

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA  
BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté des Sciences de la Terre

Département des Mines

## **T H E S E**

Présentée par

BADJOU DJ Salem

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences -Mines  
Option: Valorisation et Gestion des Ressources Minérales

### **Caractérisation physico-chimique et traitement du minerai de fer du gisement de Gara – Djebilet – Tindouf**

Devant le jury:

Président : BOUNOUALA Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar – Annaba
Rapporteur : IDRES Abdelaziz	Pr	Université Badji Mokhtar – Annaba
Examineur: CHETTIBI Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar – Annaba
Examineur: BEZZI Nacer	Pr	Université A. Mira – Béjaia
Examineur: BARKA Fatiha	M.C.A	Université A. Mira – Béjaia
Examineur: BORDJIBA Tarek	M.C.A	Université 08 Mai 1945 – Guelma

**Année: 2018**

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

*(Sénèque)*

## **DEDICACES**

Je dédie ce modeste travail de thèse de Doctorat en Mines à ma petite famille:

À mes parents

À ma femme

À mes enfants

Et à mes amis

## REMERCIEMENTS

On dit souvent que l'itinéraire est aussi important que la destination. Ces années de Doctorat m'ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple. En effet, ce parcours ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses ont nécessité de longues heures de labeur.

Tout d'abord, je tiens à remercier le Professeur **IDRES Abdelaziz**, Directeur de thèse pour ses précieux conseils et aides scientifiques, qu'il a bien voulu m'en prodiguer. Je remercie vivement le Professeur **BOUNOUALA Mohamed**, de l'université Badji – Mokhtar-Annaba d'avoir bien voulu présider le jury de soutenance de thèse. Mes vifs remerciements et reconnaissances aux membres de jury de soutenance d'avoir accepté l'examen de la présente thèse de doctorat en Mines, le Professeur **CHETTIBI Mohamed** de l'université Badji – Mokhtar-Annaba, le Professeur **BEZZI Nacer** de l'université Abderrahmane Mira – Béjaïa, le Docteur **BORDJIBA Tarek** Maître de conférences à l'université 8 Mai 1945-Guelma, Docteur **BARKA Fatima** Maître de conférences Abderrahmane Mira – Béjaïa, Docteur **BABOU CHIRAZ Abdelmalek** (membre invitée), Maître de conférences à l'université El-Manar. Tunis pour son acceptation d'être un membre invité.

Je rends un majestueux hommage au travail d'encadrement et aux qualités humaines et scientifiques de mes collègues dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne m'ont jamais fait défaut. Je voudrais exprimer mes sincères reconnaissances envers les Professeurs **BOUHEDJA A.**, **BOUKELLOUL M. L.** pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet

Mes remerciements s'adressent également aux Professeurs **MOSTIKA Yuriy**, **RUDAKOV Dimetry** et **KLIMKINA Iryna**, l'Université des mines, Dnipro, Ukraine, Dr **BEN SELHOUB Aissa**, de l'Université d'Etat Agronomique et Economique de Dnipropetrovsk UKRAINE, ainsi que le Professeur en pétrographie Pr **PAVEL** de l'université d'Ekaterinbourg RUSSIE pour leurs contributions et leurs aides pour la réalisation de cette thèse.

Je voudrais aussi remercier, et de façon très particulière, une personne qui m'a aidée et qui est à mes yeux inestimable. **M ALIMERIA Abdenour**, responsable en Géologie du bureau d'étude **FERAAL**, chargé du projet du gisement de Gara Djebilet.

Mes vifs remerciements à l'équipe du laboratoire de ressources Minérales et environnement de l'université d'El-Manar- Tunis en particulier Pr **CHAABANI Fredj**, Pr **GHANMI M**, Dr **ABDELMALEK Chiraz** et Dr **LOUNIS Anouar** de m'avoir donné énormément de conseil à propos de mon sujet.

## RESUME

En l'absence d'une étude approfondie du traitement du gisement de minerai de fer oolitique de Gara Djebilet d'une part en raison des caractéristiques chimiques minéralogiques complexes et d'autre part la situation géographique et climatique de la région sont très difficile.

Dans un but de réduire la présence du  $P_2O_5$  dans le minerai de fer et améliorer la qualité du concentré pour son utilisation dans l'industrie sidérurgique, des échantillons sont soumis à une caractérisation physico-chimique. Pour se faire, des techniques d'analyses ont été utilisées telles que la diffraction à rayons X, la microscopie électronique à balayage, la spectrophotométrie d'absorption atomique et enfin une analyse granulochimique

Les résultats obtenus par cette méthode sont très encourageants et importants en termes de récupération et de teneur en phosphore. En procédant à la torréfaction. En outre, ce processus est effectué dans différentes conditions expérimentales, les paramètres de torréfaction étudiés liés à la concentration de chlorure de calcium pour le minerai de fer, la taille des particules de minerai de fer, la température de torréfaction.

Les résultats obtenus par le chlorure de calcium sont très encourageants et ils présentent une meilleure réduction du  $P_2O_5$  pour une granulométrie  $- 0.063 + 0.045\text{mm}$  avec une concentration 20g du  $CaCl_2$  et 80g de minerai de fer et une température de  $800^\circ\text{C}$ .

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

## ملخص

ففي غياب دراسة تفصيلية عن معالجة مكمن الحديد غار جبيلا، من جهة بسبب الخصائص الكيميائية المعدنية المعقدة ، ومن جهة أخرى تواجهه ضمن تضاريس جغرافية ومناخية نوعية.

من أجل الحد من وجود  $P_2O_5$  في خام الحديد وتحسين جودة التركيز لاستخدامها في صناعة الحديد والصلب ، وتخضع العينات لتوصيف الفيزيوكيميائية. للقيام بذلك ، تم استخدام تقنيات تحليلية مثل حيود الأشعة السينية ، المجهر الإلكتروني الماسح الضوئي ، طيف الامتصاص الذري وأخيرًا التحليل التحليلي الكيميائي.

إن النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة هذه الطريقة مشجعة وهامة جدا من حيث الاسترجاع ومحتوى الفسفور. من قبل عملية التحميص. وبالإضافة إلى ذلك، يتم تنفيذ هذه العملية في ظل ظروف تجريبية مختلفة؛ معلمات التحميص درس تتعلق تركيز كلوريد الكالسيوم بالنسبة لخام الحديد، وحجم الجسيمات من خام الحديد، ودرجة حرارة التحميص.

والنتائج التي تم الحصول عليها من كلوريد الكالسيوم مشجعة جدا، وأنها تظهر تخفيض أفضل من  $P_2O_5$  لحجم الجسيمات - 0.045 + 0.063 مم مع تركيز 20 غرام من  $CaCl_2$  و 80 غرام من خام الحديد ودرجة حرارة 800 درجة مئوية

كلمات البحث : غار جبيلا، خام الحديد، اوليتيكي، فسفوري،تحميص .

## ABSTRACT

In the absence of a detailed treatment study of the oolitic iron ore from Gara Djebilet deposit on the one hand due to the complex mineralogical chemical characteristics and on the other hand the geographic and climatic situation of the region, are very difficult.

In order to reduce the presence of  $P_2O_5$  in the iron ore and to improve the quality of the concentrate for its use in the steel industry, samples are subjected to physicochemical characterization. To do this, analysis techniques were used, such as X-ray diffraction, scanning electron microscopy, atomic absorption spectrophotometry and finally a chemical particle size analysis.

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

The results obtained by calcium chloride are very encouraging and they show a better reduction of  $P_2O_5$  for a particle size -  $0.063 + 0.045\text{mm}$  with a 20g concentration of  $CaCl_2$  and 80g of iron ore and a temperature of  $800^\circ\text{C}$ .

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

## TABLE DES MATIERES

---

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
ملخص.....	IV
Abstract.....	V
Avant propos.....	VI
Table des matières.....	VII
Abréviations et symboles.....	VIII
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	X
Introduction.....	1
<b>Chapitre I SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE MINERAI DE FER OOLITHIQUE.....</b>	<b>3</b>
I.1. Généralités sur les minerais de fer.....	3
I.2. Types de minerais de fer.....	3
I.3. Origine du fer oolithique.....	6
I.3.1. Caractéristiques du fer oolithique.....	7
I.3.2. Formation d'oolithe.....	7
I.4. Demande en minerai de fer dans le monde.....	8
I.5. Production de minerai de fer.....	9
I.5.1. Production mondiale de minerai de fer.....	9
I.5.2. Pays producteurs de minerai de fer.....	10
I.6. Minerais de fer en Algérie.....	11
I.6.1. Situation actuelle et perspective.....	11
I.6.2. Production du minerai de fer en Algérie.....	11
I.7. Marché du minerai de fer.....	12
I.7.1. Révision des prix.....	12
I.8. Synthèse des Travaux de recherche sur le minerai de fer Oolithique.....	13
I.8.1. Etudes antérieures (Sonarem Avant 1980).....	13
I.8.1.1. Essais Irsid (1961).....	13
I.8.1.2. Essais Irsid (1964).....	14
I.8.1.3. Essais Irsid (1977).....	15
I.8.1.5. Essais Krupp (1966).....	16
I.8.1.6. Bureau d'étude de valorisation minérale Prague (1967).....	16
I.8.2. Travaux réalisés après 1980 (Sider).....	17
I.8.2.1. Essais Hylsa 1986 (Mexique).....	18

I.8.2.1.1 Valorisation du minerai de fer de Gara Djebilet par la filière réduction directe four électrique à arc .....	18
I.8.2.1.2 Procédures des essais de fusion .....	20
I.8.2.2 bureau d'étude de valorisation minérale (Allemagne - 1988) .....	20
I.8.2.3 Essais de valorisation par le procédé SNS-KAISER .....	21
I.8.3 Travaux Et Etudes Récents (SONATRACH) .....	22
I.8.3.1 Etude de RIO TINTO (2006-2007) .....	22
I.8.3.2 Etude de CORUS (2008) .....	23
I.8.3.3 Etude de KIGAM (2008) .....	26
I.8.4 Etude réalisée par l'institut de recherche des mines et métallurgie de chine (CHANGSHA) .....	26
I.9 Etude de recherche sur le minerai de Fer Oolithique .....	29
<b>Chapitre II GEOLOGIE ET MINERALISATION DU GISEMENT DE GARA DJEBILET</b> .....	<b>36</b>
II.1. Présentation générale.....	36
II.1.1. Domaines géologiques.....	36
II.2. Situation géographique du bassin de Tindouf.....	39
II.3. Stratigraphie et tectonique.....	40
II.3.1. Aperçu stratigraphique.....	40
II. 4. Minéralisation du bassin de Tindouf.....	45
II.4.1. Gisement de Gara Djebilet.....	45
II.4.2. Gisement de Mechri Abdel-Aziz.....	46
II.4.3. Structure du bassin.....	49
II.5. Evolution géodynamique du bassin.....	50
II.5.1. Orogenèse Panafricaine .....	50
II.5.2. Compression Taconique (Caradocien) .....	50
II.5.3. Compression Calédonienne .....	50
II.5.4. Mouvements Hercyniens Majeurs .....	50
II.6. Présentation du gisement .....	53
II.7.Réserves .....	54
II.8. Géologie et minéralisation du gisement.....	55
II.8.1. Géologie du gisement de Gara Djebilet.....	55
II.8. 2. Minéralisation du gisement de Gara Djebilet Tindouf .....	56
II.9. Caractéristiques du minerai de fer du Gara Djebilet Tindouf.....	56
II.9.1. Caractéristiques minéralogiques du minerai de fer de Gara Djebilet.....	57
II.10. Caractéristiques physiques.....	58

<b>CHAPITRE III CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU MINERAI DE FER DE GARA DJEBILET .....</b>	<b>60</b>
III.1 Introduction .....	60
III. 2 Echantillonnage .....	61
III.3 Analyse Granulométrique .....	61
III.3.1 Analyse granulométrique par tamisage .....	63
III.4 Analyse des échantillons Par DRX .....	67
III.5 Observation microscopique des Echantillons .....	71
<b>CHAPITRE IV : TRAITEMENT DU MINERAI DE FER DU GISEMENT DE GARA DJEBILET – TINDOUF .....</b>	<b>78</b>
IV. 1 Aperçu sur la valorisation des minerais .....	78
IV. 1 .1 Définition .....	78
IV.1.2 Contraintes extérieures .....	78
IV.1.2.1 Le minerai .....	78
IV.1.2.2 Contexte économique .....	
IV.1.2.3 Ecologie du site .....	79
IV.1.2.4 Conditions de vente des produits .....	80
IV.1.2.5 Méthodologie de la valorisation .....	80
IV.1.3 Techniques de recherche en valorisation .....	81
IV.1.3. 1 Moyens à mettre en œuvre .....	84
IV.1.3. 1.1 Etude des cibles .....	84
IV.2. Travaux de recherches antérieures sur les procédés de traitement de fer de Gara Djebilet .....	88
IV. 3 Bibliographie des minerais de fer Oolithique récente .....	89
V. 3. 1 Introduction .....	89
IV. 3. 2 Situation du minerai de fer de Gara Djebilet .....	91
IV. 3. 3 Matériels et méthode .....	92
IV. 3. 3.1 Collecte et caractérisation des échantillons .....	92
IV. 4 Etude des paramètres influant sur la qualité du produit .....	94
IV. 4. 1 Effet de la distribution granulométrique sur la réduction du phosphore .....	94
IV. 4. 2 Effet de la température sur la teneur en phosphore du minerai de fer .....	95
IV. 4. 3 Effet de l'additif CaCl <sub>2</sub> sur la teneur en phosphore dans le minerai de fer ....	96
IV. 5 Résultats et arguments .....	96
Conclusion générale .....	99
Références bibliographiques.....	101

## LISTE DES ACRONYMES

---

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>LAVAMINE</b>	Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement
<b>LN</b>	Observations en lumière naturelle
<b>LP</b>	Observations en lumière polarisée
<b>Kg</b>	Kilogramme
<b>FOB</b>	Free on board
<b>CIF</b>	Cost, insurance, freight
<b>MM</b>	Millimètres
<b>EPA</b>	Environmental Protection Agency
<b>Ip</b>	Indice de basicité
<b>Ig</b>	Indice de basicité globale
<b>%</b>	Pourcentage
<b>µm</b>	Micromètre
<b>G</b>	Gramme
<b>UTM</b>	Système Lambert converti (Nord Sahara 1959, zone 31)
<b>GPS</b>	Global Position System
<b>DRX</b>	Diffraction des Rayons X
<b>AFNOR</b>	Association Française de Normalisation
<b>t/j</b>	Tonne par jour
<b>km</b>	Kilomètre
<b>Nm</b>	Nano mètre
<b>FERPHOS</b>	Entreprise nationale de fer et de phosphate.
<b>ORGM</b>	Office national de la recherche géologique et minière.
<b>EREM</b>	Entreprise nationale de recherche minière.
<b>EDX</b>	Spectroscopie aux rayons X dispersive d'énergie
<b>M</b>	Mètre
<b>D</b>	Diamètre (m)
<b>ONS</b>	Office national de la statistique
<b>HSD</b>	Honestely significant differences
<b>PRIP</b>	Prévention et réduction intégrées de la pollution
<b>BEPRIP</b>	Bureau européen de la prévention et de la réduction intégrée de la pollution

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure I.1.</b> Minerai d'hématite spéculaire.....	03
<b>Figure I. 2:</b> Minerai de limonite jaune.....	04
<b>Figure I. 3:</b> Minerai de goethite.....	04
<b>Figure I.4:</b> Minerai d'ilménite.....	05
<b>Figure I.5:</b> Minerai de magnétite.....	05
<b>Figure I.6:</b> Minerai de pyrite.....	06
<b>Figure I. 7:</b> Minerai de sidérite.....	06
<b>Figure I.8. :</b> Filières Métallurgiques de valorisation du minerai Gara Djebilet.....	17
<b>Figure I.9.</b> Séparation magnétique à voie sèche du minerai en morceaux (- 3 mm)	24
<b>Figure I.10.</b> Séparation magnétique à voie sèche du minerai en morceaux (-100 µm)	24
<b>Figure II.1.</b> Carte géologique de l'Algérie (A. Cornet, 1964).....	37
<b>Figure II.2.</b> Les bassins les plus importants de la plate-forme saharienne en Algérie. (Carte SONATRACH, Division Exploration) .....	38
<b>Figure II.3.</b> Coupe géologique structurale Nord-Sud du bassin de Tindouf, (Guiraud, 1975).....	39
<b>Figure II.4.</b> Carte de situation géologique des bassins de la province occidentale (WEC 2008) .....	40
<b>Figure II.5.a.</b> Lithostratigraphie du bassin de Tindouf, (Aliev et al. 1971; Fabre, 1976)..	47
<b>Figure II.5.b.</b> Lithostratigraphie du bassin de Tindouf, (Aliev et al. 1971; Fabre, 1976).....	48
<b>Figure II.6.</b> Carte des principaux éléments structuraux du bassin de Tindouf. (Aliev et al. 1971; Chabou. M.C, 2008). .....	49
<b>Figure II.7.</b> Coupe stratigraphique E-W de la région du flanc sud du bassin de Tindouf. (Chabou. M.C, 2008). .....	51
<b>Figure II.8.</b> Coupe stratigraphique N-S de la partie occidentale du bassin de Tindouf. (Chabou. M.C, 200). .....	51
<b>Figure II.9.</b> Vue générale du gisement de fer, Gara Djebilet, (Algérie-Focus. 2013/12).....	54
<b>Figure II.10.</b> Situation géographique du gisement de Gara Djebilet, (Bersi, M., 2016).....	54
<b>Figure II.11.</b> Carte géologique de la bordure sud du bassin de Tindouf et localisation du gisement de fer. Gara Djebilet. (Site web, ANAM).....	56
<b>Figure II.12.</b> Analyse par DRX de l'échantillon représentatif du minerai de fer de gisement de Gara Djebilet – Tindouf.....	57
<b>Figure III.1.</b> Protocole de caractérisation du Minerai de fer de Gara Djebilet.....	60
<b>Figure III. 2.</b> Diviseur de précision à riffle Jones.....	62
<b>Figure III. 3.</b> Tamiseuse.....	63
<b>Figure III. 4.</b> Tamis.....	63
<b>Figure III. 5.</b> Série de Tamis.....	63
<b>Figure III. 6.</b> Balance de précision.....	64
<b>Figure III.7.</b> Courbe Granulométrique.....	65

<b>Figure III.8.</b> Evolution de la teneur en Fer .....	66
<b>Figure III.9.</b> Analyse par DRX de l'échantillon initial.....	67
<b>Figure III. 10.</b> Analyse par DRX de la fraction >2 mm.....	68
<b>Figure III.11.</b> Analyse par DRX de la fraction +2-1 mm.....	68
<b>Figure III. 12.</b> Analyse par DRX de la fraction -1+0,5 mm.....	69
<b>Figure III.13.</b> Analyse par DRX de la fraction -0,5 +0,250 mm.....	69
<b>Figure III.14.</b> Analyse par DRX de la fraction -0,250 +0,125 mm.....	70
<b>Figure III.15.</b> Analyse par DRX de la fraction -0,125 +0,63 mm.....	70
<b>Observation de l'échantillon par lame mince</b>	
<b>Figure III.16 ÷ Figure III.17</b> Observation microscopique d'échantillon 1.....	71
<b>Figure III.18</b> Observation microscopique d'échantillon 2.....	72
<b>Figure III.19 ÷ Figure III. 21</b> .....	72
<b>Figure III. 24 ÷ Figure III 27</b> .....	73
<b>Figure III. 28 ÷ Figure III 29</b> .....	74
<b>Observation microscopique des sections polies</b>	
<b>Figure III. 22 ÷ Figure III 23</b> .....	72
<b>Figure III. 30 ÷ Figure III 33</b> .....	74
<b>Figure III.34.</b> Observation par MEB du minerai de fer de Gara Djebilet (3000x).....	75
<b>Figure III.35.</b> Observation par MEB du minerai de fer de Gara Djebilet (400x).....	75
<b>Figure III.36.</b> Spectre du MEB .....	76
<b>Figure IV. 1</b> Schéma simplifié d'un procédé de valorisation du minerai.....	78
<b>Figure IV.2.</b> Classification difficultés rencontrées dans un procédé de traitement minéralurgique.....	82
<b>Figure IV.3.</b> Opérations unitaires de la minéralurgie.....	83
<b>Figure IV.4.</b> Travaux nécessaires à la conception d'un schéma de traitement.....	86
<b>Figure IV.5.</b> Travaux nécessaires à la conception d'une usine de traitement.....	87
<b>Figure IV.6.</b> Echantillon brut de minerai de fer de Gara Djebilet.....	92
<b>Figure IV.7.</b> Four de laboratoire Naberterm température maximale 1100°C.....	94
<b>Figure IV.8.</b> Effet de la granulométrie sur le phosphore pendant la torréfaction.....	95
<b>Figure IV.9.</b> Effet de la température sur le phosphore pendant la torréfaction du minerai de fer.....	95
<b>Figure IV.10.</b> Effet de l'additif CaCl <sub>2</sub> sur la teneur en phosphore dans le minerai de fer.....	96

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau I. 1</b> Production mondiale de minerai de fer de quelques pays en millions de tonnes métrique .....	10
<b>Tableau I.2</b> Résultats des essais de grillage magnétique.....	13
<b>Tableau. I.3</b> Propriétés physiques du minerai de fer de Gara Djebilet .....	19
<b>Tableau I.4</b> Résultats des essais séparation magnétique par voie humide et sèche.....	25
<b>Tableau I.5</b> Composition chimique du bureau d'étude Coréen KIGAM.....	26
<b>Tableau I.6</b> Composition minéralogique du minerai de fer de Gara Djebilet (CITIC)	27
<b>Tableau I.7</b> Composition chimique du minerai de fer de Gara Djebilet.....	27
<b>Tableau I.8</b> Composition chimique du minerai enrichie par SMBI.....	28
<b>Tableau II.1</b> Composition minéralogique du minerai de Gara Djebilet .....	58
<b>Tableau III.1</b> Résultats d'analyse granulométrique.....	65
<b>Tableau III.2</b> Résultats d'analyse granulochimique des éléments majeurs du minerai de fer de Gara Djebilet par FX.....	66
<b>Tableau III.3</b> Résultats quantitatifs de l'observation par MEB.....	76
<b>Tableau IV.1</b> Résultats granulochimique des éléments majeurs du minerai de Fer de Gara Djebilet par fluorescence X .....	93
<b>Tableau IV.2</b> Résultats des essais de Traitement du minerai de fer de Gara Djebilet – Tindouf.....	97

## AVANT-PROPOS

### Principaux objectifs

- Contribution au Développement d'un procédé de traitement du minerai pour son enrichissement et sa déphosphoration
- Proposer de nouvelles solutions

À 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. Ils peuvent être classés en 4 catégories :

Procédés d'enrichissement : séparation gravimétrique - calcination réductrice – séparation magnétique basse et haute intensité, flottation.

