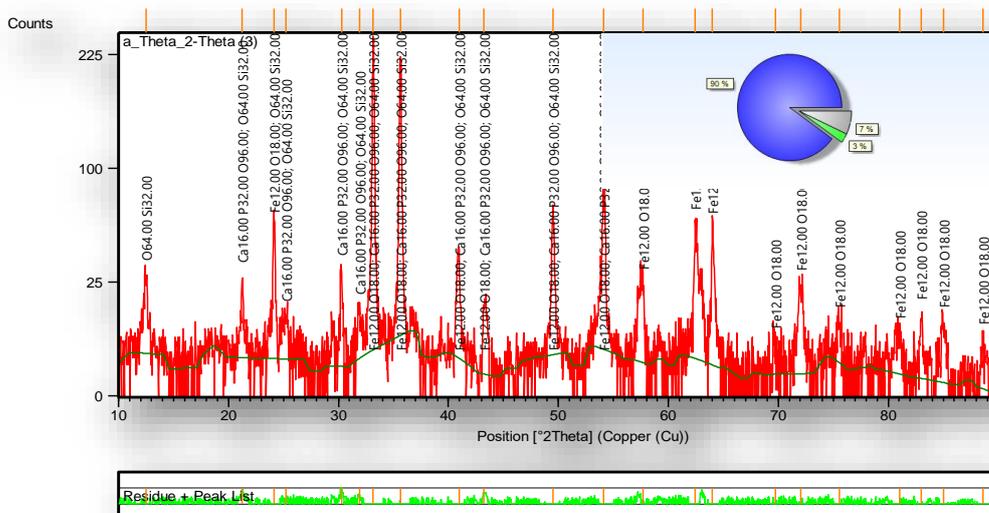
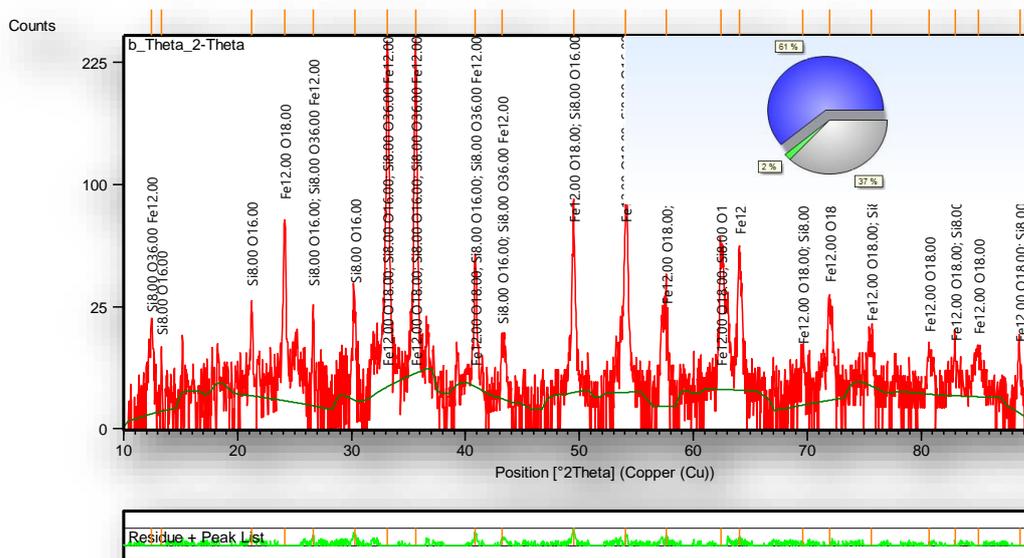


Figure VI.3 : Analyse par DRX de la fraction 4mm.

Les résultats présentés par la figure VI.3, montre l'existence d'une phase majoritaire qui est l'**hématite (90%)**, et l'apparition d'une phase secondaire contenant du **phosphore**, il s'agit de **calcium catena polyphosphate  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  (3%)**, et enfin la phase de **Quartz (7%)**.

Dans la fraction granulométrique 4 mm, nous avons remarqué la prédominance de l'hématite et absence des deux phases : magnétite et la goethite. Cette absence pourrait être expliquée par la dissolution de l'hématite par oxydation des ions  $\text{Fe}^{+2}$  en ions  $\text{Fe}^{+3}$ . Cette hypothèse est supportée par les expériences de GOUT et SOUBIES (1972) montrant que le broyage de l'hématite accélère fortement sa susceptibilité à la dissolution, [45]. La transformation de la magnétite en Hématite se fait le long des plans réticulaires (111). [46, 47] alors que la transformation de la goethite en hématite se fait par déshydratation sans changement de la structure.



**Figure VI.4:** Analyse par DRX de la fraction 2mm.

Le diffractogramme de la figure ci-dessus caractéristique de l'échantillon de la fraction 2 mm montre en plus de la phase principale (**hématite 61%**) et la phase secondaire de **quartz 2%**, une nouvelle phase minéralogique, il s'agit de la **chlorite ( $\text{Fe}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$  37%)**. Ceci est compréhensible dans le mesure ou 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 la chlorite

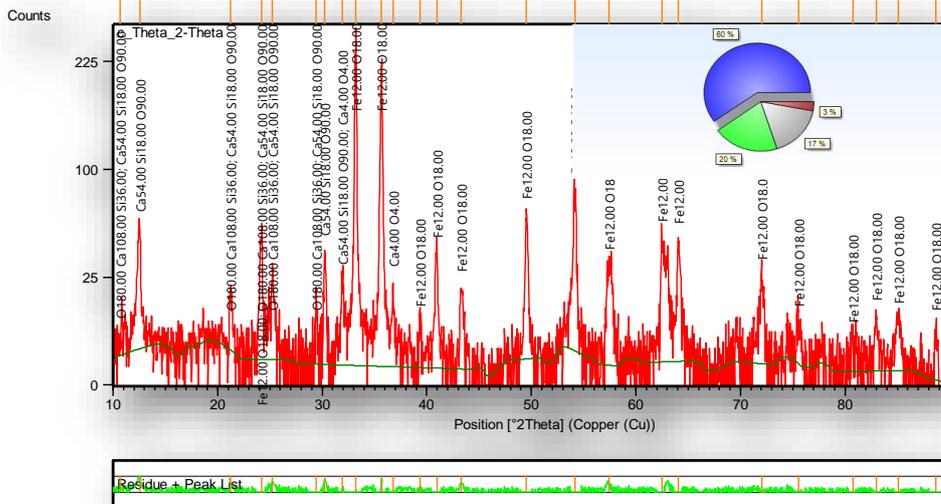


Figure VI.5: Analyse par DRX de la fraction 1mm.

Les résultats minéralogiques de la fraction 1 mm représentés par le diffractogramme de la figure VI.5, met en évidence la présence de la principale phase minérale qui est l'hématite 60% et des phases carbonatées : l'Alite  $\text{O}_{180}\text{Ca}_{108}\text{Si}_{36}$  20%, et 17%  $\text{Ca}_5\text{Si}_{18}\text{O}_{90}$ , et enfin la lime  $\text{CaO}$  à 3%.

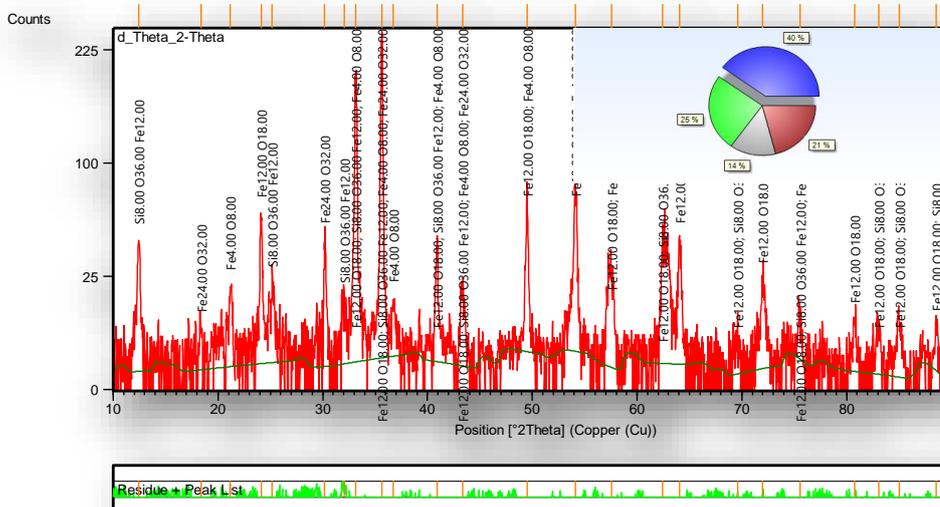


Figure VI.6 : Analyse par DRX de la fraction 0,5mm.

Le diffractogramme de l'échantillon fractionné à 0,5 mm (figure VI.6) présente la composition minéralogique suivante : 40% hématite et 26% chlorite  $\text{Fe}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$  en plus de la magnetite 21% et la goethite à 14%.

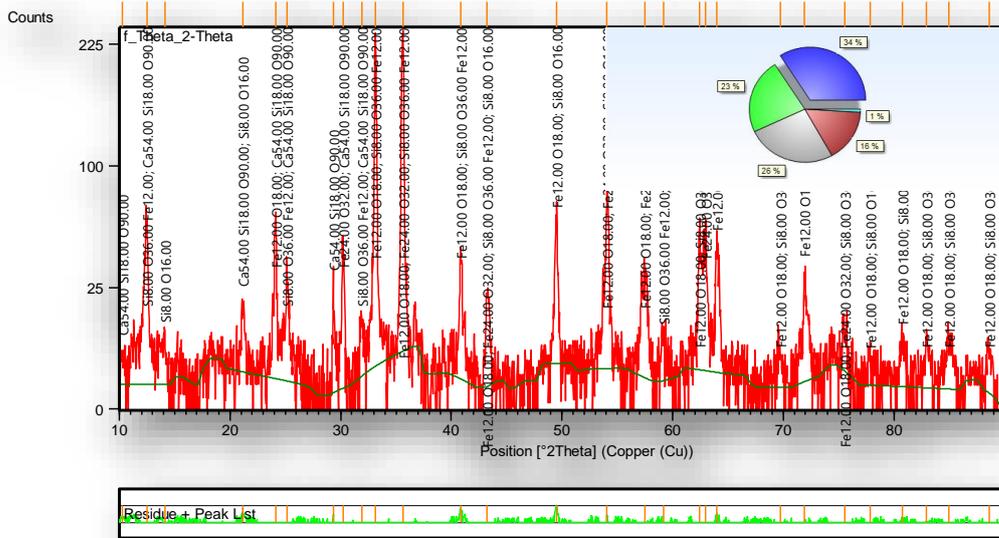


Figure VI.7: Analyse par DRX de la fraction 0,250mm.

L'analyse par diffraction X de la classe granulométrique 0,25 mm a donné le diagramme montré dans la figure de la figure VI.7 et qui montre les phases minéralogiques suivantes : **34%** d'**Hématite**, **26%** **chlorite  $Fe_6(Si_4O_{10})(OH)_8$**  et **23%** **Magnetite** avec l'apparition de la phase minéralogique: **16%**  **$Ca_5Si_8$**  et enfin **1%** de **quartz  $SiO_2$** .

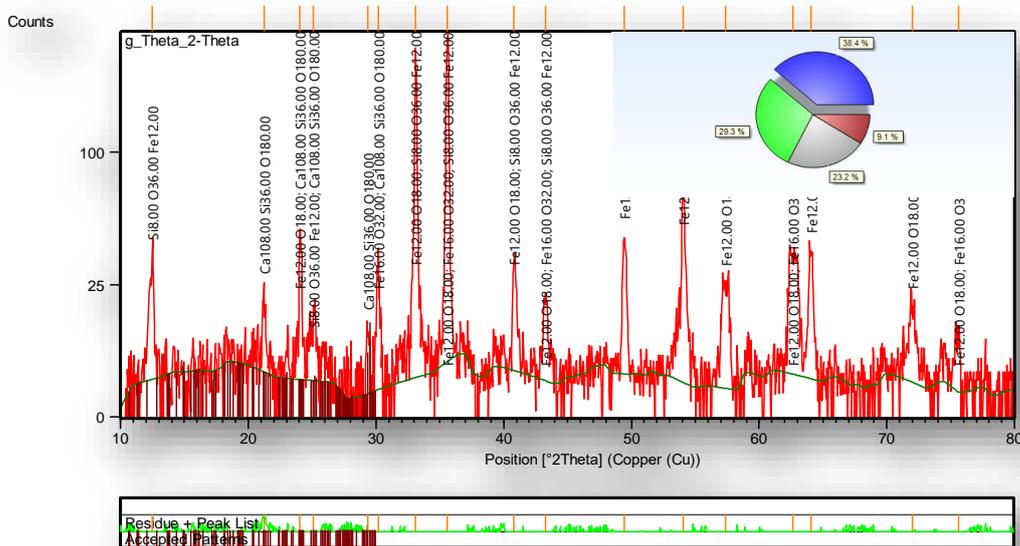


Figure VI.8: Analyse par DRX de la fraction 0,125mm.

L'analyse de cette figure montre que les phases minéralogiques observées dans cette fraction sont de : **38.4%** **Hématite** et **29.3%** **hydroxyde de fer  $FeO(OH)$** , **23,2%** **chlorite  $Fe_6(Si_4O_{10})(OH)_8$**  et **9,1%** **Hatrurite  $Ca_{108}Si_{36}O_{180}$** .