Procédés de déphosphoration:

- Calcination avec « agents déphosphorant » suivi de Flottation ou lixiviation
  - Procédé de réduction directe avec agent « déphosphorant » suivi de séparation magnétique. ·
- Autres techniques contribuant à la dislocation des oolithes non encore développées : ultrasons, microondes.

### Impacts attendus

**Sur le plan scientifique,** la recherche est orientée vers le développement de nouvelles procédures innovantes et efficaces pour éliminer le phosphore et enrichir le minerai en fer avec une approche interinstitutionnelle et pluridisciplinaire permettant le renforcement mutuel des capacités et la mutualisation des moyens existants via une collaboration solide ;

**Sur le plan technique,** Le développement et la maîtrise de nouveaux procédés efficaces pour éliminer le phosphore et enrichir le minerai en fer permettrait d'acquérir une autosuffisance et une liberté d'action sur le plan technique assurée par des compétences purement nationales ;

**Sur le plan économique,** l'enjeu est également important, car le minerai enrichi en fer et débarrassé de son phosphore, peut être utilisé par les industries sidérurgiques algériennes et exporté à l'étranger. L'impact est énorme sur l'économie de notre pays ;

**Sur le plan socio-économique,** l'impact est considérable, car un minerai de très bonne qualité avec un coût moindre sera disponible en abondance. Aussi, le développement socio-économique de plusieurs régions (Gara Djebilet – Tindouf – Bechar – Saïda – Oran) est attendu en tant que conséquence et objectif de la mise en exploitation du gisement de Gara Djebilet. La réussite du projet fera notamment rehausser l'employabilité des diplômés de la région.

## INTRODUCTION GENERALE

Devant l'augmentation de la demande de minerai de fer et la croissance régulière de la production d'acier dans le monde depuis 1999, et l'accélération de la consommation et de la demande mondiale à partir de 2010, le Ministère de l'Energie et des Mines et l'Agence Nationale du Patrimoine Minier lancent un appel à manifestation d'intérêt pour le développement et la mise en valeur des gisements de fer de Gara Djebilet et Mechri Abdelaziz.

Le minerai de fer de Gara Djebilet a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des divers bureaux d'études, avec des résultats différents.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de procédé industriel fiable et clair 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.

Mis à part les expéditions expérimentales occasionnelles, la plupart des gisements de fer oolithiques n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'attention et ce, pour différentes raisons. Ces gisements présentent un certain nombre de caractéristiques complexes qui rendent inadéquates les méthodes traditionnelles de valorisation du minerai de fer. Tout d'abord, la faible concentration de fer et les niveaux relativement élevés de phosphore et de silice rendent les techniques traditionnelles inutilisables.

L'objectif de cette étude est de réduire la teneur en phosphore du minerai par le procédé de torréfaction. En outre, ce procédé est réalisé dans différentes conditions expérimentales ; les paramètres de torréfaction étudiés concernent la concentration du chlorure de calcium par rapport au minerai de fer, la granulométrie du minerai de fer, la température de torréfaction. Les résultats obtenus par le chlorure de calcium sont très encourageants et ils présentent une meilleure réduction du  $P_2O_5$  pour une granulométrie –  $0.063 + 0.045mm$  avec une concentration 20g du  $CaCl_2$  et 80g de minerai de fer et une température de  $800^\circ C$ .

Cette étude présente une démarche visant à améliorer la qualité du minerai de fer tout en diminuant la teneur en phosphore. Cette démarche est basée sur des analyses de la composition du minerai de fer de gara Djebilet. Selon les objectifs visés pour le traitement de ce minerai, une caractérisation physico-chimique est nécessaire et à cet effet des analyses granulo-chimiques et minéralogiques sont d'une importance capitale pour mieux cerner les caractéristiques naturelles du minerai de fer. Il en résulte que le minerai de fer de gara Djebilet ne répond pas aux exigences sidérurgiques pour être exploité et utilisé directement dans l'industrie.

Après un traitement au chlorure de calcium suivi d'une torréfaction avec différentes températures, la teneur en phosphore a réellement diminué pour atteindre le seuil de tolérance

**Le premier chapitre** a fait l'objet d'une appréciation sur l'importance des minerais de fer, les types, les besoins en la matière, la production des minerais de fer oolithiques, ainsi que la situation actuelle et perspective sur les minerais de fer en Algérie.

**Le deuxième chapitre**, est consacré à la situation géographique, géologie et la minéralisation du gisement de Gara Djebilet/ Tindouf, et un aperçu stratigraphique.

**Le troisième chapitre** porte sur la synthèse des travaux de recherche entrepris depuis la découverte de ce gisement. Le minerai de fer de Gara Djebilet a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des organisations diverses, avec des résultats variables. Une analyse bibliographique sur le traitement des minerais de fer oolithiques récente lui est consacrée.

**Le quatrième chapitre** porte sur la caractérisation physico-chimique du minerai de fer de Gara Djebilet. Les techniques de tamisage, d'analyse minéralogique, ainsi que les divers outils d'analyse chimique et microscopique utilisés pour cette caractérisation y sont présentées. Autant sous l'aspect théorique que sur la méthodologie de recherche appliquée. Les résultats de ces analyses sont présentés puis discutés à la fin de ce chapitre.

**Le cinquième chapitre** de cette thèse est consacré à l'étude expérimentale visant à réduire le taux de phosphore se trouvant dans le minerai de fer oolithique de Gara Djebilet. Cette étude est basée essentiellement sur l'effet des variables de processus de traitement du minerai de fer de Gara Djebilet, avec l'utilisation de chlorure de calcium. Ce travail de recherche réside dans l'application du procédé de torréfaction utilisant le chlorure de calcium à différentes granulométries, températures et concentrations. Une discussion des résultats obtenus par les études expérimentales ainsi que l'interprétation des résultats nous ont permis de suggérer un mode de traitement des minerais de fer oolithiques pour le cas du gisement de Gara Djebilet / Tindouf en vue de réduire la teneur en phosphore

# **CHAPITRE I**

## **SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE MINERAI DE FER OOLITHIQUE**

## I. IMPORTANCE DES MINÉRAIS DE FER DANS LE MONDE

### I.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES MINÉRAIS DE FER

Le fer est l'élément de transition le plus abondant, constituant 4.7 % en masse de la croûte terrestre. On ne le trouve pas sous l'état métallique à la surface terrestre. Par contre, on trouve les minerais principaux :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Dans l'industrie, l'extraction du fer consiste à séparer le fer de l'oxygène, et est réalisée selon un procédé utilisé dès la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Il est effectué à température élevée par un traitement de réduction par le carbone (ou coke) dans un haut fourneau. Le fer est recueilli à l'état liquide, formant en refroidissant la fonte. La fonte contient 4 à 5 % de carbone et en moindre quantité d'autres éléments : Si, Mn, P et S. La fonte est cassante, difficile à souder et peu résistante. Pour être utilisée, elle doit donc être transformée en acier.

### I.2 TYPES DE MINÉRAIS DE FER

L'ancienneté de l'industrie sidérurgique, la variété des produits proposés et le pragmatisme qui présidait à la mise en œuvre d'une technique fort complexe expliquent une terminologie des substances ferrifères naturelles tout à la fois riche et généralement peu précis. Il est certain que les types de minerais les plus fréquemment rencontrés sont bien définis, souvent même on connaît le sens de variation de certains de leurs paramètres.

Les espèces minéralogiques constituant la masse essentielle des minerais de fer sont peu nombreuses et assez différenciées du point de vue physique pour être aisément reconnues. Une classification pratique s'est donc naturellement mise en place, fondée sur l'espèce ferrifère dominante. Elle donne globalement une indication sur plusieurs caractéristiques du minerai : dureté, porosité, teneur en fer, teneur en produits volatils (Bubenicek. L et al, 2017).

#### ▪ Hématite

L'hématite figure I.1 est un oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et se divise en deux familles. La première est l'hématite rouge ou fer oligiste qui est caractérisé par son eau de lavement de couleur sang, très tachante pour les vêtements. C'est le type de minerai le plus utilisé au niveau industriel et aussi le plus répandu dans le monde.



Figure I.1 Minerai d'hématite spéculaire

### ▪ Limonite

La limonite figure I. 2 est à la fois oxyde et 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 minerai n'est plus utilisé aujourd'hui dans les industries sidérurgiques car il contient du phosphore.



Figure I. 2 Minerai de limonite jaune

### ▪ Goethite

La goethite figure I.3 est un hydroxyde de fer ( $\text{FeO OH}$ ) de couleur brune, jaunâtre ou noire. Elle fait parti 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.



Figure I. 3 Minerai de goethite

### ▪ Ilménite

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



**Figure I. 4** Minerai d'ilménite

### ▪ Magnétite

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



**Figure I.5** Minerai de magnétite

### ▪ Pyrite

La pyrite figure I. 6 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. Attention!!! Cette pierre produit de l'anhydride sulfurique si elle est chauffée, ne respirer jamais la vapeur se dégageant de cette combustion.



Figure I.6 Minerai de pyrite

### ▪ Sidérite

La sidérite figure I. 7 est un carbonate de fer ( $\text{Fe CO}_3$ ) 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 goethite (Bubenicek. L et al, 2017).



Figure I. 7 Minerai de sidérite

## I.3 ORIGINE DU 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 oolitique, 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.3.1 Caractéristiques du fer oolithique

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 les infiltrations amènent, autour de ces grains de sable, le dépôt d'enveloppes concentriques de carbonate de chaux, donnant naissance à des oolites (Lapparent, 1886).

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 oolites, agrégés par un ciment ocreux plus ou moins abondant. Les oolites 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 formée de couches concentriques de peroxyde de fer hydraté (Ch. Durand, 1893).

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 oolites 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 oolites marines actuelles. Sur les oolites actuelles, 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 radiale doit être le résultat d'une recristallisation. Cependant, dans le milieu de formation d'oolites du golfe, on a pu montrer que les cristaux poussent avec une orientation radiale lorsque l'oolithe séjourne dans les dépressions peu agitées, et qu'ils se tassent en un feutrage tangential lorsqu'elle est entraînée par les courants dans les parties plus agitées du rivage. La croissance de l'oolithe dépend donc de l'alternance de séjours en milieu abrité et en milieu agité (Jean-Claude PLAZIAT 2017).

### I.3.2 Formation d'oolithe

Un oolithe est composée d'un noyau (nucléus) autour duquel s'est initié le développement concentrique par précipitation chimique (ou biochimique) du  $\text{CaCO}_3$ . Il peut s'agir du :

- Bio-claste (débris d'origine biologique) ;
- Litho-claste (petit fragment de débris de roche) ;
- 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, (Perez, J.-B. 2013).

Les oolithes se forment plutôt en milieu marin peu profond mais agité. Elles restent en suspension permanente, tandis que les couches formant le cortex se mettent en place lorsqu'elles deviennent trop lourdes, elles se déposent sur le fond marin et se sédimentent.

L'origine purement minérale des oolithes est sujette à débat dans la communauté des sédimentologies.

Les oolithes actuels présentent un micro-bio-film bactérien en surface, qui pourrait aider à la précipitation carbonatée. Il s'agirait alors de précipitation induite (par opposition à une précipitation contrôlée, comme dans le cas des tests d'animaux marins), sur le modèle des stromatolithes, mais sur une structure non fixée (Prévôt, C. 2013).

#### **I.4 DEMANDE EN MINÉRAI DE FER DANS LE MONDE**

Les minerais contenant du fer sont très nombreux, mais uniquement un nombre limité d'entre eux sont utilisés comme source de fer. Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère ; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.

En 2015 en raison de la faible croissance de la production mondiale d'acier, la hausse continue de l'offre, conjuguée à la chute de la demande, a fait de 2015 une année difficile pour le marché du minerai de fer, affirme la CNUCED dans un nouveau rapport. Iron Ore Market Report 2015, qui retrace l'évolution de ce marché en 2014 et en donne une vue d'ensemble pour 2015 – 2016, montre que le ralentissement de la production mondiale d'acier, dont le minerai de fer est la matière première primaire, inaugure une nouvelle phase caractérisée par une croissance plus faible, une baisse des prix et une diminution des marges des sociétés minières.

Pour 2015, indique la CNUCED, la production mondiale d'acier brut est estimée à 1 763 millions de tonnes en baisse de 2.9 % par rapport à 2014, et celle de minerai de fer à 1 948 millions de tonnes (- 6 %). Après une longue période de croissance rapide, le marché du minerai de fer a vu la demande se tasser et les prix retomber à des niveaux que l'on n'avait plus vus depuis 2002. Le prix du minerai de fer, qui affichait 71,26 dollars par tonne métrique sèche au début de 2015, a perdu 39 % sur l'année.

La réorientation de la stratégie économique chinoise a entraîné un fort ralentissement de la consommation d'acier, que les signes de reprise observés dans d'autres régions du monde n'ont pas suffi à compenser. Dans le même temps, les géants miniers du secteur ont intensifié leur production de minerai de fer non seulement en Australie, mais également dans d'autres pays, provoquant une importante surproduction. Les fermetures de capacités, notamment en Chine, ont été insuffisantes pour contrebalancer cette expansion, et de nombreux projets miniers ont dû être interrompus ou reportés.

Le marché mondial du minerai de fer sera caractérisé par une surproduction réelle ou potentielle pendant plusieurs années encore. Les prix ne pourront pas dépasser un certain seuil, qui sera déterminé par les investissements indispensables à la poursuite de la production, notamment par le géant minier brésilien Vale.

En Chine, la demande d'acier devrait augmenter beaucoup moins rapidement qu'au cours des dix dernières années, mais elle devrait repartir dans le reste du monde malgré les perspectives macroéconomiques défavorables dans la zone Euro.

Les nouveaux approvisionnements devraient être assurés principalement par Vale, Rio Tinto et BHP Billiton, les trois géants du secteur, dont les décisions d'investissement devraient être prudentes.

En 2014, au niveau mondial, la production de minerai de fer a augmenté de 1.9 % seulement à 2 048 millions de tonnes. Elle s'est accrue dans toutes les régions, exception faite de l'Asie, où elle a chuté de 21 % – et de 27 % en Chine. En Australie, elle a poursuivi sa hausse, qui s'est montée à 19 %, atteignant 724 millions de tonnes. Au Brésil, elle a progressé de 2.1 % à 399 millions de tonnes. (UNCTAD ; 2016).

Le commerce mondial du minerai de fer a augmenté rapidement en 2014, avec des exportations en hausse de 10 %. Cette augmentation s'explique par la nouvelle répartition géographique des centres de production et, en particulier, par le fort accroissement des importations chinoises, consécutif à la fermeture de capacités nationales. Comme pour les années passées, la hausse des échanges était presque entièrement due à l'accroissement des importations chinoises. La Chine était à l'origine de 57 % de l'augmentation des importations mondiales en 2013, et de 88 % en 2014. En 2014, le commerce mondial de minerai de fer par voie maritime a progressé de 12.4 % à 1 356 millions de tonnes. Néanmoins, le secteur des transports maritimes a continué d'afficher une forte surcapacité, et les coûts du frais demeurent faibles. (UNCTAD ; 2016).

Le rapport du marché du minerai de fer en 2015, produit grâce au fonds d'affectation spéciale pour l'information sur le minerai de fer de la CNUCED, couvre l'évolution du marché jusqu'à septembre 2015. Il est complété par une base de données électronique actualisée sur le marché du minerai de fer, qui sera mise en ligne le premier du mois de Mars 2016 (UNCTAD ; 2016).

## **I.5 PRODUCTION DE MINÉRAI DE FER**

### **I.5.1 Production mondiale de minerai de fer**

Seule une quarantaine de pays dans le monde produit du minerai de fer 3,3 milliards de tonnes de fer / an. La production mondiale de minerai de fer a atteint 3320 millions de tonnes en 2015, soit une légère diminution par rapport à 2014 (3420 millions de tonnes).

La Chine est de très loin le leader du marché du minerai de fer, avec 1,38 milliard de tonnes de minerai extraites et loin derrière, l’Australie (824 Mt) et le Brésil, (428 Mt). Au 4<sup>ème</sup> rang : l’Inde (129 Mt), et la Russie (112 Mt).

**I.5.2 Pays producteurs de minerai de fer**

Le minerai de fer est surtout employé par l’industrie sidérurgique pour la fabrication de fonte et d’acier. En 2009, la production de minerai de fer a baissé pour la première fois en sept ans mais le commerce de cette matière première - stimulé par la demande chinoise - n’en a pas moins augmenté l’année dernière, d’après le rapport intitulé le marché de fer 2009 – 2011 et selon le rapport du Fonds d’Affectation Spécial de la CNUCED :

La production mondiale de minerai de fer avait baissé de 6.2 % en 2009 pour passer à 1 milliard 588 millions de tonnes. La production a diminué dans la plupart des pays, à quelques exceptions notables près, comme l’Australie et l’Afrique du Sud.

Malgré la récession mondiale, le commerce du minerai de fer avait atteint un niveau record de 955 millions de tonnes en 2009, soit une hausse de 7.4 % par rapport à l’année précédente. L’augmentation était due à des importations chinoises plus élevées, résultant d’une demande croissante conjuguée à une baisse de la production intérieure chinoise.

L’Australie est le plus grand pays exportateur de minerai de fer : en 2009, elle a exporté 363 millions de tonnes, soit une augmentation de 17 %. Les exportations du Brésil, avec 266 millions de tonnes, ont perdu 3 %. L’Inde, avec 116 millions de tonnes, a pris la troisième place. On estime que le commerce maritime du minerai de fer a augmenté de 11 % en 2009, avec 890 millions de tonnes. La Chine est de loin le plus grand importateur de minerai de fer puisqu’elle représente les deux tiers des importations mondiales. Malgré la récession, sa consommation de minerai a progressé de 41 % en 2009, pour atteindre 628 millions de tonnes. Statista GmbH ; Hamburg ; Germany 2017.

**Tableau I. 1** Production mondiale de minerai de fer de quelques pays en millions de tonnes (Statista GmbH, 2017)

N°	Pays	2013	2014	2015	2016
01	Chine	1450	309	375	353
02	Australie	609	774	817	825
03	Inde	150	129	156	160
04	Brésil	317	411	397	391
05	Russie	105	102	101	100
06	Ukraine	82	68	67	58
07	Afrique du Sud	72	81	73	60
08	Canada	43	44	46	48
09	Iran	35	33	27	26
10	Kazakhstan	26	25	21	21

## I.6 MINÉRAIS DE FER EN ALGÉRIE

### I.6.1 Situation actuelle et perspective

Le minerai de fer se compose de roches et de minéraux dans lequel le fer peut être extrait de manière rentable. Le minerai extrait est habituellement riche en oxydes et en carbonates de fer et de couleur gris foncé, jaune éclatant. Le fer lui-même se trouve généralement sous la forme de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de goethite, de limonite ou de sidérite ; l'hématite est aussi appelée « minerai naturel ». Le minerai de fer est la matière première de la fonte de première fusion, qui est elle-même la matière première principale de l'acier (M. Dumont 2007).

En général, le minerai le plus riche en fer est le plus rentable. Lorsque sa teneur est supérieure à 54 %, il est considéré comme riche et ne nécessite aucune valorisation à part son calibrage. Lorsqu'elle est inférieure à 54 %, il est considéré comme pauvre et doit être valorisé pour en permettre la commercialisation. Il existe deux calibres de minerai de fer à forte teneur. Le premier est le minerai d'une granulométrie supérieure à 8 mm, qui est appelé « minerai en morceaux », et le second, celui d'une granulométrie inférieure à 8 mm, qui est appelé « minerai fin ».

### I.6.2 Production du minerai de fer en Algérie

En dehors des hydrocarbures, le fer est l'un des principales richesses minières de l'Algérie, L'exploitation des gisements des minerais de fer a toujours eut une place prépondérante dans l'industrie extractive du pays. M. Bounouala (1988),

Les ressources nationales en matière du minerai de fer sont localisées et réparties sur six gisements dont ceux de l'Ouenza et Boukhadra situés à l'Est du pays, exploités par le groupe Arcelor-Mittal Tébessa, les réserves géologiques sont de 87 millions de tonnes avec 48 % Fe. Avec une production de 2 millions de tonnes/an, la minéralisation hématitique est encaissée dans les calcaires récifaux Aptiens. Actuellement dans la même région, le gisement de Chaabet-El-Ballout (Souk-Ahras), de réserves géologiques de 10 millions de tonnes avec 53% Fe. La minéralisation ferrifère localisée au contact Calcaires-formations grésomarneuses du Crétacé, et actuellement en phase d'étude afin de relancer son exploitation.

La filiale SOMIFER-spa, du groupe Ferphos à travers ses mines de Khanguet (W. Tébessa), Sidi Maarouf (W. Jijel), Djebel Anini (W. Sétif) ce dernier a des réserves géologiques de 6.75 millions de tonnes avec 55 % Fe, la minéralisation hématitique encaissée dans les calcaires du lias sous forme de filons et de poches. Le gisement de Rouina (W. Ain Defla) assure une production du minerai de fer représenté par de l'hématite destinée essentiellement pour la fabrication du ciment. (A. Idres et M. Bounouala, 2005).

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

Les autres gisements non encore exploités se trouvent dans la région du Sud-Ouest du pays, il s'agit de grand gisement de Gara-Djebilet : les réserves géologiques estimées jusqu'à

2 milliards de tonnes de teneur égale à 57% en fer et de minéralisation ferrifère oolithique sous forme de corps lenticulaires encaissés dans les grès du Dévonien inférieur (Praguien).

Mecheri-Abdelaziz : réserves géologiques sont de 1 350 millions de tonnes avec une teneur de 52% en fer, une minéralisation ferrifère oolithique localisée sous forme de lentilles dans les grès du Dévonien supérieur (Fammenien). (MEM 2007)

## **I.7 MARCHÉ DU MINÉRAI DE FER**

Depuis quelques décennies, on assiste à l'approvisionnement des grandes sidérurgies par des minerais ayant accompli des trajets maritimes très longs.

Il n'existe pas de marché formel organisé du minerai de fer et de l'acier. La formation des prix n'est en cela pas transparente, toutefois, l'usage veut que les prix soient fixés de gré à gré entre grandes sociétés internationales (A. Idres et M. Bounouala ; 2005).

### **I.7.1 Révision des prix**

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

Il semble que la négociation annuelle d'un prix du minerai de fer avec les utilisateurs s'avère de plus en plus difficile, à mesure que l'on abandonne les contrats à long terme pour profiter du prix au comptant élevé du précieux minerai.

Le développement d'un marché financier diversifié du minerai de fer permettrait aux exploitants d'usines de traitement et aux producteurs de fixer leurs prix de manière à courir moins de risques et de favoriser un équilibre entre les prix de référence et les prix au comptant, ainsi qu'entre leurs intérêts respectifs, afin d'éliminer la combativité et la tension inhérentes aux négociations annuelles. (M. Dumont 2007).

Le minerai de fer est commercialisé sous plusieurs formes : les morceaux, blocs rocheux, de plus de 40 mm environ (lumps ou calibrés), les fines (0-10 mm) pour agglomération sur grille (sinter-feed), les boulettes (10-20 mm) ou pellets, fabriquées à partir de minerais très fins (moins de 100 mm). (A. Idres et M. Bounouala, 2005).

On estime à près de 98% la part du minerai de fer employé pour la fabrication d'acier. Ce pourcentage très élevé s'explique notamment par le caractère extrêmement polyvalent de ce métal en comparaison avec la fonte. La production mondiale de minerai de fer de quelques pays est représentée sur le Tableau 1 (Statista GmbH, 2017).

## I.8 SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE MINÉRAI DE FER OOLITHIQUE

### I.8.1 ÉTUDES ANTERIEURES (SONAREM AVANT 1980)

Le minerai de fer de Gara Djebilet a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des organisations diverses, avec des résultats variables.

Parmi ces organisations, on citera :

1. IRSID, l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (1961- 1977)
2. Krupp Rohstoffe (avril 1966)
3. Université de Prague (1967)
4. MRRC de l'université du Minnesota
5. TEMPO (1975)
6. LKAB (1976)

#### I.8.1.1 Essais Irsid (1961)

IRSID procéda à des essais de :

- ✓ **Pré-concentration** du minerai de fer de Gara Djebilet par concassage et criblage après, broyage des fractions de tailles supérieures à 40mm. Les résultats obtenus montrent que :
  1. plus le broyage est fin, plus la teneur du concentré est élevée ;
  2. mais il n'y avait pas de variation dans la teneur des résidus.
- ✓ **Traitements Magnétiques** effectués par des essais au tube Davis, et des essais de séparation des éléments magnétiques du concassé de 6 à 120mm. Cette séparation a permis d'obtenir une augmentation de la teneur de 1 à 3%, soit une teneur de fer de 58 à 60% du concentré.
- ✓ **Grillage magnétisant** pour la récupération des minerais non magnétique par magnétisation à environ 600 °c. Les éléments obtenus ont été broyés à 50µm puis soumis au triage magnétique par voie humide dans un tube Davis. Les résultats obtenus sont présentés sur le Tableau I.2.

**Tableau I.2** Résultats des essais de grillage magnétique

	Éch 1, Fe, %	Poids, %	Éch 2, Fe, %	Poids, %
Minerai brut	57.00	100.00	56.0	100.00
Minerai grillé	61.35	92.50	60.35	92.50
Minerai concassé grillé	63.35	88.50	61.95	84.80
Refus	33.80	4.00	39.60	7.70
Minerai concassé non grillé	64.10	38.30	-	-
Refus	52.30	61.70	-	-

### I.8.1.2 Essais Irsid (1964)

IRSID procéda à des essais de :

▪ **Grillage magnétisant du minerai brut suivi d'un broyage fin et d'un triage magnétique :**

Les échantillons ont été broyés en granulométrie < 1mm et triés en fractions de 0 à 100 µm, 100 à 400 µm et au dessus de 400 µm. Ils ont été placés en milieu réducteur à 650°C, puis refroidis avant d'être broyés à 50 µm par voie humide et soumis au triage magnétique à faible intensité dans un tube Davis.

1. Notant que 90% du poids initial ont été récupérés, pour une teneur en fer allant de : 95.5 à 98 %.

2. La teneur en fer du concentré varie de 62.5 à 63.5%.

3. Dans le refus, il a été constaté une augmentation de 20 à 40% de la teneur en SiO<sub>2</sub>, 13 à 15 % de la teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et des augmentations correspondantes de CaO et P. Ce refus ne représentait qu'un faible pourcentage qui n'a pas permis une élimination notable de ces éléments.

IRSID a effectué des essais comparatifs de triage magnétique à faible intensité, par voie humide, avec ou sans grillage magnétisant, réalisés sur les produits du triage magnétique par voie sèche. Les échantillons ont été broyés à 50 µm et soumis à une séparation magnétique par voie humide.

Ces essais montrent :

1. Le concentré grillé présente des teneurs en SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nettement supérieures.
2. Le concentré grillé présente un plus fort degré de magnétisation.
3. Le grillage d'un concentré grossier ne permet pas la libération des fines de magnétite existant dans le concentré sous forme de silicates.
4. Les concentrés contiennent une plus grande proportion de phosphore lié au fer dont le pourcentage est souvent supérieur à 0.4 %.

▪ **Essais de flottation**

Après broyage de 0 à 100 microns, les minerais ont subi une flottation de 10 minutes, à 20°C, mettant en œuvre des flottations directes, cationique et anionique.

Ces essais montrent :

1. Seule La flottation anionique a donné des résultats plus ou moins satisfaisants, permettant d'éliminer une forte proportion d'apatite et donnant une teneur en phosphore de 0.3 % et en fer de 61 à 62 % après concentration.
2. La flottation a permis de récupérer une grande partie des oxydes de fer et de la sidérite à partir des fines de 0 à 6 mm. Il a été suggéré d'utiliser la flottation pour le deuxième traitement du concentré magnétique.

### **I.8.1.3 Essais Irsid (1977)**

Une étude de l'agglomération en boulettes (pelletisation) du minerai de Gara Djebilet et du comportement de celles-ci au cours de la réduction.

Les résultats de cette étude ont montré que le minerai a été bouleté dans de bonnes conditions après broyage et une addition de 0.7% de bentonite. Le traitement thermique utilisé a permis d'obtenir des boulettes de bonnes caractéristiques physiques à froid.

Le comportement de ces boulettes en cours de réduction n'est pas très bon :

1. Dans les conditions de haut fourneau.
2. Dans les conditions du four à cuve de pré-réduction.

L'utilisation de ces boulettes ne peut donc être recommandée tant pour l'utilisation au haut fourneau que pour la réduction directe.

### **I.8.1.4 Essais Kaiser (1977-1979)**

Les essais d'enrichissement du minerai soumis par Kaiser portent essentiellement sur :

- Triage du minerai brut.
- Séparation humide à haute intensité magnétique (SHHIM).
- Frittage magnétique.
- Réduction directe.

Les résultats des différentes études d'enrichissement du minerai et de métallurgie se résument comme suit :

- La séparation magnétique par voie sèche de faible intensité n'a pas donné de bons résultats sur le minerai grossier.
- Le broyage des fines à moins de 74  $\mu\text{m}$ , suivie par une séparation magnétique par voie humide sous faible intensité, a fait passer la teneur en fer à plus de 60 %. Cependant, la réduction de la teneur en phosphore n'a pas été suffisante et d'importantes quantités de fer non magnétiques ont été perdues.
- Des boulettes présentant de bonnes qualités physiques peuvent être préparées à partir des fines broyées ou du concentré de séparation magnétique par voie humide du minerai de fer. Mais ces boulettes n'ont pas atteint une teneur en fer suffisamment élevée ou un taux en phosphore suffisamment réduit pour l'exportation.
- Des agglomérés auto-fondants de bonne qualité ont pu être préparés à partir des fines mais la consommation de combustible était relativement élevée et la productivité moyenne.
- Le minerai en morceaux et les boulettes ont été réduits de façon satisfaisante en éponge de fer par la méthode de réduction directe par le gaz naturel.

### I.8.1.5 Essais Krupp (1966)

Les essais réalisés par Krupp se présentent comme suit :

- **Un broyage soigneux et criblage**, la teneur en fer de la fraction 40-10mm du minerai magnétique de Gara Djebilet a été légèrement augmentée de 58.5% à 59.3%, mais la teneur en phosphore n'a pas diminué par rapport à celle du minerai brut qui était de l'ordre de 0.70% ;
- **Un pré-enrichissement magnétique**, des fractions 40–10 mm, 10–5mm et < 5 mm : la teneur en P a été réduite de 0,09 %, et a été ramenée ainsi à 0.64 %, mais elle est restée bien au-dessus de la limite souhaitée ;
- **Des tests au tube Davis** effectués avec diverses granulométries et intensité du champ donnèrent des concentrés riches titrant 64.5 % de fer. Cependant, la teneur en phosphore n'a pu être abaissée qu'à 0.48 % ;
- **Des essais semi-industriels**, entrepris avec des séparateurs secs et humides donnèrent un concentré à 62.4 % de fer, teneur qui pourrait bien être portée à plus de 63 % par un traitement secondaire. La teneur en phosphore n'a pu être réduite que tout au plus à 0.5 % ;
- **Un pré-grillage magnétique**, la teneur en fer a pu être portée à 65.6 % et le rendement en fer à presque 90%. La diminution de la teneur en phosphore jusqu'à 0.56 % resta toujours insuffisante ;
- **Une lixiviation à l'acide nitrique dilué** a été réalisée sur du minerai avec des fractions < 0.063 mm à 85 %, avec réduction du phosphore de 0.56 à 0.32 % ;
- **Un broyage à moins 0.040mm**, à 100 % s'est révélé le plus favorable. Une augmentation de température à 75°C a permis de réduire la teneur en phosphore à 0.31 %. Avec l'augmentation de la durée de réaction, la teneur en phosphore a été réduite à 0.27 %.

### I.8.1.6 bureau d'étude de valorisation minérale Prague (1967)

Différents essais de séparation magnétique à voie sèche et à voie humide ont été effectués sur les différentes fractions du minerai, suivi de flottation, de triage magnétique ou de broyage.

Ces essais ont montré que l'abaissement de la teneur en phosphore n'a pas été considéré suffisant. Plusieurs lixiviations ont alors été mises en œuvre pour les échantillons à magnérite et magnétite dont la teneur initiale en phosphore était de 0.5 %. Les résultats de ces essais sont les suivants :

- Lixiviation au HNO<sub>3</sub> (0.43% ; 0.38) ;
- Lixiviation au HNO<sub>3</sub> après séparation magnétique avec adjonction de calcite (0.16% ; 0.18%) ;
- Lixiviation au NaOH et HNO<sub>3</sub> (0.22% ; 0.18%) ;
- Grillage magnétisant avec lixiviation au NaOH et HNO<sub>3</sub> (0.15% ; 0.15%).

I.8.2 TRAVAUX RÉALISÉS APRES 1980 (SIDER)

Quelques travaux de recherche sur le gisement de Gara Djebilet sont réalisés dans le début des années 1980 avec l'entreprise de l'époque SIDER, les opérations de traitement sont présentées sur la figure I.8.

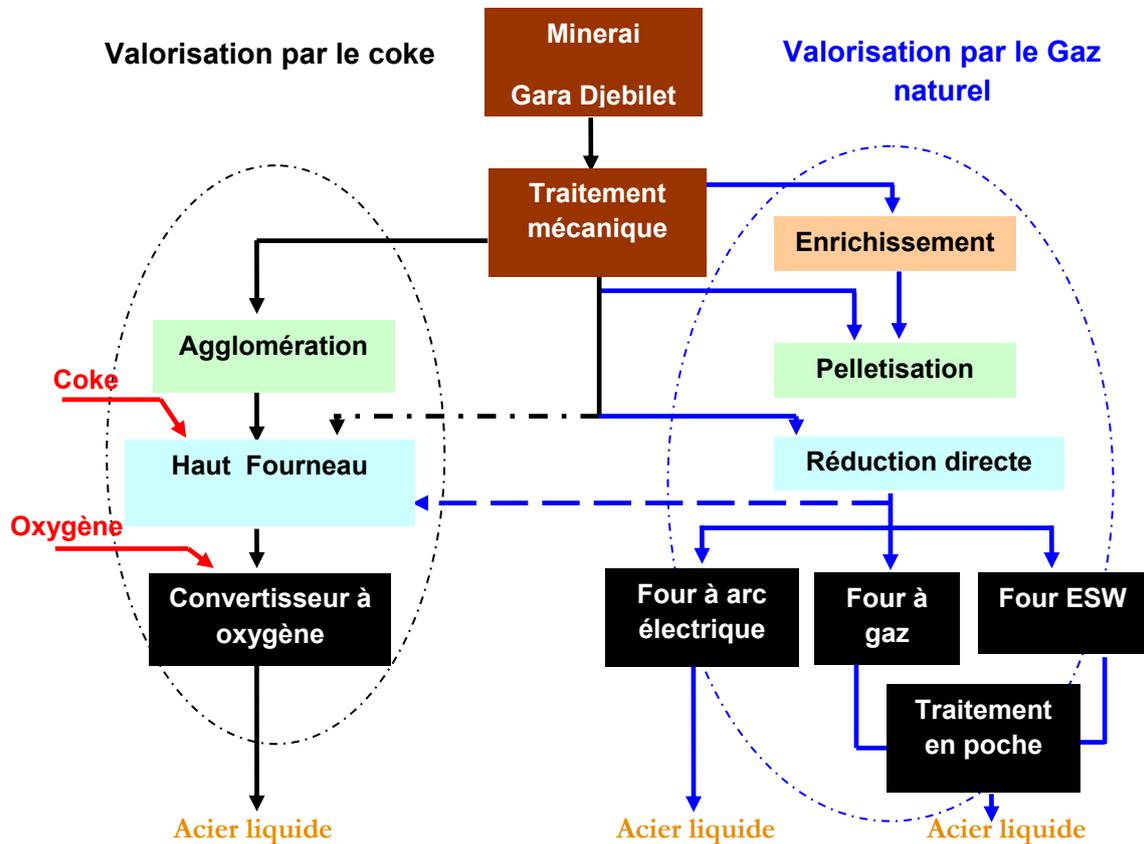


Figure I.8 Filières Métallurgiques de valorisation du minerai Gara Djebilet

Au début des années 1980, date à laquelle il a été décidé de trouver une solution au minerai de fer de Gara Djebilet en utilisant la voie métallurgique les principales filières de production d'acier consistaient en : Agglomération - Haut Fourneau – Convertisseur à Oxygène et Pelletisation - Réduction directe – Four électrique arc.

Des études comparatives ont été réalisées sur le choix des filières à adopter :

La filière Agglomération - Haut fourneaux – Convertisseur à oxygène bien que largement répandue et maîtrisée n'a pas été retenue comme choix de filière du fait de la grande quantité de charbon cokéifiable nécessaire à la production d'une tonne de fonte (1 tonne de charbon pour une tonne de fonte). De plus le charbon n'est pas disponible en Algérie, il faudrait l'importer entièrement.

La filière Pelletisation – Réduction directe – Four électrique à arc ou à gaz a été retenue comme option de développement bien qu'elle ne soit pas entièrement maîtrisée pour les

minerais phosphoreux, mais cette filière à l'avantage d'utiliser et de valoriser le gaz naturel en abondance en Algérie.

D'où une série d'études et d'essais ont été lancés.

### **I.8.2.1 Essais Hylsa 1986 (Mexique)**

#### **I.8.2.1.1 Valorisation du minerai de fer de Gara Djebilet par la filière réduction directe four électrique à arc**

HYLSA au Mexique se trouvait dans des conditions similaires à l'Algérie, elle n'avait pas de coke comme ressource énergétique mais elle avait en abondance du gaz naturel et elle possédait aussi du minerai phosphoreux mais qui ne dépassait pas le 0.3%

Elle a mis au point le procédé HYL pour traiter son minerai.

En décembre 1985 environ 400 tonnes de minerai de fer de Gara Djebilet ont été envoyés à HYLSA au Mexique pour des essais de réduction directe selon le procédé HYL et de fusion au four électrique à arc

Ces essais se sont déroulés en trois phases et ont fait l'objet de trois rapports intermédiaires et d'un rapport final

**a) Essais de caractérisation :** Un échantillon a été prélevé et utilisé pour les essais de laboratoire

- Caractéristiques minéralogiques ;
- Caractéristiques chimiques ;
- Caractéristiques physiques : dureté, porosité, etc.
- Caractéristiques métallurgiques.

#### **• Structure du minerai**

Plus de 10% sont composés de Magnétite  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  et d'Hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Entre 1 et 10% de Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), de Silice ( $\text{SiO}_2$ ) et de silicate d'alumine hydratée

Moins de 1% de Feldspath ( $6 \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{K}_2\text{O}$  ou  $\text{Na}_2\text{O}$ ) et d'apatite ( $\text{CaF}$ )  $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_3$  ou de ( $\text{CaCl}$ ).  $(\text{PO}_4)_3$ .

#### **✓ Analyse de la phase phosphatée.**

L'analyse de la phase phosphatée révèle que l'on est en présence d'une apatite faiblement carbonatée et sulfatée. Cette phase se répartie en exogangue et en endogangue.