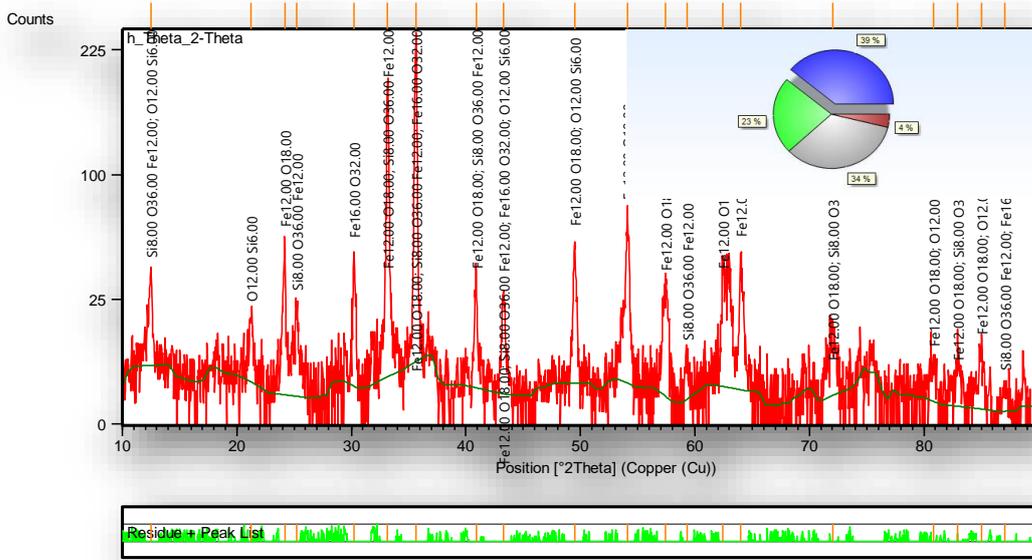


Figure VI.9: Analyse par DRX de la fraction 0,063mm.

L'étude minéralogique du minerai effectuée par diffraction X qui porte sur l'échantillon de la fraction 0,063 mm (figure VI.9) montre la prédominance de la phase principale l'**Hématite (39%)** et l'apparition de la phase **hydroxyde de fer FeO(OH) 34%**, **23% chlorite Fe<sub>6</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>** et **4% de quartz SiO<sub>2</sub>**.

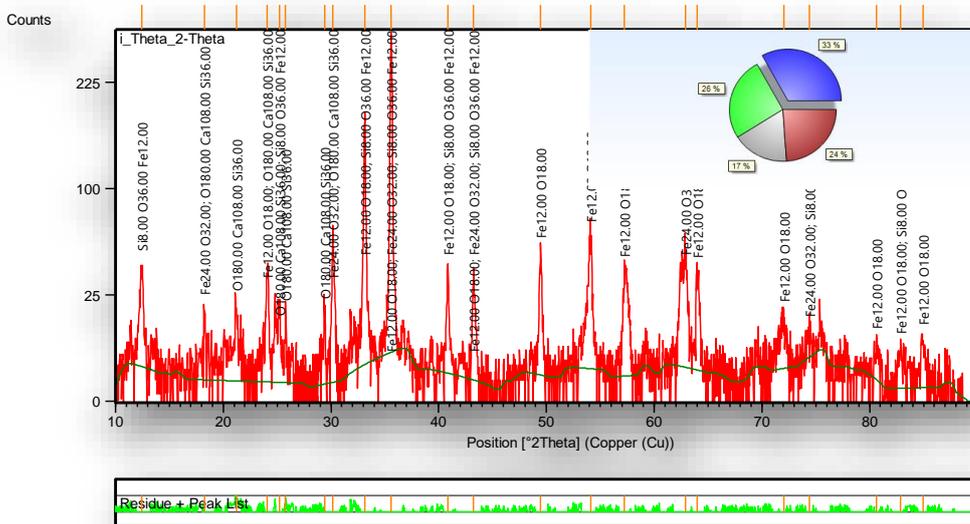


Figure VI.10: Analyse par DRX de la fraction <0,063mm.

La diffraction de l'échantillon de la classe granulométrique la plus fine est présentée sur la figure VI.10, et qui montre la prédominance des phases minéralogiques suivantes : **33% Hématite**, **26% magnétite**, et **24% chlorite Fe<sub>6</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>** et **17% Alite**.

**VI.2.2 Fluorescence X (FX)**

Pour notre étude, nous avons choisis les classes granulométriques 1mm et 0,125m et un mélange de la classe intermédiaire de (0,5 et 0,250mm) et l'échantillon brut. Ces échantillons, ont été soumis à la fluorescence X.

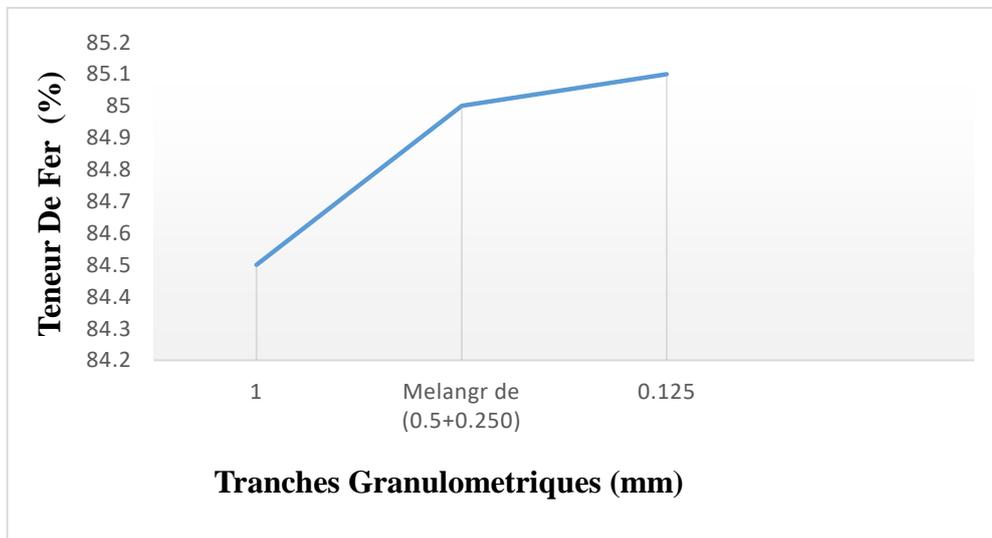
Les résultats de l'analyse par fluorescence X des différentes tranches granulométriques des éléments majeurs, Fe et P sont présentés dans le tableau VI.2.

**Tableau VI.2:** Résultats de l'analyse granulo-mineralogique du minerai de fer de Gara Djebilet par FX.

Classes Granulométriques (mm)	Teneur fer %	Teneur P %
<b>1</b>	84,5	1,21
<b>Mélange de (0,5 et 0,250)</b>	85,0	1,27
<b>0,125</b>	85,1	1,12
<b>Echantillon brut</b>	87,5	0,672

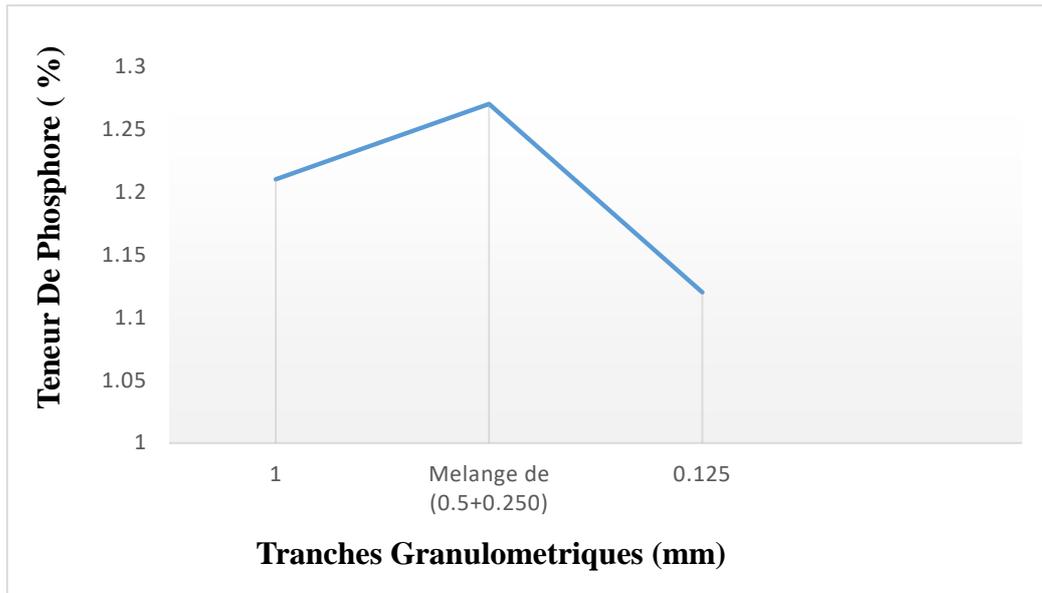
**Interprétation**

Les résultats des analyses granulo-mineralogique des éléments majeurs du minerai de fer de Gara Djebilet montrent que la teneur en phosphore de ces granulométries est équivalente. Alors que la teneur en phosphore dans l'échantillon brut est relativement faible. Ceci montre que le phosphore est libéré pendant le traitement mécanique.



**Figure VI.11:** Evolution de la teneur en fer en fonction des tranches granulométriques.

La figure ci-dessus montre l'effet de la distribution granulométrique sur la teneur en fer. On remarque que la teneur en fer la plus élevée est enregistrée dans la classe granulométrique la plus fine. Ceci est compréhensible dans la mesure il ya un enrichissement du minerai par préparation mécanique.



**Figure VI.12:** Evolution de la teneur en phosphore en fonction des tranches granulométriques.

La figure VI.12 montre l'évolution de la teneur en phosphore en fonction des tranches granulométriques, il ressort de cette figure que la teneur est maximale dans le mélange (0,5+0,250) ou il ya plus de libération du phosphore.

### VI.3 Traitement du minerai de gara djebilet

Le minerai de fer de Gara Djebilet est un minerai oolithique phosphoreux qui nécessite un enrichissement. A l'heure actuelle, il n'existe pas de procédé industriel sûr et propre permettant l'enrichissement et la déphosphoration des minerais de fer oolithique phosphoreux. Cependant, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés et sont en cours dans le monde notamment dans les pays disposant de gisements de minerai de fer oolithiques importants. Les procédés proposés sont basés sur des traitements permettant l'enrichissement du minerai et la libération du phosphore liés au fer en disloquant les oolithes.

Dans notre étude, nous allons essayer de réduire le taux de phosphore par le procédé de torréfaction. Nous allons voir l'influence des variables du procédé sur le traitement du minerai de fer de Gara Djebilet à l'aide de chlorure de calcium  $\text{CaCl}_2$ . Ce dernier est considéré comme un sel hygroscopique (imperméable), qui absorbe l'humidité du minéral et forme une solution saline, qui se combine avec les particules dans le mélange.

Le  $\text{CaCl}_2$  n'est pas facile à évaporer du fait de sa température d'évaporation élevée et de la tension superficielle qui le lie aux fines particules qui seront captées par la suite. [30]

Pour appliquer le procédé de torréfaction, plusieurs paramètres vont être modifiés à savoir : la taille des particules, températures du grillage, et concentrations de chlorure de calcium. Le suivi des résultats sera avec la fluorescence X et la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

Dans chaque essai, l'échantillon d'une masse de 100g est constitué d'un mélange de chlorure de calcium et de minerai de fer à des proportions suivantes selon la gamme granulométrique.

- ❖ 10 grammes de  $\text{Ca Cl}_2$  ajouté à 90 grammes de minerai de fer ;
- ❖ 20 grammes de  $\text{Ca Cl}_2$  ajouté à 80 grammes de minerai de fer ;
- ❖ 30 grammes de  $\text{Ca Cl}_2$  ajouté à 70 grammes de minerai de fer. [30]

Une fois ces proportions sont déterminées, chaque échantillon est divisé en deux sous-échantillons pour subir une torréfaction à 800 et 900°C en utilisant un four **SELECT-HORN** du département de Physique université de Béjaia (figure VI.13).

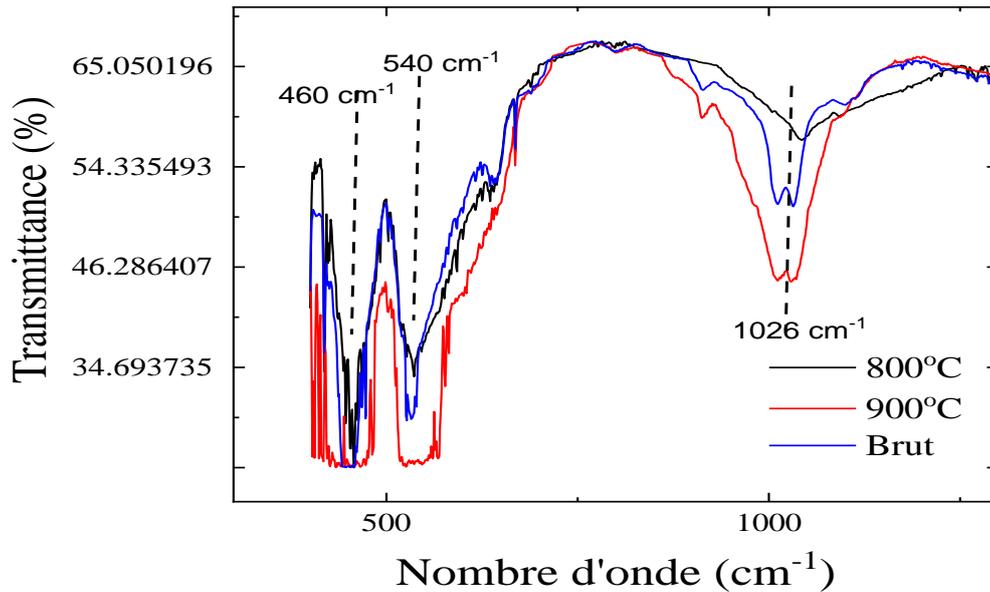


**Figure VI.13:** Four de laboratoire **SELECT-HORN** température maximale 1500°C.

### **VI.3.1 Etude des paramètres influant sur la qualité du minerai**

#### **A. Effet de la température sur le minerai brut**

Un grillage a été réalisé au minerai brut afin de savoir l'effet de la température sur la minéralogie de notre échantillon. Pour ce faire, l'échantillon est soumis à un grillage à deux températures : 800 et 900°C. Les trois échantillons sont ensuite analysés par spectrométrie infrarouge. Les résultats sont illustrés dans la figure ci-dessous.