L'endogangue est représentée par des cristaux d'apatite de néoformation ne dépassant guère 20 microns et qui se trouvent au cœur du nucléus des éléments ferrifères, et une forme minéralogique de phosphate autre que l'apatite qui se manifeste par le calcul du rapport  $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ .

La finesse de la maille de libération de ces cristaux et l'excès de phosphore attribuable à une autre forme minéralogique de phosphate compliquent le processus de déphosphoration.

▪ **Propriétés physiques du minerai de fer de Gara Djebilet**

Les propriétés physiques obtenus depuis le laboratoire de recherche du bureau de HYLSA 1986 Mexique sont représentées sur le tableau I.3.

**Tableau I.3** Propriétés physiques du minerai de fer de Gara Djebilet

<b>Densité réelle, g/ml</b>	<b>4 - 4.8</b>
<b>Densité apparente</b>	3.2 - 4.3
<b>Porosité, %</b>	15 - 18
<b>Humidité, %</b>	22 - 8
<b>Index d'Abrasion</b>	8.25
<b>Tendance au collage</b>	22.5
<b>T° de désintégration à 500 ° C</b>	
<b>% + 1/4</b>	70.79
<b>% - 1/8</b>	24.34

**b) Essais de réduction directe**

- Les essais de réduction directe ont été réalisés sur du minerai brut sous forme de lump.
- Ces essais ont eu lieu dans une installation pilote de capacité 24 tonnes par jour, avec un cycle de réduction de 300 kg toute les 20 minutes.
- Cette installation est similaire aux installations industrielles HYL

Lors des essais différents paramètres ont été testés

- Volume du gaz réducteur ;
- Température du gaz réducteur ;
- Refroidissement du pré réduit ;
- Dépôt de carbone.

**c) Essais de fusion**

Les essais de fusion ont été réalisés dans un four électrique à arc de capacité nominale 500 kg fonctionnant avec des électrodes de 10, 20 cm de diamètre avec une puissance de 750 KVA et un voltage en ligne de 13200 V.

L'alimentation en pré réduit va de 2 à 35 kg/min.

Les essais ont été réalisés selon plusieurs procédures en appliquant différents indices de basicité ; différentes méthodes d'injection de chaux et d'oxygène.

### **I.8.2.1.2 Procédures des essais de fusion**

- P.R 100 - 100% de pré-réduit de Gara Djebilet ; 2 décrassages - 5 coulées
  - P.R 75 – 75% de pré-réduit, 25% de ferraille, proche des conditions industrielles ; 1 décrassage - 5 coulées
  - F.B 1.5 – Faible basicité, la chaux est ajoutée pendant la fusion pour neutraliser la gangue acide - 5 coulées
  - M.B 2.0 – Moyenne basicité, similaire à LB 1.5 - 5 coulées
  - H.B 2.5 – Haute basicité, similaire à LB 1.5 - 5 coulées - 10 coulées
  - I.CH– Injection de chaux pour favoriser la déphosphoration- 10 coulées
  - 2 I.CH – Deux injections de chaux - 10 coulées
  - Injection d’oxygène à différents moments et à différentes positions – 46 coulées
- ✓ D’une manière générale le minerai est décrit de type oolitique et est constitué d’une couche de minerai magnétique comprise entre couche non magnétiques.

Le para genèse de ce minerai est très complexe,

- ✓ Les essais de réduction ont permis de conclure que le minerai de Gara Djebilet est apte à la Réduction directe selon le procédé HYL.
- Le taux de métallisation obtenu peut être supérieur à 93 %
- Le fer total peut être supérieur à 78 %

L'utilisation du gaz naturel comme produit d'appoint dans le circuit de refroidissement s'est avéré être une meilleure alternative pour obtenir une haute teneur de carbone

- ✓ Les essais de fusion ont démontré qu’il était possible d’obtenir de l’acier par fusion de l’éponge de fer du minerai de gara Djebilet dans un four électrique à arc ; La teneur en en phosphore obtenue est inférieure à 0.03%, et répond aux normes de conformité des aciers.

### **I.8.2.2 bureau d’étude de valorisation minérale (Allemagne - 1988)**

Le Four ESW est un four électrique fonctionnant en continu avec des électrodes plongées dans le laitier; Il est aussi appelé four à résistance de laitier ou four à arc submergé.

Il est utilisé habituellement pour le traitement des ferro-alliages, et pour les minerais ayant une gangue très importante.

La coulée du métal et du laitier se font par intermittence selon le principe de fonctionnement d’un haut fourneau.

Près de 30 tonnes d’éponge de fer produite sur les installations pilotes de HYLSA à Monterrey au Mexique ont été envoyées en Allemagne.

Des essais de fusion de cette éponge de fer au four électrique à résistance de laitier ont été réalisés.

- Les essais préliminaires ont été réalisés dans un four de 70 KWh.
- Les essais pilotes ont été réalisés sur un four de 300 KWh.

Ces essais ont permis de démontrer que ce procédé s'adapte bien à la production de l'acier à partir de l'éponge de fer produite à partir du minerai de fer de Gara Djebilet.

La forte gangue du minerai et les grandes quantités de chaux additionnées pour obtenir un indice de basicité élevée favorise l'obtention de l'arc submergé.

- Au four de 70 KW On a constaté qu'il ya une grande influence de la teneur en FeO sur la déphosphoration. Pour obtenir un taux de 0.03% de P dans l'acier, il faut un minimum de 14% de FeO et une basicité CaO/SiO<sub>2</sub> de plus de 2.2.

Une augmentation supplémentaire de la teneur en FeO et de la basicité à 2.8 a pour conséquence la réduction de la teneur en phosphore de l'acier à moins de 0.01%

La consommation d'énergie a été de l'ordre de 3200 kW/t acier

Les teneurs en arsenic demeurent élevées

- Au four de 300KW les résultats ont confirmé les valeurs enregistrées dans les essais préliminaires (70 KW).

De façon similaire la teneur en arsenic demeure élevée indépendamment de la teneur en FeO et de la basicité. La consommation électrique a été de 1800 kw/ t aciers La consommation d'électrodes a été de 41 kg par tonne.

- Dans le domaine industriel les données probables du processus seraient :

Analyse de l'acier : 0.1 - 0.2% de C ; 0.05 - 0.1% de Si; 0.02% de Mn; 0.02% de S; 0.03% de P

Analyse des scories : 15% FeO ; 1% MnO; 17% SiO<sub>2</sub>; 11% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 41% de CaO ; 9% de MnO. La quantité de scorie serait d'environ 600kg/t acier. Ce procédé dont le procédé opératoire est relativement simple peut présenter un intérêt économique malgré la forte consommation d'énergie électrique.

### **I.8.2.3 Essais de valorisation par le procédé SNS-KAISER**

#### **Principe du procédé**

- Le minerai de fer traité (broyé et criblé) et mélangé à de la chaux est transformé en éponge de fer dans une cuve alimentée en continu et sous l'effet de l'hydrogène du CO à une température proche de 1000 °C
- Le gaz réducteur est obtenu par cracking du gaz naturel par la vapeur en présence d'un catalyseur suivant la réaction :  $CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO$
- L'éponge de fer ainsi obtenue alimente un four à gaz de manière continue. Ce four fonctionne comme un haut fourneau avec évacuation cyclique du laitier et du métal.

- Le métal ainsi obtenu peut être ensuite traité dans un four électrique pour la mise à la nuance.

Les travaux ont juste permis aux cadres et aux ingénieurs algériens de se former à la technique de réduction directe et de fusion de l'éponge de fer.

Sur la base des travaux réalisés on peut dire que le processus est réalisable, mais aucune appréciation ne peut être faite quant aux aspects économique et technique à une échelle industrielle.

### **I.8.3 TRAVAUX ET ETUDES RECENTS (SONATRACH)**

#### **I.8.3.1 Etude de RIO TINTO (2006-2007)**

Rio Tinto a réalisé une simulation sur le minerai tout venant à 0.8% P et du minerai enrichi à 0.5% P pour son éventuelle utilisation au HIs melt (Rio Tinto est détenteur de la technologie).

Développé par Rio Tinto, ce procédé "peut être considéré à la fois comme une alternative potentielle aux hauts fourneaux et comme une nouvelle manière de produire de l'acier à bas coûts pour les aciéries à arc électrique

La nouvelle technologie HIs melt est un procédé de fusion à haute intensité. Elle ne requiert ni four à coke, ni usine de frittage du minerai et rejette moins de gaz à effet de serre par tonne de fonte produite. D'un coût de production inférieur, elle utilise des fines de basse qualité (avec un fort pourcentage d'impuretés), notamment celles très phosphoriques, invendables autrement. Autre avantage : le charbon employé est de basse qualité.

#### **b) Résultats de la simulation :**

- ***Minerai tout venant à 0,8% P***

- Pour l'élaboration de la fonte au HIs melt, vu que le ratio Alumine/silice est excessivement élevé, une addition de 30T/H de sable (utilisé comme fondant) a été nécessaire.
- Le modèle de la simulation prévoit l'obtention d'une fonte à 0.114% P, une limite supérieure d'acceptabilité de l'élaboration de l'acier au convertisseur.
- Une pénalité à l'utilisation (Value In Use) de 10.7 \$/t par rapport à un minerai australien HIB.

- ***Minerai enrichi à 0.5% P***

- Pour l'élaboration de la fonte au HIs melt, vu que le ratio Alumine/silice est excessivement élevé, une addition de 20T/H de sable (utilisé comme fondant) a été nécessaire.

- La teneur élevée du minerai en gangue et l'addition de flux de sable résulte en un volume relativement élevé de scories, ce qui a été bénéfique pour l'élimination du phosphore.
- Dans sa globalité, le modèle a montré que la valeur à l'utilisation du concentré de minerai de fer était identique à celle du minerai tout venant (soit une pénalité de 39,6\$/T). Donc, l'enrichissement du minerai génère une valeur ajoutée négligeable pour l'utilisation au HIs melt.

Le minerai tout venant et enrichi de Gara Djebilet n'est pas approprié comme matière première d'alimentation à l'HF.

Le HIs melt ne serait être attrayant à Rio Tinto à cause des pénalités inhérentes à l'élaboration de la fonte à partir du minerai de Gara Djebilet.

Une éventuelle et légère amélioration de la qualité du minerai finement broyé pourrait être obtenue suite aux techniques modernes de séparation et flottation.

### **I.8.3.2 Etude de CORUS (2008)**

Corus Consulting a réalisé des tests physiques et métallurgiques à l'échelle laboratoire sur les échantillons de minerai de fer de Gara Djebilet (450 g) de minerai en morceaux), pour le compte de POSCO.

- Le programme de tests de Corus s'est articulé autour des axes suivants :
  - a) Essais sur le minerai en morceaux (lump testing) ;
  - b) Détermination de l'énergie nécessaire pour le concassage et le broyage ;
  - c) Caractérisation du minerai de fer ;
  - d) Alternatives d'enrichissement.
    - Séparation magnétique à voie sèche du minerai en morceaux (-3 mm)
    - Séparation magnétique à voie humide des fines concentrées (-100 µm)
- Le but de ces essais était de déterminer :
  - Si le minerai en morceaux (lump) convient comme charge de haut fourneau.
  - Si le minerai convient comme charge pour la production d'agglomérés (sinter) et de boulettes (pellets), pouvant être utilisées au niveau du haut fourneau ou de la réduction directe.
  - La quantité d'énergie nécessaire pour le concassage et le broyage du minerai de Gara Djebilet.
- e) **Résultats d'essais**
  - Le minerai de fer de Gara Djebilet présente de mauvaises propriétés chimiques.

- Les propriétés physiques et métallurgiques du minerai, mesurées à l'issue des différents tests réalisés, sont bonnes.
- Le concassage et le broyage du minerai de Gara Djebilet requiert une faible consommation énergétique

L'évolution du taux de fer, silice, chaux et oxyde de phosphore en fonction des tranches granulométriques par la séparation magnétique à voie sèche est représentée dans la figure I.9

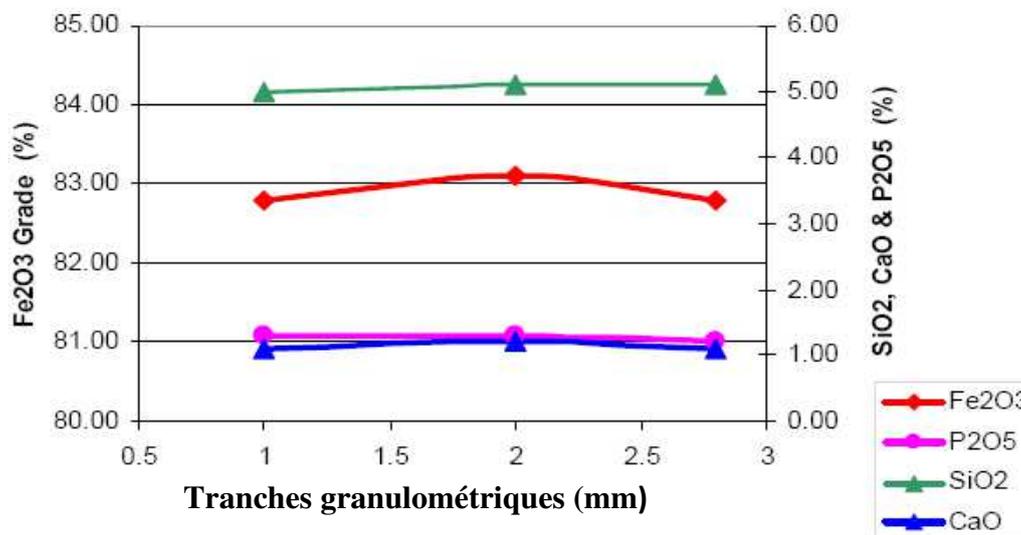


Figure I.9 Séparation magnétique à voie sèche du minerai en morceaux (- 3 mm)

D'après la courbe de la figure I.9, on constate que la teneur des composants nuisibles reste élevée en fonction de la granulométrie de l'échantillon du minerai de fer.

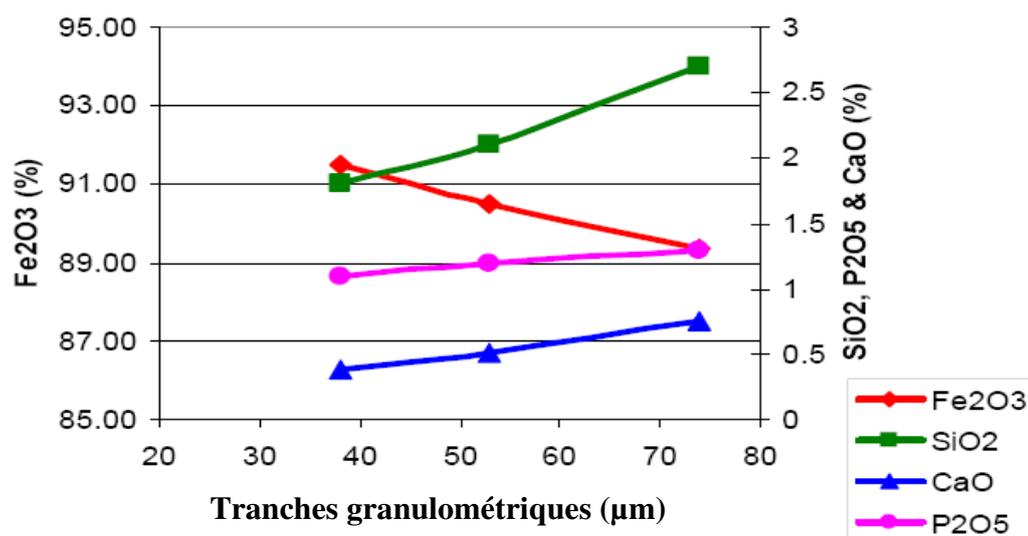


Figure I.10 Séparation magnétique à voie humide du minerai fin (-100µm)

Des améliorations de qualité substantielles ont été atteintes. Ce qui explique qu'il y a une relation entre la libération des éléments nuisibles et la granulométrie, la teneur en phosphore a diminué mais reste toujours élevé (tableau I.4).

**Tableau I.4** Résultats des essais séparation magnétique par voie humide et sèche

Teneur oxyde, %	Brut	SMH	SMS
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,8	1,1	1,3
P	0,78	0,48	0,56
SiO <sub>2</sub>	5,3	1,8	5,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	81	92	83
Fe	56,64	64,33	58,04
CaO	1,9	0,4	1,1
Fe recovery	/	73	86-89

SMH: Séparation magnétique à voie humide

SMS: Séparation magnétique à voie sèche

La majeure partie du phosphore est finement disséminé dans le minerai de fer

1. Le minerai en morceaux présente de bonnes propriétés physiques et métallurgiques mais ses propriétés chimiques qui sont infectes, le rendent quasiment inutilisable comme charge de haut fourneau.
2. Les essais d'enrichissement réalisés sur le minerai de Gara Djebilet sur la base des techniques standards avec variation de la granulométrie (grossière à fines), n'ont donné que des résultats partiellement satisfaisants.
3. Les fines pour la production d'agglomérés ne sont pas commercialement viables (durables). Chiffre,
4. Les fines pour production de boulettes n'atteignent pas une teneur en fer suffisamment élevée pour être utilisées comme un produit commercialement viable. Cependant, il y a un potentiel pour une amélioration supplémentaire de leur qualité.
5. L'enrichissement du minerai à une granulométrie ultra fines est nécessaire

**I.8.3.3 Etude de KIGAM (2008)**

L’institut coréen de géologie et d’activités minières (KIGAM) a utilisé deux types de minerais de fer pour ses tests d’enrichissement, gros (> 10 mm) et fine (< 10mm), classés S1 et S2 respectivement (Tableau I.5).

L’enrichissement par les méthodes telles que le broyage multi-étapes, la séparation magnétique, la décantation et la flottation ont été examinés.

**Tableau I.5** Composition chimique du bureau d’étude Coréen KIGAM

Echantillons	Composition chimique (%)						
	Fe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
S <sub>1</sub>	54.76	3.4	0.4	5.3	4.42	1.35	0.42
S <sub>2</sub>	54.77	2.35	0.42	5.73	3.99	0.96	0.4

**I.8.4 Etude réalisée par l’institut de recherche des mines et métallurgie de chine (CHANGSHA)**

En juin 2007, CITIC a remis à SONATRACH un document portant expression d’intérêt pour le projet Gara Djebilet, explicitant ainsi de manière formelle, son intérêt et sa vision pour le développement du projet.

Les différentes analyses et tests sur les échantillons de minerai de fer de Gara Djebilet ont été réalisés au niveau du meilleur laboratoire en Chine (CHANGSHA Research Institute Of Mining And Metallurgy) en 2008.

- **Programme d’essais de CITIC**

CITIC a réalisé des tests à l’échelle laboratoire sur les échantillons de minerai de fer de Gara Djebilet. Le programme de tests de CITIC s’est articulé autour des axes suivants :

- 1) La Minéralogie du minerai
- 2) Le Traitement du minerai.

- **Minéralogie du minerai**

L’analyse de la composition minéralogique réalisée à l’échelle laboratoire sur les échantillons de minerai de fer de Gara Djebilet par le bureau d’étude CITIC est représentée sur le tableau I.6.

**Tableau I.6** Composition minéralogique du minerai de fer de Gara Djebilet (CITIC)

Minéral	Magnétite	Maghémite	Hématite	Limonite	Quartz	Chamosite	Cellophane	Autres
Taux %	16,9	34,5	18,1	8,2	4,8	15	2,3	0,2

- **Composition chimique**

Les résultats de l'analyse de la composition chimique du minerai sont présentés dans le tableau I.7.

**Tableau I.7** Composition chimique du minerai de fer de Gara Djebilet

Elément	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO
%	56.01	4,36	75.23	6.67	0.28	4.61	2.12	0.45	0.2
Elément	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	As	S	P	Ig	T Fe/FeO	Coeff Alcalin	
%	0.045	0.011	0.061	0.018	0.79	3.92	12.85	0.23	

Le taux de récupération théorique maximal du fer, par sa séparation de ses phases minérales ferrifères dans le minerai, est de 98.64%. Selon la composition chimique, le minerai de fer de Gara Djebilet peut être considéré comme un minerai de fer oxydé et acide avec un faible taux de soufre et un taux élevé de phosphore.

- **Traitement du minerai**

- ❖ **Essais de pré concentration**

Les essais de pré concentration ont pour objectifs de vérifier si les technologies utilisées pour l'élimination des déchets peuvent être appliquées pour le minerai, de manière à améliorer grandement la qualité des fines au préalable en éliminant le plus possible de refus, ce qui économise de l'énergie et réduit la consommation (par ex, réactifs pour la flottation).

- ❖ **Essais de broyage et deschlammage**

Un essai exploratoire a été réalisé avec différents réactifs (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) à une finesse de broyage de 87,04% -75 µm.

Les résultats de deschlammage montrent qu'il y a beaucoup de perte de fer, et que ceux ci sont plus importants que les résultats des épreuves du séparateur magnétique à tube avec la même taille des particules. Donc ce processus de deschlammage n'est pas pratique pour le minerai brut.

❖ **Essais de broyage-flottation**

Un essai de flottation a été effectué sur le minerai brut avec une finesse de broyage de 87,04% à -75 µm, pour vérifier la faisabilité de la flottation sur le minerai dans le but d’augmenter le taux de fer et d’éliminer les rejets.

Les résultats du broyage-flottation montrent que les taux des résidus éliminés et de perte de récupération de fer sont respectivement de 49,49% et 27,34%. L’enrichissement était uniquement de l’ordre de 2.82%. Il est donc conclu que l’essai de broyage-flottation de minerai brut n’est pas possible pour l’élimination des résidus.

❖ **Essais de séparation magnétique à basse et haute intensité**

- Dans le but d’améliorer la récupération du fer, des tests de séparation magnétique à haute intensité ont été conduits à différentes granulométries. Les résultats ont montré un enrichissement de 2.85 à 3.55% de fer par rapport au minerai brut.
- Si le minerai est soumis à une séparation magnétique à basse intensité et suivie de haute intensité, le concentré obtenu ne sera pas enrichi de façon notable. Donc les produits de SMBI (séparation magnétique à basse intensité) n’auront pas à subir une séparation magnétique à haute intensité.
- Des essais de séparation magnétique à basse intensité (SMBI) ont été conduits sur le minerai à différentes granulométries de fines (45 et 38µm). Le produit obtenu (SMBI) avait une teneur en fer variant de 62.78% à 63.5% avec une récupération d’une moyenne de 74%.

**Tableau I.8** Composition chimique du minerai enrichie par SMBI

<b>Elément</b>	<b>Fe</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>MnO</b>	<b>P</b>	<b>Ig</b>
<b>%</b>	<b>62.94</b>	<b>2.46</b>	<b>3.27</b>	<b>0.77</b>	<b>0.31</b>	<b>0.10</b>	<b>0.54</b>	<b>1.86</b>

Le pourcentage de phosphore est toujours aussi élevé (0,54%) et le pourcentage de la gangue demeure aussi assez élevé, comme il a été montré dans le Tableau. I.8.

Il faut signaler que la teneur en phosphore, élément indésirable contenu dans le minerai, est de 0,8% soit 8 à 10 fois la norme de sa commercialisation et ne peut être abaissée en dessous de 0,3% après les traitements d’enrichissement éprouvés à ce jour. Ce qui ne permet pas d’envisager, au stade actuel de la technologie, sa facile commercialisation au niveau international.

Consécutivement à la forte hausse des prix du minerai de fer, beaucoup de pays (Chine, Nigéria, Kazakhstan, Suède, USA, ...) se sont lancés dans la recherche de solutions de déphosphoration des minerais de fer contenant un taux élevé de phosphore.

Au vu de ces nouveaux éléments :

Une entité dénommée Société Nationale du Fer et de l'Acier, par abréviation "FERAAL SPA". a été créée le lundi 2 décembre 2013 en partenariat entre SONATRACH/Holding AIE (55%), MANAL (25%) et SIDER (20%). Son capital social de départ est de 200 000 000 DA.

Elle a pour objet social l'étude, l'exploitation, le transport, la transformation et la commercialisation du minerai de fer et de ses dérivés issus des gisements de fer Gara Djebilet et de Mechri Abdelaziz.

FERAAL a mis en place une organisation de travail. Elle a fait une synthèse des travaux réalisés jusqu'à ce jour sur le minerai de fer de Gara Djebilet. Elle a préparé un cahier de charges et un projet de contrat avec pour objectif :

- Confirmer les résultats obtenus précédemment avec certains laboratoires étrangers ou nationaux en ce qui concerne l'enrichissement ;
- Réaliser de nouveaux essais à la lumière de nouvelles données techniques ou technologiques. Ces essais doivent permettre de définir le schéma de production le plus adéquat pour le minerai de fer de Gara Djebilet dans toutes ses phases (Exploitation des mines, traitement du minerai, enrichissement du minerai, déphosphoration) ;
- Étudier toutes les possibilités de valoriser le minerai de fer de Gara Djebilet à travers les nouvelles technologies ;
- Étudier les meilleures variantes de transport de ce minerai jusqu'aux portes des usines et jusqu'au port ;
- Étudier l'implantation des différentes unités de production (traitement, enrichissement, déphosphoration).

## **I.9 ETUDE DE RECHERCHE SUR LE MINÉRAI DE FER OOLITHIQUE**

Guerrak, S. 1988, a réalisé une étude des minerais de fer oolithiques, ce travail décrit que la tectonique a montré la genèse du minerai de fer qu'il est oolithique, le contour de ce dit gisement, en outre la diversité minéralogique que peut contenir le gisement de minerai de fer de Gara Djebilet.

La minéralisation est intercalée avec des sédiments argileux à sableux et elle peut être liée à un paléo-environnement d'îlot de barrière, bordé par une lagune intérieure ou un embrassement peu profond et une mer épicontinentale. Pris par les bancs paléozoïques, les sédiments oolithiques montrent une minéralogie marquée principalement par la magnétite, l'hématite, la goéthite, la maghémite, la chamosite (bavalite), la sidérite, l'apatite et le quartz. Trois associations para-génétiques présentent une distribution verticale avec un minerai non magnétisant inférieur, un minerai magnétisé et un minerai non magnétisant supérieur. Trois types de faciès pétrographique ont été définis: un faciès cimenté (FOC); Un faciès détritral (FOD); Et un faciès non détritral (FOND).

Les données chimiques de l'ensemble du champ montrent une différence entre le minerai non magnétisant inférieur (Fe = 54.6%), le minerai magnétisant (Fe = 57.8%) et le minerai non magnétisant supérieur (Fe = 53%). Le minerai magnétisé, qui correspond

principalement au minerai exploitable (degré de coupure à 57%), a la composition suivante:  $\text{SiO}_2 = 4.9\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4.2\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 61.43\%$ ,  $\text{FeO} = 19.2\%$  et  $\text{P}_2\text{O}_5 = 1.8\%$ . Les réserves de minerai économiques calculées correspondantes sont de  $985 \times 10^6$  t, avec 57.8% Fe.

Manieh, A.A., 1984, cette étude montre d'une part, que le minerai de fer oolitique est l'unique dans son genre vis-à-vis ses caractéristiques physicochimique issues de sa genèse, il est sédimentaire, a pris la forme oolitique de 1 mm de taille cimenté par des minéraux de gangue à savoir : silice, argile, dioxyde de titane etc....

D'autre part ce travail vise à obtenir la fraction libérée en mettant en considération : la taille de tiges (corps broyeur), le rapport de masse de tiges / minerai et de temps de séjour de broyage suivi par le calcul de la constante de Bond qui estime les besoins énergétiques du matériel utilisé afin de confirmer la faisabilité de ce travail, reste à dire que ce minerai ne contient pas des éléments nuisibles comme le phosphore et l'arsenic, c'est la raison pour laquelle il a été opté pour la réduction magnétisante qui a pour but de déphosphorer le minerai de fer oolitique de ce dit gisement Waid Fatima. Suivant d'expériences magnétiques de séparation visant à augmenter la teneur en fer du minerai afin que le concentré produit puisse être réduit directement dans un réacteur à lit fluidisé.

Ionkov, K. 2012, l'efficacité de la méthode choisie pour traiter un minerai de fer à haute teneur en minéral utile et phosphoreux à la fois, on parle ici de torréfaction en ajoutant soit du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  soit du  $\text{CaO}$ . Le minerai de fer oolitique est calciné à  $900^\circ\text{C}$  afin de faire séparer la gangue du minerai de fer oolitique, dont le majeur infectieux éléments est le phosphore (p), sa teneur est diminuée après lixiviation d'environ 0.15% sous l'influence de l'acide hydrochlorique ou nitrique pour une fraction de 0.3 mm considérée comme maille de libération, cette étude ce n'est qu'un essai en visant par lequel, l'amoinissement du taux des éléments nuisibles à savoir le phosphore, l'arsenic, l'aluminosilicates etc..., d'une part, d'autre part l'efficacité de la méthode appliquée dite lixiviation.

Obot, O. W., & Anyakwo, C. N. 2012 comme la nature peut intervenir en tant que méthode de traitement à long terme selon le milieu de culture conditionné par des paramètres à savoir : température, profondeur et pression, les *Micrococcus* capte les atomes de fer (Fe) et cadmium (Cd) qui sont prédominants dans le gisement de minerai de fer d'Agbaja du Nigeria, ainsi que le cuivre (Cu), du zinc (Zn) et du manganèse (Mn) sont remarqués comme des éléments mineurs, ces agents microbiens dites magnetotactiques sont capable d'éliminer le phosphore (p) jusqu'à 69.66% en faisant entourer les atomes de fer par pression osmotique en détriment de l'énergie dégagée par le système d'osmose imposé par ces *Micrococcus* afin de poursuivre leur cycle de vie, cette méthode n'est pas faisable dans le secteur économique pour la durée de traitement qui est longue évaluée à quatre semaines, pourtant son importance dans la sauvegarde d'écosystème.

Zhu, D. Q, 2013, la technologie de réduction directe par addition de carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et de séparation magnétique a été développée pour traiter le minerai de fer à haute teneur en phosphore de l'Australie occidentale. Le minerai de fer et le produit réduit ont été étudiés par microscopie optique et microscopie électronique à balayage. On constate que le

phosphore existe dans la limonite sous forme de solution solide, qui ne peut être éliminée par des moyens traditionnels. Lors de la torréfaction de la réduction,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  réagit avec les minéraux de gangue ( $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), formant du phosphate contenant du silicate d'aluminium et endommageant la structure du minerai, ce qui favorise la séparation entre le fer et le phosphore pendant la séparation magnétique.

Pendant ce temps,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  améliore également la croissance des grains de fer, en augmentant la teneur en fer et la récupération de fer. On obtient dans les conditions optimales le concentré de fer, qui donne 94.12% en poids de Fe et 0.07% en poids de P à la récupération du fer de 96.83% et le taux de déphosphorisation de 74.08%. Le produit final (poudre de fer métallique) après briquetage peut être utilisé comme charge pour la fabrication de l'acier par un four à arc électrique pour remplacer la ferraille.

Ionkov. K, 2013, la bonification sert à déphosphoriser le concentré magnétique gravimétrique oolithique en impliquant une combinaison de torréfaction, rebroyage, séparation magnétique et lixiviation à l'eau et à l'acide sont étudiées. La torréfaction a été effectuée à  $900^\circ\text{C}$  pendant 1 h sans ou avec de la chaux ou de l'hydroxyde de sodium comme additifs de torréfaction. Lorsque des additifs ont été utilisés, des phases de ciment de type Si-Al-Na-Ca-O ont été détectées ainsi que la giuseppettite minérale. Pendant le processus thermique, le silicate de sodium est liquéfié et les phases nouvellement formées enrobent les oolithes et pénètrent à l'intérieur des fissures. L'analyse par spectroscopie de dispersion énergétique a indiqué que la zone entourant les oolites se compose de phases de Na, Al et Si avec une partie de phosphore y étant capturée.

En raison de la torréfaction alcaline, la goethite est partiellement transformée en magnétite et cette réduction est renforcée par une augmentation du dosage d'hydroxyde de sodium. L'étude de la redistribution du phosphore montre qu'il ne peut être séparé que partiellement si la lixiviation n'est pas accompagnée d'un rebroyage et d'une séparation physique. La dose recommandée de l'agent réducteur pour le schéma d'écoulement final est de 8% en masse par rapport au concentré. Le broyage à une taille moyenne de 0.040 mm avec l'eau et la lixiviation acide et la double séparation magnétique crée des conditions pour obtenir un concentré de fer de haute qualité avec 65.97% de Fe et une récupération de 92.43%, avec une diminution simultanée de la teneur en phosphore de 0.71% à 0.05 %.

Yang, M 2015, ensuite dans la présente étude, le changement de phase induit par la torréfaction et son influence sur l'élimination du phosphore par lixiviation ont été étudiés pour le minerai de fer à haute teneur en phosphore. Les résultats indiquent que le phosphore dans le minerai est associé à la goethite et existe principalement dans la phase amorphe  $\text{Fe}_3\text{PO}_7$ . Le phosphore reste en phase amorphe après avoir été torréfié en dessous de  $300^\circ\text{C}$ . Le grattarolaite ( $\text{Fe}_3\text{PO}_7$ ) se trouve dans des échantillons torréfiés à  $600\text{-}700^\circ\text{C}$ , révélant que la phase phosphore est transformée de la forme amorphe en grattarolaite cristalline pendant la torréfaction.

Les tests de lixiviation sur le grattarolaite pur synthétisé révèlent un faible taux d'élimination du phosphore par lessivage de l'acide sulfurique. Lorsque la température de torréfaction est supérieure à 800 ° C, le grattarolaite réagit avec l'alumine pour former du phosphate d'aluminium et la réactivité du grattarolaite avec l'alumine augmente avec l'augmentation de la température de torréfaction. Par conséquent, la vitesse d'élimination du phosphore augmente également avec l'augmentation de la température de torréfaction due à la formation de phosphate d'aluminium soluble dans l'acide.

Li, Y. L, Sun, 2012, afin d'exploiter l'hématite oolitique à haute teneur en phosphore, l'élimination du phosphore en torréfaction à réduction directe de l'hématite oolitique à haut phosphore de type Nin xiang avec une teneur en fer d'environ 43.58%, une teneur en phosphore d'environ 0.83% a été étudiée. De réduction et d'élimination du phosphore.

Les résultats montrent que la poudre de fer à réduction directe avec une teneur en fer de 91.35%, 85.12% en récupération, une teneur en phosphore d'environ 0.081% est obtenue à condition que l'agent déphosphorant NCP et le nouvel agent déphosphorisant TS soient utilisés ensemble. On constate que la phase phosphatée n'a pas changé, encore existant sous forme d'apatite après réduction directe, et l'élimination du phosphore est obtenue par séparation magnétique finement broyée.

L'addition d'agent déphosphorisant peut rendre la limite des particules de gangue et des particules de fer métallique deviennent lisses et claires, ce qui est bon pour la dissociation des particules de fer métallique et de la gangue, tandis que l'agent déphosphorisant peut également favoriser la réduction de la fayalite.

XU, C. Y 2012, le minerai d'hématite oolitique à haute teneur en phosphore est l'un des minerais de fer intrinsèques typiques en Chine, et les procédés classiques d'enrichissement se révèlent impraticables pour éliminer efficacement le phosphore du minerai. Un meilleur indice de valorisation a été obtenu par torréfaction à réduction directe avec agent de déphosphorisation suivi de deux étapes de broyage et de séparation magnétique. La teneur en phosphore (P) diminue de 0.82% dans le minerai brut à 0.06% dans le concentré magnétique et la teneur totale en fer augmente de 43.65% à 90.23%, la récupération du fer peut atteindre 87%.

Les mécanismes d'élimination du phosphore dans l'enrichissement du minerai d'hématite oolitique à haute teneur en phosphore par torréfaction à réduction directe avec agent de déphosphoration ont été étudiés par DRX, MEB et EPMA. Les résultats ont montré qu'environ 20% de l'apatite dans le minerai brut transféré dans le phosphore et volatilisé avec le gaz dans le processus de torréfaction de la réduction, alors que le reste 80% apatite n'a pas été impliqué dans la réaction de génération de phosphore et restait comme apatite Dans les produits torréfiés, qui a été enlevé aux résidus par broyage et séparation magnétique.

Une petite quantité de phosphore existait dans le concentré magnétique sous forme d'apatite. La texture oolitique du minerai brut a été en partie modifiée au cours de la torréfaction, ce qui a entraîné la formation de néphéline dans la réaction entre l'agent de déphosphorisation, SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans le minerai brut, ce qui a grandement amélioré le degré

de libération des minéraux dans les produits grillés. À la rectification ultérieure et à la séparation magnétique.

Tang, H. Q. 2010, Une nouvelle méthode (séparation à base de gaz plus séparation par fusion) a été proposée pour éliminer le phosphore du minerai de fer à teneur élevée en phosphore qui était de 1.25% de teneur en phosphore et de 50.0% de teneur en fer. HSC et la théorie de la coexistence de la structure des scories ont été adoptées pour l'analyse théorique.

La réduction gazeuse a été effectuée en utilisant un réacteur à lit fixe et l'échantillon de minerai de 80 g avec une taille moyenne de particules de 2 mm a été réduit en utilisant CO ou H<sub>2</sub> à une température de 1073 K pendant 5 heures. 50 g de l'échantillon réduit avec 3,0% de CaO en tant qu'additif ont ensuite été soumis à une séparation à l'état fondu dans un four électrique à une température de 1873 K sous atmosphère d'Ar. Dans chaque essai, on a effectué SEM, EDS, examen microscopique optique et analyse chimique de l'échantillon de minerai réduit, de l'échantillon de métal et de l'échantillon de scorie.

Les résultats de toutes les expériences de réduction à base de gaz ont montré que les rapports de métallisation du fer étaient d'environ 65% et que les composés du phosphore dans le minerai restaient inchangés. Il a été convenu avec les simulations, sauf que le taux de métallisation du fer était inférieur à la valeur prédite; Cette différence est attribuée à la cinétique.

Les résultats des expériences de séparation à l'état fondu ont montré que la teneur en P dans les échantillons métalliques est de 0.33% (échantillon de métal à partir du produit de réduction H<sub>2</sub>) et de 0.27% (échantillon de métal à partir du produit de réduction de CO). Les rapports de partage du phosphore des deux cas étaient inférieurs aux valeurs prédites. Quelque quantité de phosphore dans les échantillons de métal existant car l'inclusion de scories était considérée comme la raison de cet écart.

Bersi, M. 2010, la région de minerai de fer de Gara Djebilet est l'une des régions les plus importantes d'Afrique. Situé dans la partie sud-ouest de l'Algérie à la frontière avec la Mauritanie, la région de Gara Djebilet est caractérisée par un terrain escarpé, ce qui rend cette zone difficilement accessible.

En raison de ces conditions, les techniques de télédétection et la géophysique sont les meilleurs moyens de cartographier ce minerai de fer. Les formations de Gara Djebilet sont caractérisées par une forte teneur en fer, particulièrement riche en hématite, chamosite et goethite. La forte teneur en fer provoque une bande d'absorption à 0.88 mm, ce que l'on appelle la bande 5 dans les images Landsat 8 d'Imagerie de Terre Opérationnelle (OLI). Dans cette étude, nous avons intégré des données géologiques, des données d'aérogravité et des données de télédétection afin de cartographier la distribution du gisement de fer de Gara Djebilet.

Plusieurs traitements de télédétection ont été appliqués à l'image Landsat 8 OLI, tels que les composites de couleur, le ratio de bande, l'analyse des composantes principales et un index mathématique, ce qui a aidé à localiser la surface de distribution du minerai de fer.

Les résultats des techniques d'interprétation du gradient gravimétrique, de la modélisation bidimensionnelle directe et de l'inversion 3-D des données d'aéro-variance ont fourni des informations sur la distribution 2-D et 3-D du dépôt de fer. La combinaison de la télédétection et de la gravité nous aide à évaluer le potentiel minéral de Gara Djebilet. Le tonnage estimé du minerai de fer à Gara Djebilet est d'environ 2.37 milliards de tonnes avec 57% Fe.

## **CONCLUSION**

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 oolitique, appelée anciennement oolithe par extension. 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.

En 2015 en raison de la faible croissance de la production mondiale d'acier, La hausse continue de l'offre, conjuguée à la chute de la demande, a fait de 2015 une année difficile pour le marché du minerai de fer.

La production mondiale de minerai de fer a atteint 3320 millions de tonnes en 2015, soit une légère diminution par rapport à 2014 (3420 millions de tonnes).

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

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

Le minerai de fer de Gara Djebilet a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des organisations diverses, avec des résultats variables.

IRSID a effectué des essais comparatifs de triage magnétique à faible intensité, par voie humide, avec ou sans grillage magnétisant, réalisés sur les produits du triage magnétique par voie sèche. Les échantillons ont été broyés à 50 µm et soumis à une séparation magnétique par voie humide.

Les essais d'enrichissement du minerai soumis par Kaiser portent essentiellement sur : Triage du minerai brut ; Séparation humide à haute intensité magnétique (SHHIM) ; Frittage magnétique et une réduction directe.

Différents essais de séparation magnétique à voie sèche et à voie humide ont effectués à l'Université de Prague sur les différentes fractions du minerai, suivi de flottation, de triage magnétique ou de broyage. Ces essais ont montré une diminution de la teneur en phosphore.