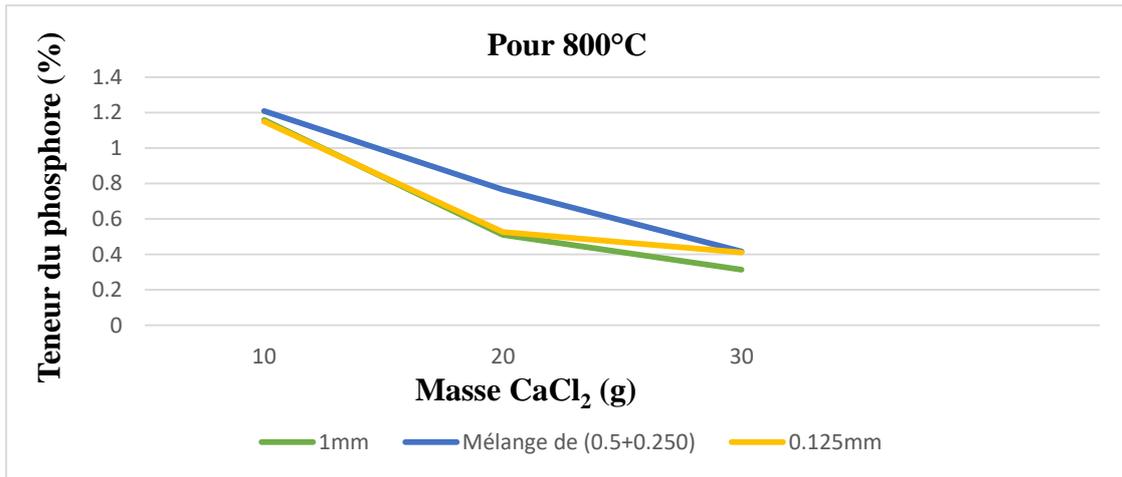
**Figure VI.14:** Spectre IR du minerai de fer oolithique (brut, grillé à 800°C, grillé à 900°C).

La figure ci-dessus montre les spectres IR du minerai de fer brut à la température ambiante et après deux grillages à 800 et 900°C. Le spectre présente trois bandes vibrationnelles à 460, 540, et 1026 cm<sup>-1</sup>.

Le pic intense à 1026 cm<sup>-1</sup> caractéristique de la vibration de déformation dans des groupements OH, tandis que les deux autres pics à 820 et 1000 cm<sup>-1</sup> sont caractéristiques aux (hydr) oxydes de fer [48]. D'après Oh et al [49], les bandes vibrationnelles de l'hématite et de la goéthite ne sont présentes qu'à des nombres d'ondes  $\leq 650$  cm<sup>-1</sup>. Dans la même gamme plusieurs pics identiques mais beaucoup plus larges sont présents, ceci peut être attribué à la transformation des phases entre (hydr) oxydes de fer.

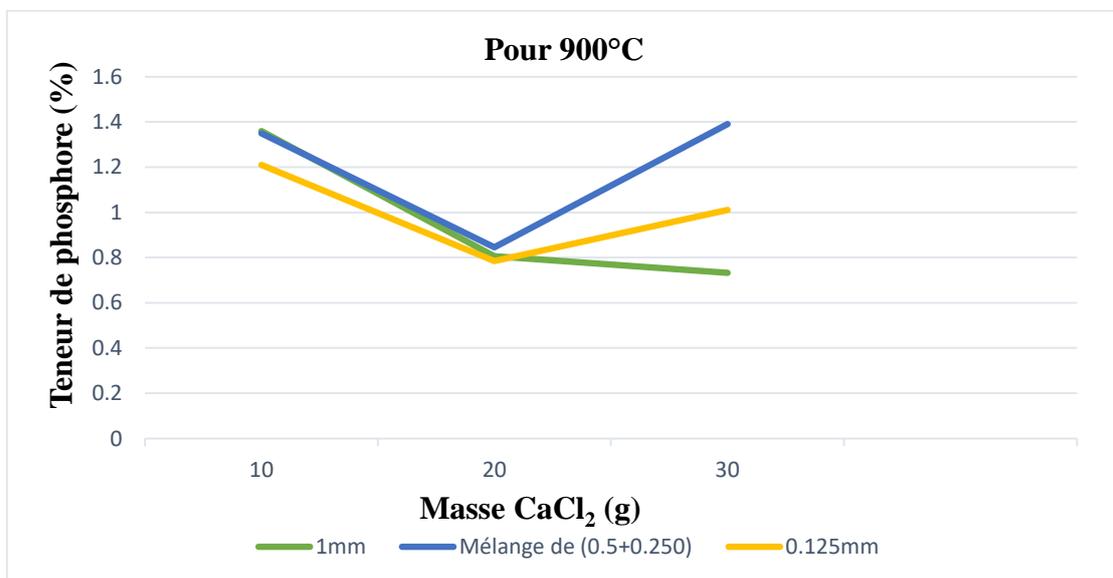
### B. Effet De La Distribution Granulométrique Sur La Réduction Du Phosphore

La granulométrie du minerai a un impact sur la qualité du minerai et sur la teneur en phosphore pendant la torréfaction. Pour mieux comprendre cet effet, nous avons varié le taux de CaCl<sub>2</sub> pour chaque classe granulométrique et après un grillage à 800°C, nous avons obtenu le graphe illustré dans VI.15 et la figure VI.16.



**Figure VI.15:** Effet de la granulométrie sur la réduction du phosphore pendant une torréfaction à 800°C.

Il ressort de la figure VI.15 que l'influence de la taille des particules sur la réduction du phosphore apparaît clairement dans l'échantillon (80% minerai et 20% CaCl<sub>2</sub>), où on peut constater que la fraction du mélange présente un taux de phosphore élevé qui correspond à une réduction minimale contrairement aux deux autres fractions où la teneur est plus basse ce qui signifie que la réduction est élevée.



**Figure VI.16:** Effet de la granulométrie sur la réduction du phosphore pendant la torréfaction à 900°C.

À une température plus élevée, les résultats ont montré que la taille des particules n'a aucune influence surtout dans l'échantillon (80% minerai et 20% CaCl<sub>2</sub>) où on peut voir la superposition des trois spectres. L'effet de la taille se distingue à l'échantillon (70% minerai et 30% CaCl<sub>2</sub>) où la tranche granulométrique grossière présente un taux de réduction le plus élevé.