HYLSA au Mexique se trouvait dans des conditions similaires à l'Algérie, elle n'avait pas de coke comme ressource énergétique mais elle avait en abondance du gaz naturel et elle possédait aussi du minerai phosphoreux mais qui ne dépassait pas le 0.3%.

Rio Tinto a réalisé une simulation sur le minerai tout venant à 0,8% P et du minerai enrichi à 0,5% P pour son éventuelle utilisation au HIs melt (Rio Tinto est détenteur de la technologie). Ce procédé peut être considéré à la fois comme une alternative potentielle aux hauts fourneaux et comme une nouvelle manière de produire de l'acier à bas coûts pour les aciéries à arc électrique. La nouvelle technologie HIs melt est un procédé de fusion à haute intensité.

## **CHAPITRE II**

# **GEOLOGIE ET MINERALISATION DU GISEMENT DE GARA DJEBILET**

## **II. GEOLOGIE ET MINERALISATION DU GISEMENT DE GARA DJEBILET**

### **II.1 PRESENTATION GENERALE**

#### **II.1.1 Domaines géologiques**

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille Sud-Atlasique à savoir : La plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

Les limites naturelles de l'Algérie sont la Mer Méditerranée au Nord (1200 km), le Maroc à l'Ouest, la Tunisie et la Libye à l'Est, la Mauritanie et le Sahara Occidental au Sud-ouest et finalement le Mali et le Niger au Sud. Le méridien d'origine (Greenwich) passe à proximité de la ville de Mostaganem.

Elle couvre une superficie de : 2 381 741 km<sup>2</sup>, notons qu'il est le plus grand pays d'Afrique, du monde arabe et du bassin méditerranéen 1.6 % du totale. Les distances y sont très grandes, environ 2000 km de la côte méditerranéenne au massif du Hoggar et 1800 km d'In Amenas à l'Est jusqu'à Tindouf à l'Ouest. L'Algérie comprend deux domaines principaux sont mis en évidence du Nord au Sud :

1/- Au Nord, l'Atlas Tellien (ou le Tell), domaine varié et très complexe. Cet Atlas Tellien comporte une zone interne et une zone externe formée de terrains allochtones (nappes de charriage). Entre les deux Atlas affleurent les Hautes plaines qui se terminent à l'est par la chaîne du Hodna et se continuent à l'Ouest par la Meseta oranaise et au-delà des Atlas (Haut et moyen Atlas) par la Meseta marocaine, qui se noie dans l'Atlantique.

2/- L'Atlas saharien, forme une longue suite de reliefs orientés NE-SO s'étendant de la frontière Marocaine à celle de la Tunisie. Un domaine méridional, le Sahara, où affleurent les socles précambriens du Hoggar et des Eglab et leur couverture phanérozoïque de la plate-forme saharienne, qui recèle l'essentiel des ressources en hydrocarbures, est un désert formé de grandes étendues de dunes (Erg Oriental et Erg Occidental), de plaine caillouteuses (Regs) et parsemé d'oasis, qui sont autant de centres urbains comme les villes d'El Oued, Ghardaïa et Djanet, la collecte des données géologiques citées précédemment sont représentées sur la figure II.1.

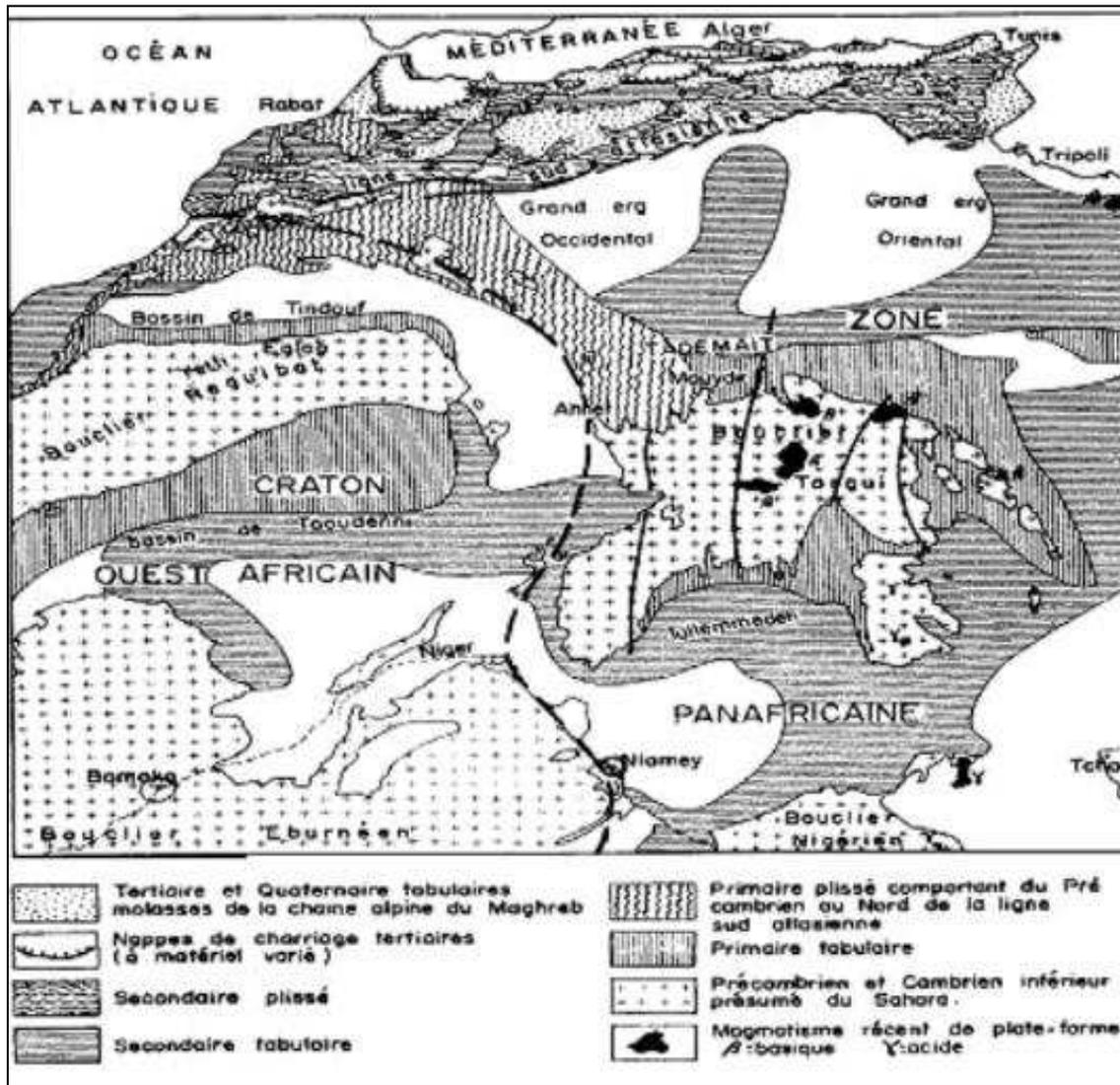


Figure II.1 Carte géologique de l'Algérie (A. Cornet, 1964).

▪ Plate-forme Saharienne

Elle est constituée d'un socle précambrien recouvert de sédiments phanérozoïques transgressifs. Différents éléments tectoniques délimitent des bassins sédimentaires dans lesquels la litho stratigraphie est plus ou moins complète, (Jean FABRE, 2005).

La plate-forme saharienne s'étend sur deux domaines du Nord-Ouest de l'Afrique, qui comprend deux zones de structure et d'histoire géologique différentes (Fabre, 1971). Le craton Ouest-Africain à l'Ouest, stable depuis 2 Ga (Bessoles, 1977), affleure dans la partie orientale de la dorsale Réguibat, il a été soudé avec le domaine panafricain.

La chaîne panafricaine, stable depuis 550 Ma, est située dans la partie centrale et orientale du Sahara Algérien. Le socle de cette zone affleure dans le bouclier Targui (Ouzegane et al. 2003).

Sur le socle précambrien, repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au paléozoïque en plusieurs bassins séparés par des zones hautes. On distingue d'Ouest en Est :

\***Les bassins de Tindouf et de Reggane** situés sur les bordures Nord et Nord- Est du bouclier Réguibat. Leur couverture sédimentaire atteindrait 8000 m dans le bassin de Tindouf (fait l'objet de notre recherche bibliographique), et 6500 m dans celui de Reggane ;

\***Le bassin de Béchar** limité au Nord par le Haut Atlas, au Sud et l'Ouest par la chaîne d'Ougarta, sa couverture sédimentaire atteindrait 8000 m ;

\***Le bassin de l'Ahnet-Timimoun** limité au Nord par le haut fond d'Oued Namous, à l'Ouest par la chaîne d'Ougarta. Au Sud par le bouclier Touareg et à l'Est par la dorsale d'Idjerane M'zab. La couverture serait en moyenne de 4000 m ;

\***Les bassins Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya** sont limités à l'Ouest par la dorsale d'Idjerane-M'zab et à l'Est par la dorsale Amguid-El-Biod. Au Sud, les sédiments paléozoïques affleurent dans le Mouydir. Au Nord, dans la dépression d'Aguemour-Oued Mya, comblée par une puissante série paléozoïque et méso-cénozoïque (5000m à Oued Mya) ;

\***La synclise d'Illizi-Ghadamès** est limitée à l'Ouest par la dorsale d'Amguid- El-Biod et l'Est par le môle de Tihemboka et les confins Tuniso-libyens. Dans le bassin de Ghadamès, la couverture sédimentaire supérieure à 6000 m, (Université, WEC Algérie, 2007), dans la figure II.2, on présente les plus importants basins de la plate forme saharienne.

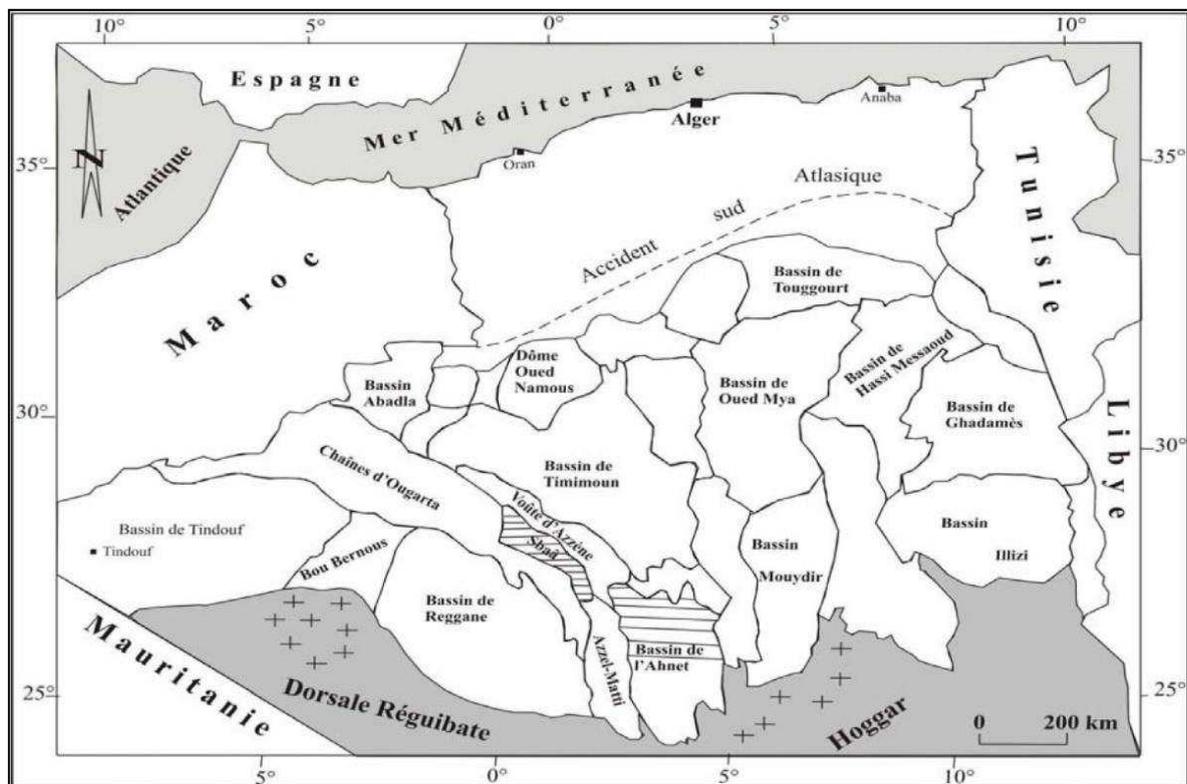
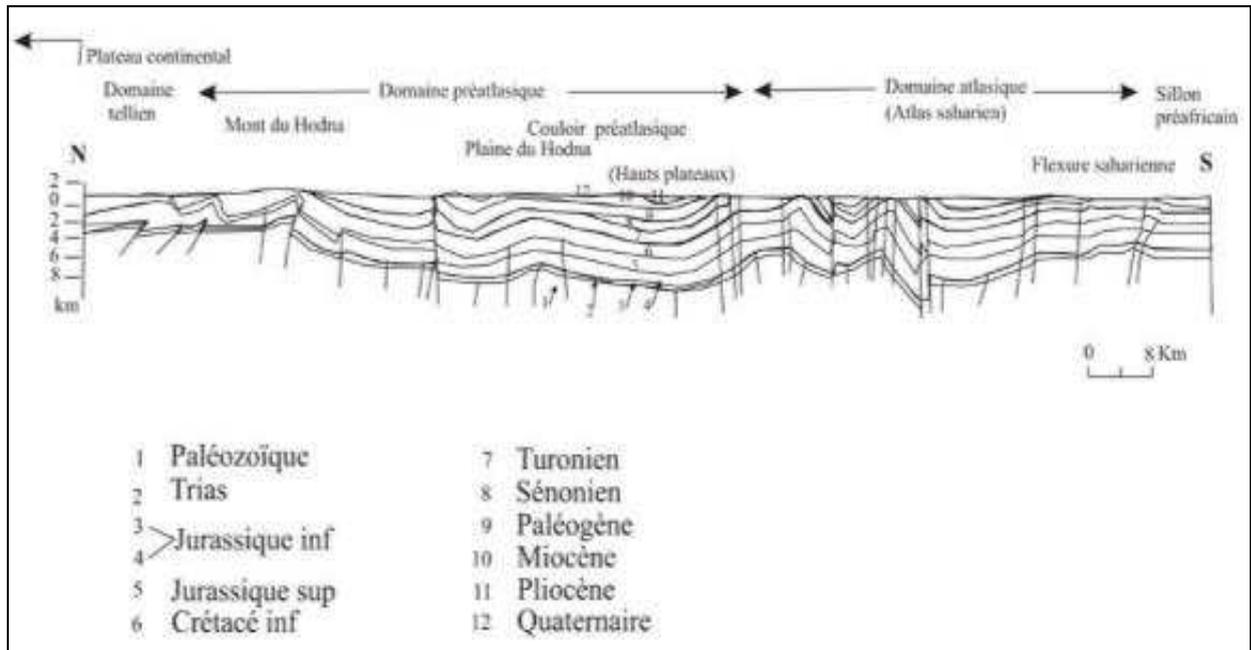


Figure II.2 Les bassins les plus importants de la plate-forme saharienne en Algérie. (Carte SONATRACH, Division Exploration).

On outre, le bassin de Tindouf est représenté par la coupe géologique structurale Nord-Sud sur la figure II.3.



**Figure II.3** Coupe géologique structurale Nord-Sud du bassin de Tindouf, (Guiraud, 1975).

## II.2 SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN DE TINDOUF

Le bassin de Tindouf (figure II.4) 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>. Sous forme d'une dépression dissymétrique orienté ENE-WSW, avec un flanc nord à fort pendage et plissé en relation avec une série de failles complexes de direction globale EW à NE-SW. Tandis que le flanc sud à très faible pendage (3° maximum). Il se situe dans la partie Sud - Ouest du Sahara Algérien. Ce bassin est limité :

- Au Sud, par le massif (Bouclier Réguibat) ;
- Au Nord, par l'Anti-Atlas Marocain, 800 km (dont 540 km en Algérie) ;
- Au Nord-Est, par le faisceau de la Daoura ;
- A l'Ouest par les frontières Algéro-Marocaine et Algéro-Sahraoui ;
- A l'Est, par l'ensellement Krettamia Bou-Bernous large de 200 à 250 km.

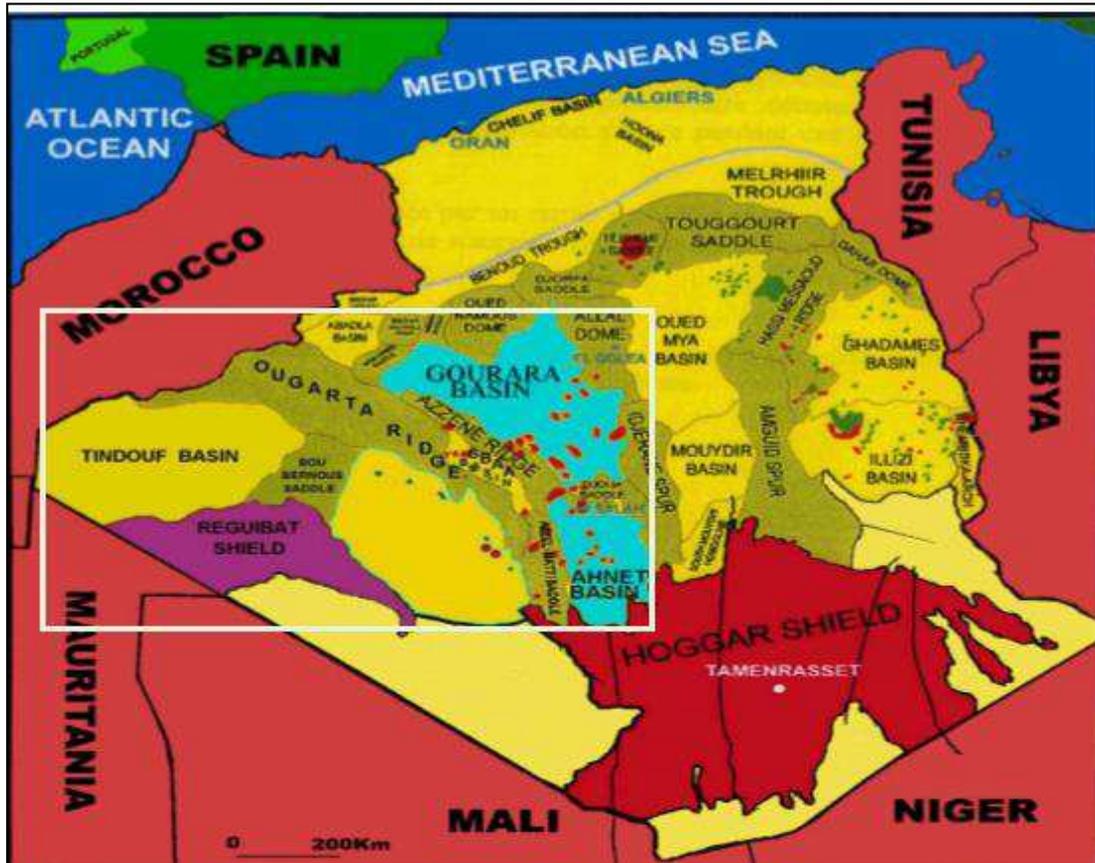


Figure II.4 Carte de situation géologique des bassins de la province occidentale (WEC 2008).

### II.3 STRATIGRAPHIE ET TECTONIQUE

Le bassin de Tindouf qui correspond à une dépression dissymétrique s'appuie en pente douce sur le bouclier Réguibat au Sud, alors que le flanc Nord est fortement redressé vers sa limite Nord, au contact de l'Anti-Atlas marocain. Il s'agit d'un bassin péricratonique qui s'est développé sur la marge Nord du craton Ouest-Africain (Destombeset et al. 1985 ; Bertrand-Sarfati et al. 1990).

Son remplissage sédimentaire s'effectue du Cambrien au Carbonifère, et son épaisseur atteint entre 8000 et 10000 m (SONATRACH, 1987).

Les dépôts, principalement argilo-gréseux, se sont mis en place dans des environnements fluviaux à marins peu profonds. Le Dévonien moyen et le Visé en renferment des niveaux plus carbonatés. La série méso-cénozoïque qui repose en discordance sur le Paléozoïque a une puissance variable qui ne dépasse pas 130 m.

#### II.3.1 Aperçu stratigraphique

##### ▪ Protérozoïque

Au Nord, le bassin de Tindouf repose en discordance majeure sur le socle éburnéen des Eglab par la série schisto- quartzitique de précambrien II, surmonté par le

groupe de Saghro de précambrien II-III qui est essentiellement volcano-détritiques, le groupe de Ouarzazate volcano-détritiques, et argilo gréseuse rouge de précambrien III recouvre l'ensemble protérozoïque. Tandis qu'au Sud, on note l'absence de protérozoïque.