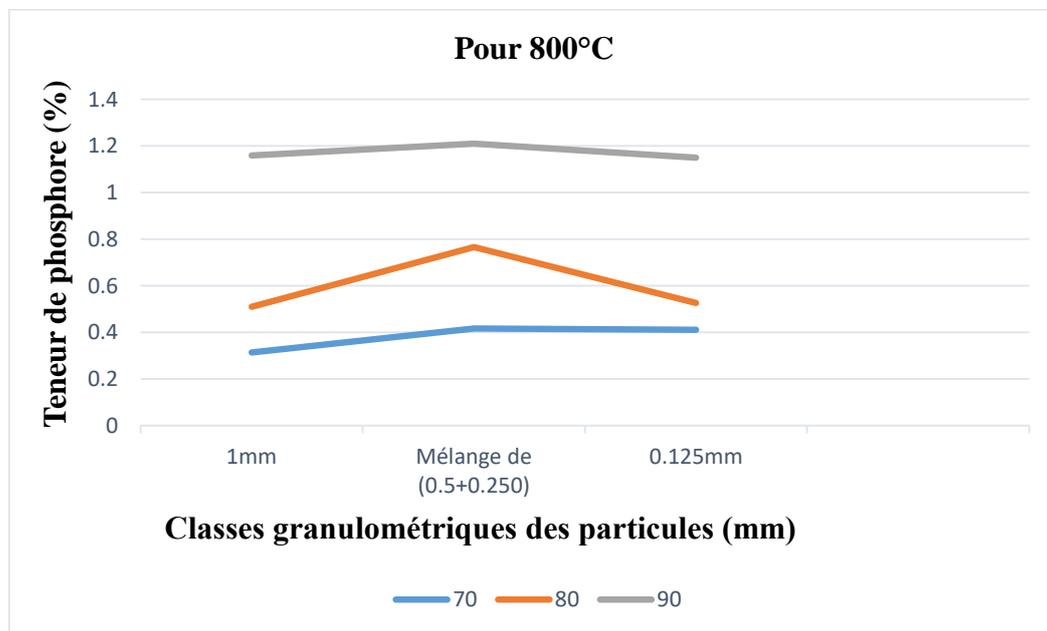
### C. Effet De L'additif $\text{CaCl}_2$ Sur La Teneur En Phosphore Dans Le Minerai De Fer

Le chlorure de calcium est utilisé comme additif en proportion avec le minerai de fer de Gara Djebilet. L'impact de cet effet est important puisqu' il contribue à la réduction du taux phosphore dans le concentré de fer.

Pour montrer l'effet de l'addition du chlorure de calcium dans le minerai de fer, nous avons préparé trois échantillons :

- ❖ Echantillon 1 composé de 70% de minerai et 30% de  $\text{CaCl}_2$
- ❖ Echantillon 2 composé de 80% de minerai et 20% de  $\text{CaCl}_2$
- ❖ Echantillon 3 composé de 90% de minerai et 10% de  $\text{CaCl}_2$

Après un grillage à  $800^\circ\text{C}$ , nous avons obtenu le graphe suivant :



**Figure VI.17:** Effet de l'additif  $\text{CaCl}_2$  sur la teneur en phosphore pendant la torréfaction du minerai de fer à  $800^\circ\text{C}$ .

Le chlorure de calcium utilisé comme ajout avec le minerai de fer de Gara Djebilet Avec un pourcentage de 10, 20, et 30% de la masse globale de l'échantillon, montre un effet Important sur la déphosphoration du minerai de fer. Le meilleur résultat est obtenu avec un Rapport de 30% de  $\text{CaCl}_2$  et de 70% de minerai de fer.

## Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre les effets de plusieurs paramètres sur la déphosphoration du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet, cela a nécessité la connaissance de la minéralogie du minerai brut ainsi que ses fractions granulométriques.

Les résultats de la DRX ont montré l'existence des phases minérales à base d'oxyde de fer tel que : l'hématite, la magnétite, et la goéthite.

Les traces de phosphore sont apparus dans la première trancha granulométrique sous forme de  $\text{CaP}_2\text{O}_6$ . Autres phases sont déterminées dans les autres fractions comme : chlorite ( $\text{Fe}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ), hydroxyde de fer  $\text{FeO}(\text{OH})$ , Alite  $\text{O}_{180}\text{Ca}_{108}\text{Si}_{36}$  20%, et 17%  $\text{Ca}_{54}\text{Si}_{18}\text{O}_{90}$ , et enfin la lime  $\text{CaO}$

Les résultats des analyses granulo-minéralogique des éléments majeurs du minerai de fer montrent que la teneur en phosphore de ces granulométries est équivalente. Alors que la teneur en phosphore est relativement faible. Ceci montre que le phosphore est libéré pendant le traitement mécanique.

L'analyse IR du minerai brut à plusieurs températures de grillage a révélé en plus du pic des groupements ( $1026 \text{ cm}^{-1}$ ), deux autres pics ( $820$  et  $1000 \text{ cm}^{-1}$ ) caractéristiques aux (hydr) oxydes de fer.

L'étude de la distribution granulométrique des particules de minerai de fer en fonction de la dose de  $\text{CaCl}_2$  dans différentes gammes granulométriques a montré que l'augmentation de la taille des particules a un effet sur la déphosphoration du minerai de fer. Les meilleurs résultats sont obtenus pour la gamme granulométrique de 1 mm.

. L'effet de la température sur le phosphore lors du grillage du minerai de fer de Gara Djebilet a été étudié. Les résultats montrent que lorsque la température est de l'ordre de  $800^\circ\text{C}$ , l'effet de déphosphoration est meilleur.

Concernant le pourcentage de l'additif alcalino-terreux ( $\text{CaCl}_2$ ) sur le phosphore, les résultats ont montrés que le meilleur résultat est obtenu avec une proportion de 30% de  $\text{CaCl}_2$  et 70% de minerai de fer.

# *Conclusion Générale*

## *Conclusion générale*

Le minerai de Gara Djebilet est un minerai sédimentaire oolithique qui existait dans l'exact Paléozoïque du Dévonien inférieur. Les oolites est un élément ferreux aurifère avec une matrice correspondant à la sidérite et à l'argile.

L'objectif de notre étude est la caractérisation du minerai brut (tout venant) en premier lieu et ensuite la maîtrise d'un procédé efficace pour éliminer le phosphore existant dans les échantillons à plusieurs classes granulométriques.

Les résultats de la DRX ont montré l'existence des phases minérales à base d'oxyde de fer tel que : l'hématite, la magnétite), et la goethite.

Les traces de phosphore sont apparus dans la première trancha granulométrique sous forme de  $\text{CaP}_2\text{O}_6$ . Autres phases sont déterminées dans les autres fractions comme : chlorite ( $\text{Fe}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ ), hydroxyde de fer  $\text{FeO}(\text{OH})$ , Alite  $\text{O}_{180}\text{Ca}_{108}\text{Si}_{36}$  20%, et 17%  $\text{Ca}_{54}\text{Si}_{18}\text{O}_{90}$ , et enfin la lime  $\text{CaO}$

L'analyse granulochimique obtenus par Différents types de tranches granulométriques sont testés (1 ; un mélange de (0,5 et 0,250) ; 0,125) mm montrent que la teneur en fer de ces granulométries est équivalente. Alors que la teneur en phosphore dans l'échantillon brut est relativement faible. Ceci montre que le phosphore est libéré pendant le traitement mécanique.

L'analyse IR du minerai brut à plusieurs températures de grillage a révélé en plus du pic des groupements ( $1026 \text{ cm}^{-1}$ ), deux autres pics ( $820$  et  $1000 \text{ cm}^{-1}$ ) caractéristiques aux (hydr) oxydes de fer.