### ▪ Paléozoïque

Le remplissage du bassin de Tindouf est un ensemble essentiellement paléozoïque, recouvert en discordance par les formations Hamadiennes, le plus souvent du Néogène. Le Paléozoïque affleure entièrement au Sud. Par contre au Nord, le Famennien et le carbonifère apparaissent uniquement dans le paysage. Les autres termes du Paléozoïque se trouvent en territoire Marocain, (Amrouche F, Nedjari A, 2004).

### ▪ Cambrien

Dans le Nord du bassin de Tindouf, le Cambrien affleure dans l'Anti-Atlas Marocain où on distingue:

✓ **Cambrien inférieur** débute par la formation des calcaires supérieurs (200 à 400 m), alternance de bancs calcaires et de lits argileux. Cette série contient des Trilobites, qui seraient les plus anciens connus au monde. Surmonté par des schisto - calcaire (300 à 450 m), formée d'une alternance de schistes verts à Trilobites et de calcaires à Archeocyathidés. Le Cambrien inférieur se termine par une formation plus détritique des schistes et grès terminaux (180 à 1000 m), comprenant des grès à Tigillites contenant par endroit des tufs volcaniques. Ces grès sont surmontés par des schistes à Trilobites marquant le passage au Cambrien moyen.

✓ **Cambrien moyen** représenté par une série schisteuse à Paradoxides ou « schistes des Feijas internes » dont l'épaisseur varie de 100 à 500 m. Vers l'Est, la partie supérieure de cette formation devient gréseuse. Cette série est couronnée par la formation des grès de Tabanit, à Paradoxides et Lingules, épaisse de 100 à 150 m. Au centre du bassin de Tindouf, des sondages ont rencontré sous les argiles de l'Ordovicien une série gréseuse (les grès d'El Aroueta) dont l'épaisseur atteint 450 m. Cette série s'amincit du nord au sud et disparaît complètement dans la région des affleurements paléozoïques du flanc sud du bassin de Tindouf. (Chabou. M.C, 2001).

### ▪ Ordovicien

Au nord du bassin de Tindouf, l'Ordovicien est représenté par un ensemble schisto-gréseux, avec de très rares intercalations de calcaires. Son épaisseur dans la région du Dra peut atteindre 2000 m. Il comprend les formations suivantes :

Schistes des Feijas externes dont la base est marqué par les schistes inférieurs de Fezouata (400 m d'épaisseur) composés d'argilites plus ou moins silteuses bleu vert, riches en Graptolites et Trilobites du Trémadocien. Surmonté par les schistes supérieurs de Fezouata (700 m d'épaisseur) formés d'argilites glauconieuses riches en Graptolites caractéristiques de l'Arénigien inférieur. Le sommet de l'Ordovicien inférieur est constitué

des grès et quartzites du Zini (450 m d'épaisseur), correspondant à une formation gréseuse riche en Scolithes.

Une formation débute par un minerai de fer les schistes de Tachilla (500 à 1200 m d'épaisseur), composés d'argilites silteuses micacées à passées gréseuses, riches en fossiles qui indiquent un âge Lanvirnien. Au-dessus on trouve les grès du 1<sup>er</sup>Baní (15 à 400 m), débutant par un épisode d'oolithes ferrugineux, sont à intercalations argileuses. Ils sont riches en Trilobites qui indiquent un âge Landeilien.

Les Graptolites sont rares. Les schistes de Ktaoua (120 à 400 m), sont constitués d'argilites, qui vers l'Ouest et vers l'Est, s'enrichissent en niveaux gréseux riches en faunes (Caradocien). Les grès du deuxième Baní (15 à 100 m), sont de nature glaciaire. Ce sont des grès grossiers, conglomératiques contenant des niveaux marins, qui ont permis de dater cette glaciation à l'Ashgillien supérieur.

Au centre du bassin de Tindouf, quelques sondages ont traversé une série argileuse (Trémadocien inférieur), suivie d'une série grés-argileuse d'âge Arénigien inférieur, qui est surmontée en discordance par une série d'origine glaciaire attribuée à l'Ashgillien supérieur et comprenant un terme inférieur argilo-gréseux et un terme supérieur gréseux (Chabou. M.C, 2001).

### ▪ Silurien

Dans la bordure Sud du bassin de Tindouf, le Silurien est surtout schisto-argileux. Cet ensemble, dénommée "formation de la Sebkha Mahbès" (5 à 120 m) s'étend du Landoverien moyen au Pridolien. Dans le flanc Nord du bassin, la série argileuse s'épaissit et peut atteindre 800 m. Elle est représentée par des argiles à Graptolites avec des intercalations gréseuses, ainsi que des calcaires à Crinoïdes, Orthocères et Lamellibranches.

### ▪ Dévonien

#### \* Dévonien inférieur

Au Nord du bassin de Tindouf, le Dévonien inférieur comprend les deux formations suivantes :

- Un membre argileux (400 m à l'ouest et quelques dizaines de mètres à l'Est), où s'intercalent des niveaux gréseux et des calcaires. Ce membre est daté par des Brachiopodes, Trilobites, Tentaculites et Conodontes qui indiquent un âge Lockhovien Gédinnien, Siegénien, inférieur et moyen).

- Un membre gréseux (700 à 800 m) qui est constitué par des bancs de grès formant des crêtes (les Rich). Ces grès comportent des calcaires fossilifères datés Emsien. On distingue trois Rich d'âge différents (deux de l'Emsien inférieur, le troisième dans l'Emsien supérieur).

Au Sud du bassin de Tindouf, le Dévonien inférieur connu sous le nom de formation de Gara Djebilet est représenté par des grès à intercalations argileuses. Il est divisé en deux membres :

- Le membre inférieur "les grès de Djebilet", est représenté en grande partie par des grès, des grès à intercalations argileuses et des argilites. Ce membre, qui est couronné par le minerai de fer ou par des quartzites noirs, a fourni une faune d'âge Lochkovien.
- Le membre supérieur "les grès supra-minéraux", est constitué essentiellement de grès et se termine avec l'apparition d'argilites à bancs calcaires. La faune indique un âge Emsien.

#### **\* Dévonien moyen**

Dans le Nord du bassin de Tindouf, le Dévonien moyen est constitué par les termes suivants:

- Une formation argilo-calcaire épaisse de 300 m, comportant des schistes à Goniates, des grès et quelques calcaires formant le quatrième Rich. Cet ensemble est daté Eifélien.
- Une formation calcaire d'âge Givétien très fossilifère : Goniates, Arthrodières, Trilobites. La puissance de cette formation est faible (50 à 100 m).

Au Sud de ce bassin, le Dévonien moyen correspondant à la formation de l'Oued Talha, est subdivisé en deux membres :

- Le membre inférieur "les argilites de l'Oued Talha ", est constitué d'un ensemble homogène d'argilites grises, feuilletées, avec des intercalations de bancs de calcaires gréseux riches en Brachiopodes. Ce membre serait d'âge Emsien supérieur à Eifélien.
- Le membre supérieur "les calcaires bioclastiques de la Kerba Tsabia", comporte des calcaires durs et compacts, formant de gros bancs intercalés d'argilites, qui sont très riches en Brachiopodes et Polypiers. L'âge de ce membre est Eifélien à Givétien supérieur.

#### **\* Dévonien supérieur**

Le Dévonien supérieur du nord du bassin de Tindouf, représenté par une puissante série argileuse (les argiles de la plaine du Dra), comprend un Frasnien argileux à intercalations calcaires, un Famennien inférieur entièrement argileux et un Famennien supérieur argileux à intercalations gréseuses et grésocalcaires. L'épaisseur du Dévonien supérieur peut atteindre 3000 m.

Au Sud du bassin de Tindouf, le Dévonien supérieur correspondant à la formation de Kereb En Naga (300 à 220 m d'épaisseur), comprend deux membres :

- Le membre inférieur "les siltites de l'Oued Rhazzal», qui est formé de bancs décimétriques à métriques de grès très fins, alternant avec des argilites grises indurées, l'âge de ce membre serait Frasnien.
- Le membre supérieur "les argilites de l'Oued Slouguia" , qui est constitué par une puissante formation d'argilites grises papyracées, couronnées par des lits de gypses translucides.

### ▪ Carbonifère

Le Carbonifère du flanc Nord du bassin de Tindouf est subdivisé en cinq unités lithostratigraphiques sur la base d'arguments stratigraphiques, lithologique et morphologiques, (Chabou. M.C, 2001).

- Les grès et schistes de Tazoult (111 m d'épaisseur) : ils appartiennent au Tournaisien supérieur. (Hollard, 1970) ;
- Les grès et schistes de la Bétaina (800 m d'épaisseur) : ils sont datés du Viséen inférieur et de la première partie du Viséen supérieur ;

La série de Quartzite, comprend trois membres :

- Les calcaires inférieurs de Quartzite (356 m d'épaisseur), aux polypiers du Visé en supérieur ; Quartzite moyen (111,5 m d'épaisseur) : composé d'argiles et de marno-calcaires dolomitiques avec, localement, des lentilles de gypse massif. Ce membre correspond à la limite Visé en supérieur-Namurien.
- Les Calcaires supérieurs de Quartzite (102 m d'épaisseur), à Giganto-productives et polypiers du Namurien. la série de la Bétaina, de nature continentale, comprend :

A la base, la formation des grès du Djebel Réouina (500 m d'épaisseur), composée de grès, d'argilites et de calcaires. Elle contient de nombreux débris de végétaux terrestres du Namurien.

Au sommet, la formation de Merkala (500 à 700 m d'épaisseur), est constituée essentiellement par une alternance de grès à grains fins, en bancs métriques, et d'argiles rouges. Cette formation contient des fougères caractéristiques du Stéfanien inférieur.

Entre les deux membres précédents, on trouve la formation d'Ouadène, datée du Westphalien, qui est formée de grès dont l'épaisseur maximale atteint 45 m.

### ▪ Cénozoïque

Le Cénozoïque, quant à lui, est représenté dans le bassin de Tindouf par la formation de la Hamada à faciès essentiellement carbonaté associé à des grès et des argiles. Cette formation d'origine continentale affleure dans presque tout le territoire sud-ouest de la plate-

forme saharienne où elle recouvre les formations paléozoïques (Hamada du Draâ). Les dépôts sont attribués au Pliocène. (Madjid Akkouche, 2007).

#### **II.4 MINERALISATION DU BASSIN DE TINDOUF**

Dans le bassin de Tindouf deux gisements de fer ont été identifiés dénommés Gara Djebilet et Mecheri Abdelaziz. Ces gisements sont restés ignorés jusqu'à la fin de 1952, époque à laquelle P. Gevin, géologue principal au service de la colonisation et de l'hydraulique, découvrit celui de Gara Djebilet dans les formations du dévonien inférieur du flanc sud de bassin, à 135 Km au sud-ouest de l'agglomération de Tindouf en levant la carte géologique de la région. Dès le début de 1953, le bureau des recherches minières de l'Algérie a commencé la prospection de gisement dont les réserves sont apparues immédiatement très importantes. En 1971, à 250 Km à l'Est une compagnie de géophysique aéroportée lance la découverte de gisement de fer oolithique de Mecheri Abdelaziz, qui fait partie d'un ensemble d'occurrences minéralisées interstratifiées dans le dévonien du flanc sud de Tindouf, (Georges Matheron, 1955).

Les réserves globales de ces deux gisements constituent dans le Sud Ouest du pays un potentiel minier relativement important qui sont de l'ordre de plus de trois (03) milliards de tonnes de minerai de fer.

Les minerais de fer de ces deux gisements sont considérés comme des minerais acides contenant des teneurs en  $\text{SiO}_2$  relativement élevées, d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 à 5%), de phosphore (0.8%) et d'arsenic (0.03%).

##### **II.4.1 Gisement de Gara Djebilet**

Le gisement de Gara Djebilet est situé à 130 Km au Sud Est de la ville de Tindouf, constitué de trois lentilles occupent le même niveau stratigraphique (base de l'Emsien) et s'alignent selon un axe E-O, parallèlement à la direction de l'ancienne linge de rivage.

Ces trois lentilles, ou Gara que l'on appelle simplement Gara ouest, Gara central (ou Gara Djebilet proprement dite) et Gara Est, sont constituées d'un minerai oolithique, dont la nature sédimentaire n'est mise en doute par personne, « le minerai de la Gara Djebilet est un minerai sédimentaire oolithique, qui a subi des phénomènes d'oxydations, peut-être accompagnés d'actions thermiques ».

Les réserves exploitables de Gara Djebilet sont de l'ordre de 1,7 milliards de tonnes à 57% de fer, localisées dans deux lentilles importantes : une lentille dite " ouest " avec 780 millions de tonnes et une lentille dite " centre " avec 900 millions de tonnes. Le gisement de Gara Djebilet a été reconnu par plus de 200 sondages carottés totalisant 7.000 mètres.

#### II.4.2 Gisement de Mechri Abdelaziz

Le gisement de Mechri Abdelaziz est situé à 400 Km à l'Est de Tindouf et à quelque 250 Km du gisement de Gara Djebilet. Ennoyé dans les dunes de l'Erg Iguidi, Les réserves de Mechri Abdelaziz sont de l'ordre de 700 millions de tonnes de minerai pour une teneur moyenne de 52,45 % Fe. L'estimation des réserves géologiques a tenu compte des compositions minéralogiques moyennes et de la densité des différents constituants. On peut considérer, pour une estimation globale du gisement, que les réserves géologiques totales sont de l'ordre de 2.6 Milliard tonnes de minerai de fer (Matheron 1955).

L'origine du fer (Figure II.5.a et Figure II.5.b), peut être recherchée dans les formations précambriennes de la Dorsale Réguibat qui sont très riches en quartzites ferrugineux : comme par exemple l'Amsaga (Barrère 1967), le Tiffs (Bronner 1975), la Kediat Ijlil (Bronner and Chauvel 1979). On peut alors considérer que le fer contenu dans le Paléozoïque du Sud du Bassin de Tindouf, provient au moins en partie, de l'altération du craton ancien. Après transport, dans des conditions qu'il est impossible de préciser, le fer a précipité, vraisemblablement sous une forme silicatée, dans des édifices deltaïques établis en bordure du craton. Sur l'ensemble du gisement, les teneurs moyennes sont les suivantes: Fe total: 43.49%; SiO<sub>2</sub>=13.66%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=2.31%; CaO=5.35%, (Salah Guerrak, Jean Jacques Chauvel, 1985).

Echelle Stratigraphique				Bassin de Tindouf	
				Sud	Nord
<b>PERMIEN (Autunien)</b>					
<b>CARBONIFERE</b>	Supérieur	Stépahanien			Série de Merkala
		Westphalien (Moscovien)	Sup.		Grès d'Ouadene
			Inf.		
		Namurien	Sup.	Argiles et grès d'Hassi Aoualeoul	Série de Djebel Rouina
		Inf.	Evaporites d'Ain Barka	Série de l'Ouarkziz	
	Inférieur	Viséen	Sup.		
			Inf.	Argiles, grès et calcaires du Kerb es Sefiat	Série de Betaina
		Tournaisien			
			Inf. Sup.	Argiles et grès du Kerb Es Slouguia	Grès de Tazout
	<b>DEVONNIEN</b>	Supérieur	Strunien		Grès de Kerb En Naga
Famennien			Argilites de l'Oued Slouguia		
Frasnien			Siltites de l'Oued Rhazzal		
Moyen		Givétien		Calcaires de la Kerba Tsabia	Calcaires à Ptéropodes
		Eifélien (Couvinien)		Argilites de l'Oued Talha	Argiles à Ptéropodes

Figure II.5.a Lithostratigraphie du bassin de Tindouf, (Aliev et al. 1971; Fabre, 1976).

Echelle Stratigraphique			Bassin de Tindouf		
			Sud	Nord	
DEVONIEN	Inférieur	Emsien	Grès supra-minéraux	Grès du 2 <sup>ème</sup> Rich	
		Praguien	Grès de Djebilet	Argiles et calcaires du 1 <sup>er</sup> Rich	
		Lochkovien			
SILURIEN	Supérieur	Pridolien	Argiles de la Sebkha Mabbes	Argiles à Graptolites	
		Ludlowien			
	Inférieur	Wenlockien			
		Llandovérien			
ORDOVICIEN	Supérieur	Ashgillien	Grès de Rhezziane	Grès du 2 <sup>ème</sup> Banu	
		Caradocien	Argiles d'Aroueta	Grès de Roud Aissa Schistes de Ktaoua Grès du 1 <sup>er</sup> Banu	
		Llandeilien		Argiles de Tachilla	
	Llanvirnien	Schistes des Feija externes		Grès de Zani Schistes de Fazouata supérieurs Schistes de Fazouata inférieurs	
	Arénigien				
	Trémadocien				
CAMBRIEN	Supérieur	Grès d'Aroueta supérieurs Grès d'Aroueta inférieurs	Grès de Tabanit	Grès à Lingules Schistes à Paradoxides	
	Moyen		Grès de Tikirt	Grès terminaux Schistes de base	
	Inférieur			Calcaires à Archeocyathidés Groupe de Tata (Adoudounien)	
NEOPROTEROZOÏQUE				Groupe de Ouarzazate (PIII) (Série volcano-détritique et argilo-gréseuse rouge) Groupe de Saghro (P II-III) (Série volcano-détritique) Précambrien II (Série schisto-quartzitique)	
	<b>PALEOPROTEROZOÏQUE</b>			<b>SOCLE DE REQUIBAT (EBURNEEN)</b>	

Figure II.5.b Lithostratigraphie du bassin de Tindouf, (Aliev et al. 1971; Fabre, 1976).

### II.4.3 Structure du bassin

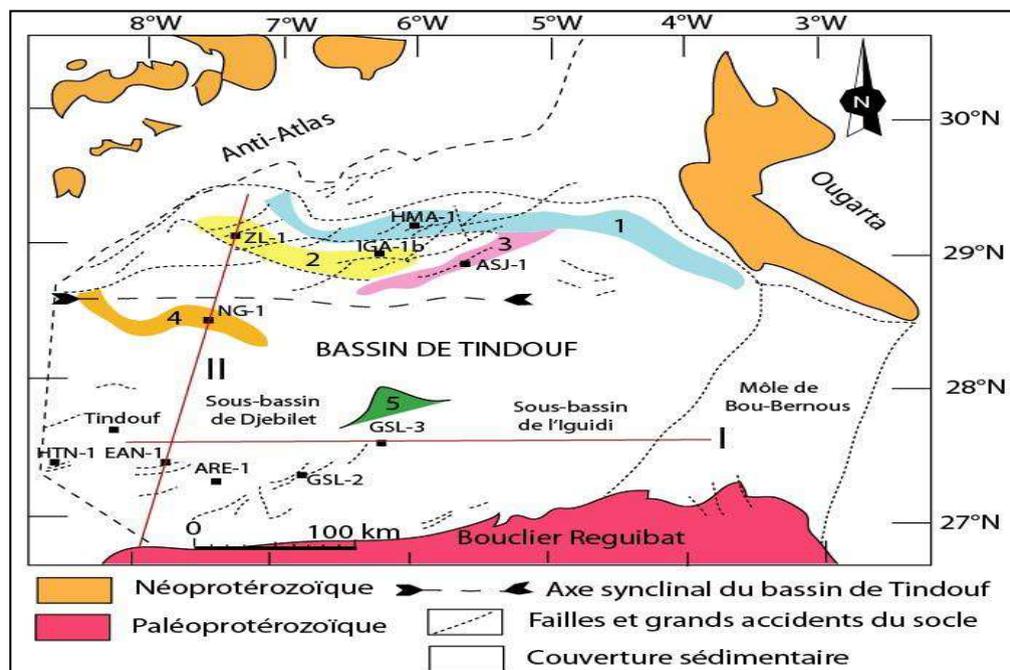
Le bassin de Tindouf (Figure II.6), s'est individualisé à la fin du Paléozoïque (Carbonifère supérieur). Sa bordure sud est monoclinale à faible pendage (1 à 2° Nord en moyenne). La structure de cette bordure est caractérisée par la présence de trois môles ou zones hautes (Aouinet, Laroussi et Bou Bernous) séparées par les sous-bassins de Djebilet et de l'Iguidi. Le sous-bassin de Djebilet est peu profond, tandis que celui de l'Iguidi a été fortement subsident. Quelques failles de direction OSO-ENE ou SO-NE recoupent l'ensemble du Paléozoïque et sont injectées de dolérites.

La bordure nord du bassin est très redressée contre l'Anti-Atlas marocain. Le pendage des couches varie de 8 à 12°. La série paléozoïque est ici fortement plissée. Les plis, lourds dans l'Ordovicien, plus souples et nombreux dans le Dévonien, forment la grande zone anticlinale de Zémoul-Adim Filou.