L'étude de la distribution granulométrique des particules de minerai de fer en fonction de la dose de  $\text{CaCl}_2$  dans différentes gammes granulométriques a montré que l'augmentation de la taille des particules a un effet sur la déphosphoration du minerai de fer. Les meilleurs résultats sont obtenus pour la gamme granulométrique de 1 mm.

L'effet de la température sur le phosphore lors du grillage du minerai de fer de Gara Djebilet a été étudié. Les résultats montrent que lorsque la température est de l'ordre de  $800^\circ\text{C}$ , l'effet de déphosphoration est meilleur.

Concernant le pourcentage de l'additif alcalino-terreux ( $\text{CaCl}_2$ ) sur le phosphore, les résultats ont montrés que le meilleur résultat est obtenu avec une proportion de 30% de  $\text{CaCl}_2$  et 70% de minerai de fer.

En perspective, une étude métallo chimique est envisagée pour suivre la transformation des phases ainsi qu'un suivi de l'évolution du phosphore par une technique pointue très sensible aux éléments minoritaires comme l'activation neutronique est indispensable.

*Références  
Bibliographiques*

## *Références bibliographiques*

- [1] **MOUZAIA M.I., et DIAB H.**, Géodynamique et Minéralisation des Formations Paléoprotozoïques pour un Développement Durable SOMIFER-Spa Alger les 28 et 29 Octobre **2019** USTHB, Alger.
- [2] **Kennedy, B.A.** Surface Mining, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. 2nd Edition. pp. 48-60. **1990**. Port City Press. Baltimore, Maryland.
- [3] **P. SALESSE**. Élaboration et recyclage des métaux, Minerais et fondants, Technique de l'Ingénieur M 7 040. pp 1-2. **1989**.
- [4] **P.FERENCZI**, Iron ore, manganese and bauxite deposits of the Northern Territory. Northern Territory Geological Survey, Report 13,. pp. 13-41. **2001**. Government Printer of the Northern Territory, Darwin.
- [5] **Mineral Information Institute** "Iron ore - Hematite, Magnetite & Taconite". **2006**
- [6] **K. Harry, L.J. Harold, and G.E. Donald**, Iron, in United States Mineral Resources, US Geological Survey, Professional Paper 820, pp. 298-299. **1973**.
- [7] **L. BUBENICEK et al.** « FER - Minerais de fer », Encyclopédie Universalise. **2017**.
- [8] **D. Taylor, H.J. Dalstra, A.E. Harding, Broadbent G.C. and Barley M.E.** Genesis of high-grade hematite ore bodies of the Hamersley province, Western Australia. Economic Geology 96 (4). pp. 837-873. **2001**.
- [9] **W.A. Deer, R.A.Howie, J. Zussman.** An Introduction to the Rock-Forming Minerals, second ed. Longman Scientific and Technical, London, 696 p. **1992**
- [10] **Minerals Yearbook USGS**, Minerals Yearbook U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey IRON ORE, ADVANCE RELEASE. **2017**.
- [11] **USGS**, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey IRON ORE. **2014 et 2015**.
- [12] **A. GOSSELIN et al.** Protocole D'évaluation De La Traitabilité Des Sédiments, Des Sols Et Des Boues A L'aide Des Technologies Minéralurgiques. **1999**. SainteFoy, Canada.
- [13] **A. LAPPARENT**. Géologie des oolithes. p.65.**1886**.

## *Références bibliographiques*

- [14] **C.DURAND**. Industrie minière. Lorraine. p.15. **1893**
- [15] **J. DONAHUE**, Journal of sedimentary petrology, Jack Donahue, vol 39, N0, 4, P 1399.1411. FIGS 1-15 December 1969, Genesis of oolite and solite Graine , an energie INDEX. College of the city University of New York, Flushing, New York.
- [16] **J-B.PEREZ**, Notes sur les oolithes », Spéléo-Info Meurthe et Moselle no 33 Comité départemental de spéléologie de Meurthe-et-Moselle, Villers-lès-Nancy, p. 2-6. **2013**.
- [17] **C.PREVOT**, Les perles des cavernes du Spéleo-drome, Le P'tit Usania no 178 Union spéléologique de l'agglomération nancéienne, Nancy, p. 1-2.
- [18] **A.MESSAI**, Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Mines et Environnement Option Valorisation des Ressources Minérales et Environnement université Badji Mokhtar-Annaba Faculté des Sciences de la Terre **2019**.
- [19] **S.A.ELMQUIST**, R.H. BEHRENDT, Autogenous Mill Capacity Improvement at Hibbing Taconite Company, 67th AIME Proceeding, Minnesota Section, Duluth. **1994**
- [20] **L.H.HOWARD** (ed), 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. **1987**
- [21] **R. M.CORNELL**, **U.SCHWERTMANN**, The iron oxides, structure, properties, reactions, occurrences and uses. John Wiley and Sons. 2nd Edition. **2003**
- [22] **BERSI, M., SAIBI, H., &CHABOU, M. C. (2016)**. Aerogravity and remote sensing observations of an iron deposit in Gara Djebilet, southwestern Algeria. Journal of African Earth Sciences, 116, 134-150.
- [23] **SCHLUMBERGER**, et **SONATRACH**, Well Evaluation Conference Algeria. Éd. Schlumberger, pp.63-68. **2007**
- [24] **FABRE, J., 2005**.Géologie du Sahara occidental et central. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren.

## *Références bibliographiques*

- [25] **Rémi LEPRETRE-Evolution** phanérozoïque du Craton Ouest Africain et de ses bordures Nord et Ouest-Thèse de Doctorat- Université Paris-sud/ÉCOLE DOCTORALE : MIPEGE 534 -UMR 8148 GEOPS \*Sciences de l'Univers/2015.
- [26] **B.BESSOLES**, Géologie de l'Afrique Le craton ouest-africain. Mémoires BRGM, 88 Paris. 1977.
- [27] **Rapport final** sur les travaux de prospection géophysique par sev réalisés dans le grand bassin de Tindouf (zone de Gara Djebilet) fevrier2019-ORGM Spa.
- [28] **M C.CHABOU**, Etude Pétrographique et Géochimique du Magmatisme Mésozoïque de l'ouest de la Plate-forme Saharienne. Mémoire de Magister, 2001.ENSP, Alger.
- [29] **R. LEPRETRE**. Evolution phanérozoïque du Craton Ouest Africain et de ses bordures Nord et Ouest-Thèse de Doctorat- Université Paris-sud/ÉCOLE DOCTORALE : MIPEGE 534 -UMR 8148 GEOPS \*Sciences de l'Univers/2015.
- [30] **M.BERSI**, 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. Volcanologie. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène. 2016.
- [31] **Y AICHI, A . ZAOU, A .,&BEN ADLA, M.( 2016 )**. Etude litho-stratigraphique et sédimentologie du dévonien inférieur -dévonien moyen D'OuedTalha (Tindouf) (Mémoire de Master, Université de Tlemcen).
- [32] **Mouley Charaf Chabou**-Etude pétrographique et géochimique du magmatisme mésozoïque de l'uest de la plate-forme saharienne- Mémoire de Magister en Génie minier - ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE-2001.
- [33] **A.CORNET**, Introduction à l'Hydrogéologie du Sahara, Algérie', Revue Géographie Physique et de Géologie Dynamique, Vol. 6, N°1, pp. 5 – 72. 1964.
- [34] **ALGERIE-FOCUS.**, Gara Djebilet, /WP-Content/Uploadas//Gara-Djebilet. ANAM, Carte géologique de la bordure sud du bassin de Tindouf et localisation du gisement de fer. Gara Djebilet. 2013.
- [35] **MAGAZINE ZOOM** N°6 Avril 2008.

## *Références bibliographiques*

- [36] **FERRAL**. Projet de Traitement du minerai de Gara Djebilet 2015.
- [37] **FERAAL Spa** Document de Société Nationale du Fer et de l'Acier.
- [38] **BOUCIF, A1 ., KHERAIF ,S2 ., ATOUI ,L3 .(2007 )**.Pelletisation du minerai de fer de gara djebilet destine à alimenter le haut fourneau. (Revue Synthèse N° 16, Laboratoire de métallurgie et génie des matériaux, Université Badji Mokhtar – Annaba).
- [39] **M. Migueland, S. Aranguren**. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique, en vue de l'obtention du Doctorat de l'université de TOULOUSE, pp 489. **2008**.
- [40] **S. Achour, W. Alouane**. "Optimisation des paramètres de l'extraction de l'or par cyanuration – cas de la mine d'Amesmess". Mémoire de master. Université de Bejaia.**2016**.
- [41] **J. L .Pineau**. Application des techniques séparatives à l'échantillonnage des solides à faibles teneurs en vrac, Les techniques-Mines et Carrières. **1996**
- [42] **A. Gosselin, Blackburn, M. Bergeron**. Protocole d'évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l'aide des technologies minéralurgiques. **1999**.
- [43] **Bureau européen pour la PRIP.**, Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la gestion des résidus et stériles des activités minières. pp 632. **2004**.
- [44] **DIN**, Analyses sur les oxydes et les matériaux bruts, Bases générales de travail pour la méthode de fluorescence XRF, Novembre **2011**.
- [45] **R.GOUT, F.SOUBIES**, Sur le problème de la reconnaissance des oxydes de fer amorphes dans les sols. Centre ORSTOM, Adiopodoume, 4 p. multigr. **1972**.
- [46] **L. E. Lagoeiro**, Journal of Metamorphic Geology 16(3):415 - 423. **2014**.
- [47] **S. Meillon**. Etude des nouvelles propriétés de la magnétite et de l'hématite après transformation par irradiation et par mecanosynthese. Rapport CEA/Saclay. **1996**.

## *Références bibliographiques*

[48] **A. Davantes.** Apport de la spectroscopie infra-rouge in situ à l'étude des réactions de complexation à l'interface solide/solution. Chimie analytique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, **2015**.

[49] **Trainor, T. P. ; Chaka, A. M. ; Eng, P. J. ; Newville, M. ; Waychunas, G. A. ; Catalano, J.G. ; Brown Jr., G. E.** Structure and Reactivity of the Hydrated Hematite (0 0 0 1) Surface. *Surface Sci.*, 573 (2), 204–224. **2004**

# *Annexes*

## Résultats De L'analyse FX

Les résultats des essais de traitement du minerai de fer de Gara Djebilet –Tindouf réalisés sont montrés sur le tableau. On observe que le fer et le phosphore

**Tableau : Résultats d'analyse granulo-mineralogique du minerai de fer de Gara Djebilet**

Classes granulométriques des particules, (mm)	Valeur							
	Teneur de fer (%)	Teneur de phosphore (%)	Masse CaCl <sub>2</sub> (g)	Masse de fer (g)	Température °C	Temps	Teneur de fer (%)	Teneur de phosphore (%)
<b>1</b>	84,5	1.21	30	70	800	1h30	43,8	0,314
			20	80	800		54,0	0,510
			10	90	800		76,7	1,16
			30	70	900		55,4	0,733
			20	80	900		57,6	0,806
			10	90	900		78,7	1,36
<b>Mélange de (0,5+0,250)</b>	85,0	1.27	30	70	800	1h30	49,4	0,417
			20	80	800		61,8	0,766
			10	90	800		74,0	1,21
			30	70	900		68,3	1,39
			20	80	900		58,4	0,845
			10	90	900		77,5	1,35
<b>0,125</b>	85,1	1.12	30	70	800	1h30	46,8	0,411
			20	80	800		57,5	0,527
			10	90	800		75,3	1,15
			30	70	900		62,8	1,01
			20	80	900		60,4	0,785
			10	90	900		77,2	1,21
<b>échantillon brut</b>	87,5	0.672			800	1h30	84,1	1,22
					900		84,7	1,26

## **Résumé**

Le gisement de fer de Gara Djebilet est un gisement riche en minerai de fer oolithique, avec une réserve récupérable d'environ 1,7 milliard de tonnes et une teneur en fer de 57 %. C'est l'un des plus grands gisements au monde. Cependant, son exploitation est très difficile car son minerai de fer ne remplit pas les conditions nécessaires à l'industrie sidérurgique (forte teneur en phosphore, topographie, situation géographique et infrastructures de sécurité insuffisantes).

Une étude sur la caractérisation physico-chimique et minéralogique est menée sur des échantillons représentatifs prélevés sur le site. Les analyses sont portées sur la fluorescence X (FX), Diffraction à Rayons X et Infrarouge (IR). Cette étude a un but de réduire la présence du phosphore dans le minerai de fer et améliorer la qualité du concentré pour son utilisation dans l'industrie sidérurgique.

Les résultats obtenus sont de grande importance en termes de teneur en phosphore, en utilisant le procédé de torréfaction par  $\text{CaCl}_2$ . Ce dernier est réalisé dans différentes conditions expérimentales. Les résultats obtenus montrent qu'à une concentration de 30 g de  $\text{CaCl}_2$  et 70 g de minerai de fer et à une température de  $800^\circ\text{C}$ , le taux de réduction de phosphore à une granulométrie de 1 mm est maximal.

**Mots clés** : Gara Djebilet, minerai de fer oolithique, phosphore, grillage.

## **Abstract**

The Gara Djebilet iron ore deposit is a deposit rich in oolitic iron ore, with a recoverable reserve of about 1.7 billion tons and an iron content of 57%. It is one of the largest deposits in the world. However, its mining is very difficult because its iron ore does not meet the steel conditions necessary for industrial use (high phosphorus content, topography, geographic location and insufficient infrastructure).

Characterization is carried out in representative samples taken from Gara Djebilet including techniques of X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD) and Infrared (IR). This study aims to reduce the presence of phosphorus in the iron ore and to improve the quality of the concentrate for its use in the steel industry

In order to reduce the phosphorus content in iron ore, Improve the quality of concentrates used in the iron and steel industry, perform physical and chemical characterization of samples. The results obtained by this method with different experimental conditions. The better results are obtained with a roasting temperature at  $800^\circ\text{C}$  and a concentration of 30g of  $\text{CaCl}_2$  and 70g of iron ore.

**Keywords**: Gara Djebilet, Oolitic iron ore, phosphorus, roasting.