Cette zone, affectée par de nombreuses failles (dont certaines s'étendent sur une distance dépassant 150 km et avec des rejets de l'ordre de 200 à 400 m), contient des sills et des dykes doléritiques.

Dans la partie ouest de la zone anticlinale Zémoul-Adim Filou, la direction des plis et des failles est NO- SE, c'est à dire parallèle à la chaîne d'Ougarta. A l'est, la direction est OSO-ENE, c'est-à- dire proche de celle de l'Anti- Atlas.

La présence de cette zone subsidente et fortement plissée au nord du bassin de Tindouf, serait dû à l'existence en profondeur d'un accident majeur du socle (décrochement) de direction ENE, (Chabou. M.C, 2008).



**Figure II.6** Carte des principaux éléments structuraux du bassin de Tindouf. (Aliev et al. 1971; Chabou. M.C, 2008).

## II.5 EVOLUTION GÉODYNAMIQUE DU BASSIN MINIER DE TINDOUF

L'évolution des bassins sédimentaires intra-cratoniques de la plate-forme saharienne s'inscrit dans celle du contexte géodynamique général du continent africain (Bumby, A.J. R. Guiraud 2005).

L'évolution géodynamique du bassin de Tindouf a été déterminée par sa position entre la dorsale Réguibat 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 (figure II.7 et II. 8):

**II.5.1 Orogenèse Panafricaine :** qui est le résultat de la collision entre le craton ouest africain à l'ouest et une zone mobile à l'Est. Cette orogenèse aurait provoqué la création et la réactivation dans le socle des failles de direction N-S ;

**II.5.2 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 ;

**II.5.3 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 BouBernous, séparés par les sous bassins de Djebilet et de l'Iguidi ;

**II.5.4 Mouvements Hercyniens Majeurs :** de la fin du Paléozoïque, ont provoqué dans la plate-forme saharienne des déformations épigéniques qui sont responsables de la structuration des bassins comme celui de Tindouf. Ces mouvements seraient aussi responsables du plissement intense qui a subi les formations paléozoïques du flanc nord du bassin de Tindouf, (Chabou. M.C, 2001).

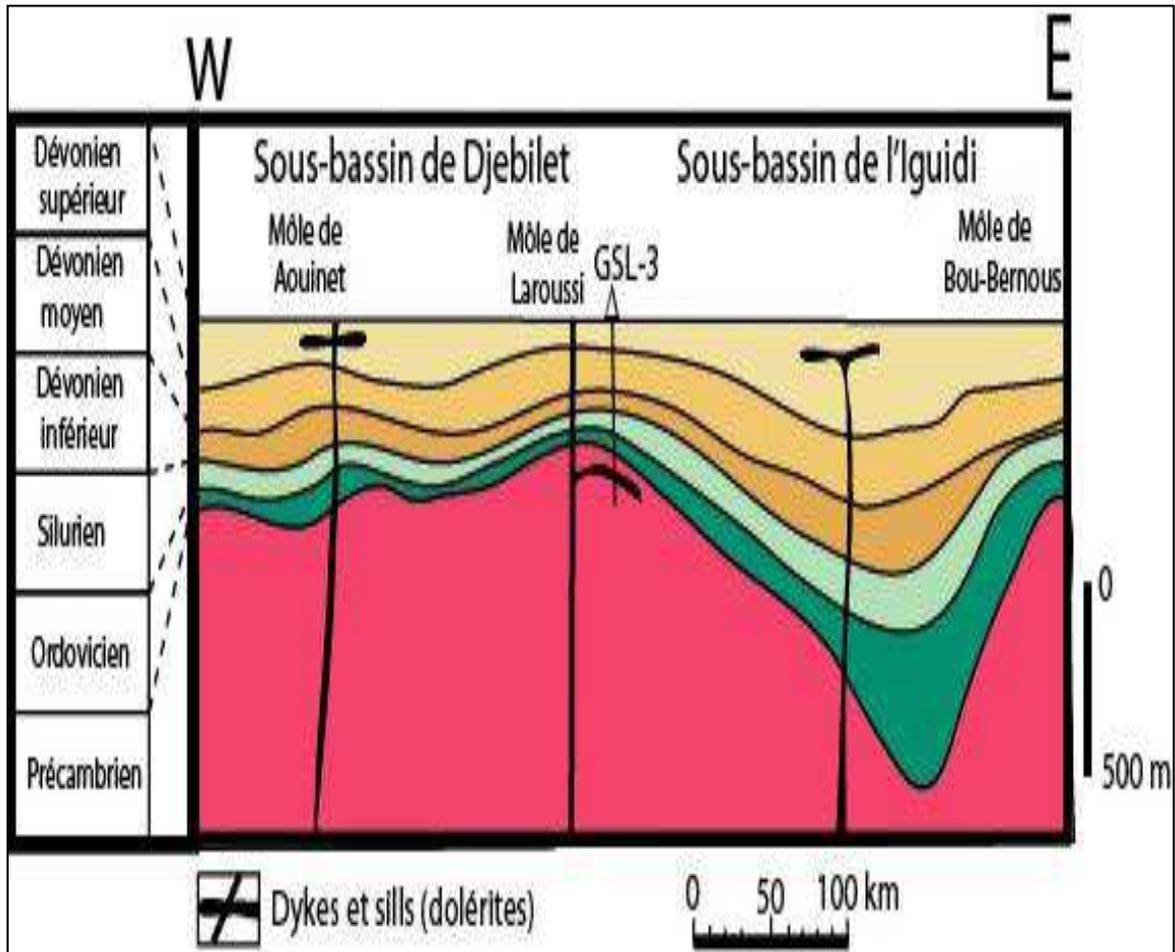


Figure II.7 Coupe stratigraphique E-W de la région du flanc sud du bassin de Tindouf. (Chabou. M.C, 2008).

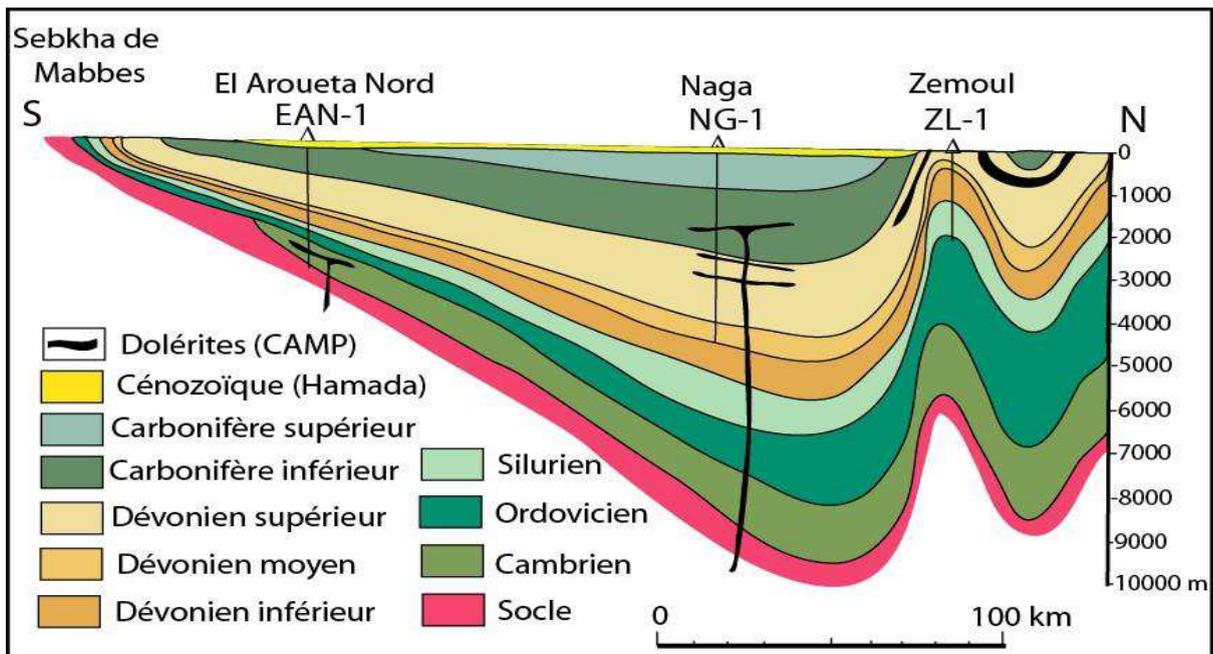


Figure II.8 Coupe stratigraphique N-S de la partie occidentale du bassin de Tindouf. (Chabou. M.C, 2008).

La série paléozoïque du bassin de Tindouf a connu des intrusions doléritiques affectant les formations du Cambrien et tout particulièrement le Fammenien. Ces dolérites sont à relier à des phénomènes de tectonique globale caractérisant le craton ouest-africain, qui avait subi d'importants épisodes d'émissions doléritiques en réponse à l'ouverture de l'Atlantique central datée Trias-Jurassique, Sur le flanc nord du bassin de Tindouf se manifeste en affleurement un très beau système gabbro-doléritiques, de 200 Km d'est en ouest, et de près de 150 km du nord au sud (en tenant compte du flanc sud de l'Anti-Atlas au Maroc), Il se présente sous forme de sills d'épaisseur varient de dizains jusqu'à quelques centaines de mètres, ces injections s'interstratifiés dans les formations allant de l'Emsien au Viséen supérieur.

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. Ces sills présentent la forme la plus répandue dans cette zone. Sur le flanc sud du bassin ces manifestations sont rares et souvent injectées dans les formations argileuses du Fammenien, d'autres affleurent à l'est dans la région de Bou-Bernous.

D'autres formes de ce magmatisme sont des dykes, dans le flanc nord sont orientées NE-SO recoupent les formations de l'infra-cambrien jusqu'au carbonifère continentale, leur épaisseur varie de 10 à 15 m. Plus au sud, les dykes correspondent à les formes les plus répandus, généralement peu épais (1 à 10 m), dans un triple faisceau orienté OSO-ENE dans la série paléozoïque, ce magmatisme est en relation avec une famille de faille de direction NE-SO, et ENE-OSO.

Dans le flanc nord des 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 (*Chabou.2001*). Ces cheminées sont probablement connues sur le flanc sud en massifs intrusifs.

Tous les sondages effectués dans le bassin recoupent les roches magmatiques mésozoïques, leur nature intrusive prouvée par le métamorphisme de contact qui est développé au contact des roches encaissantes.

## **II.6 PRESENTATION DU GISEMENT**

Le minerai de fer oolithique du champ Gara Djebilet se produit dans les sédiments du Dévonien précoce du bassin de Tindouf (Sahara algérien), en particulier dans la formation de la Haute-Djebilet de l'âge Praguien. La minéralisation est inter-stratifiée avec argileuse de sédiments sableux et il peut être lié à un paléo-environnement d'île-barrière, bordé par un lagon intérieur ou échancrure peu profonde et une mer épicontinentale. Pris au piège par des bancs du Paléozoïque, les sédiments oolithiques montrent une minéralogie marquée principalement par la magnétite, l'hématite, goethite, maghémite, chamosite (bavalite), sidérite, l'apatite et de quartz.

Trois types de faciès pétrographiques ont été définis: un faciès cimentés (FOC); un faciès détritiques (DOM); et un faciès non détritiques (FOND). Les données chimiques pour l'ensemble du domaine montrent une différence entre le minerai inférieure non magnétique (Fe : 54.6%), le minerai magnétique (Fe : 57.8%) et de la haute teneur en minerai non-magnétiseuse (Fe : 53%). Le minerai magnétique, qui correspond essentiellement au minerai exploitable (de teneur de coupure de 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%. Les réserves de minerai correspondantes calculées économiques sont 985×106T, avec 57.8% de Fe (Guerrak, Salah. (1988).

Le minerai de Gara Djebilet est un minerai sédimentaire oolithique ayant plus ou moins subi des phénomènes d'oxydation. Les oolithes sont constitués par la sidérose et le chlorite. C'est un minerai acide contenant des teneurs en SiO<sub>2</sub> élevées, d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4 à 5%), de phosphore (0.8%) et d'arsenic (0.03%).

Les principaux éléments qui ont empêché l'exploitation du minerai de fer de Gara Djebilet depuis sa découverte en 1952 à ce jour sont nombreux : sa haute teneur en phosphore et sa forte gangue acide qui font qu'il n'est pas considéré comme un minerai marchand, et de ce fait il nécessite un traitement pour réduire le phosphore et pour son enrichissement ; l'inexistence de moyen de communication entre le gisement et les principaux ports du pays qui auraient permis son exportation ; l'inexistence de ressources hydriques ; la région est une zone désertique et de ce fait il n'existe pas de tissu industriel, il faut transporter ce minerai au nord du pays sur une distance de plus de 1000 km pour pouvoir le traiter.

La figure II.9 et la figure II.10 montrent une vue générale du gisement de fer et la situation géographique du gisement de Gara Djebilet- Tindouf.



Figure II.9 Vue générale du gisement de fer, Gara Djebilet, (Algérie-Focus. 2013/12).

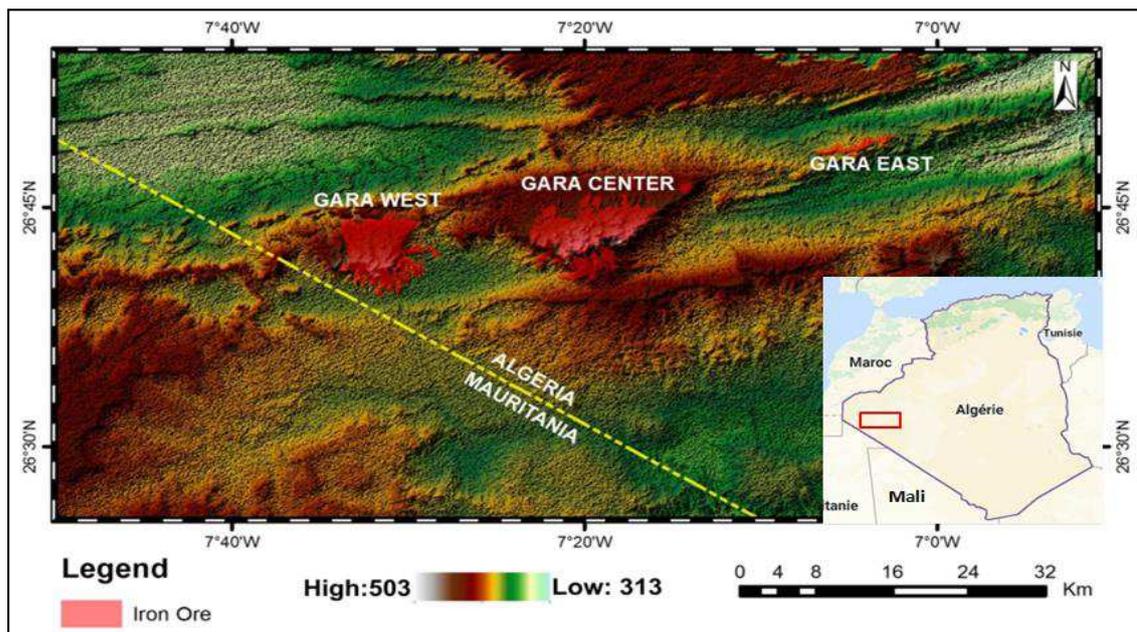


Figure II.10 Situation géographique du gisement de Gara Djebilet, (Bersi, M., Saibi, H, 2016).

## II.7 RESERVES

Les réserves globales de ces deux gisements constituent dans le sud ouest du pays un potentiel minier relativement important qui sont de l'ordre de plus de trois (03) milliards de tonnes de minerai de fer. Les réserves exploitables de Gara Djebilet sont de l'ordre de 1.7 milliards de tonnes à 57 % de fer, localisées dans deux lentilles importantes : une lentille dite " ouest " avec 780 millions de tonnes et une lentille dite " centre " avec 900 millions de tonnes.

Les réserves de Mechri Abdelaziz sont de l'ordre de 700 millions de tonnes de minerai pour une teneur moyenne de 52.45 % Fe.

▪ **Lentille Ouest**

- Réserves en magnétite sont de 380 millions de tonnes avec une teneur moyenne de 58% en fer.
- Réserves en hématite sont de 400 millions de tonnes avec une teneur moyenne en fer de 56.6%.

▪ **Lentille centre**

- Réserves en magnétite : 380 millions de tonnes à une teneur moyenne de 57.6% en Fe.
- Réserves en hématite 520 millions de tonnes avec une teneur en fer supérieure à 50%.

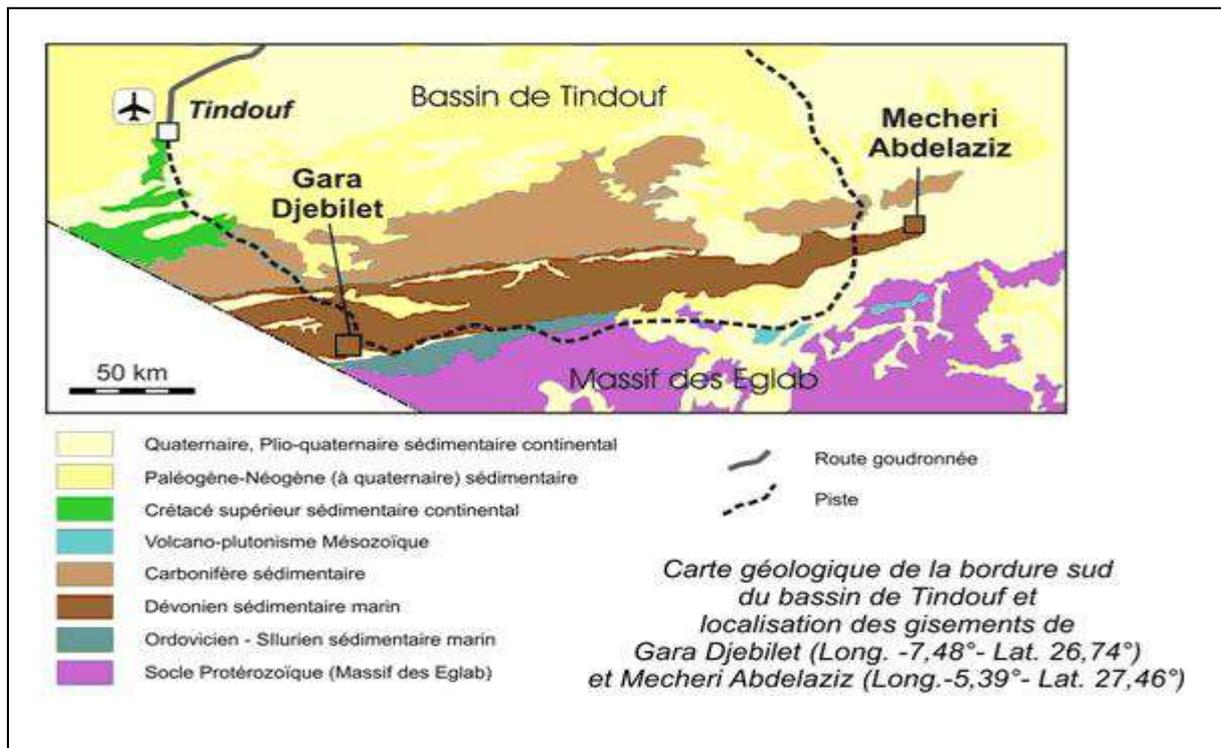
## **II.8. GEOLOGIE ET MINERALISATION DU GISEMENT**

### **II.8.1 Géologie du Gisement de Gara Djebilet.**

Le gisement de Gara Djebilet est constitué de trois couches de minerai superposées :

- **Couche du Mûr** : le minerai est oolithique, non magnétique, d'épaisseur très variable pouvant dépasser les 10 mètres. La teneur en fer de cette couche varie entre 40 et 57 % et atteint exceptionnellement les 58 %.
- **Couche Intermédiaire** : le minerai est oolithique, magnétique et souvent lité. Dans le gisement centre, la teneur moyenne en fer dépasse les 57 %, elle atteint les 58 % dans le gisement Ouest et 63 % dans ses parties les plus riches.
- **Couche du Toit** : le minerai est oolithique, non magnétique. Bien que parfois localement élevée, la teneur moyenne en fer sur toute la puissance de cette couche dépasse rarement les 50 %. Le toit du corps minéralisé est représenté par d'épaisses séries gréseuses de l'Eifelien et débute par une lumachelle continue. Cette dernière est parfois au contact du minerai, mais en est souvent séparée par quelques décimètres de pélites, d'argiles et de quartzites dépourvues de fossiles (Perrin 1994).

La carte géologique de la bordure sud du bassin de Tindouf et localisation du gisement de fer. Gara Djebilet sont représentées sur la figure II.11.



**Figure II.11** Carte géologique de la bordure sud du bassin de Tindouf et localisation du gisement de fer. Gara Djebilet. (Site web, ANAM).

## II.8. 2 Minéralisation du gisement de Gara Djebilet Tindouf

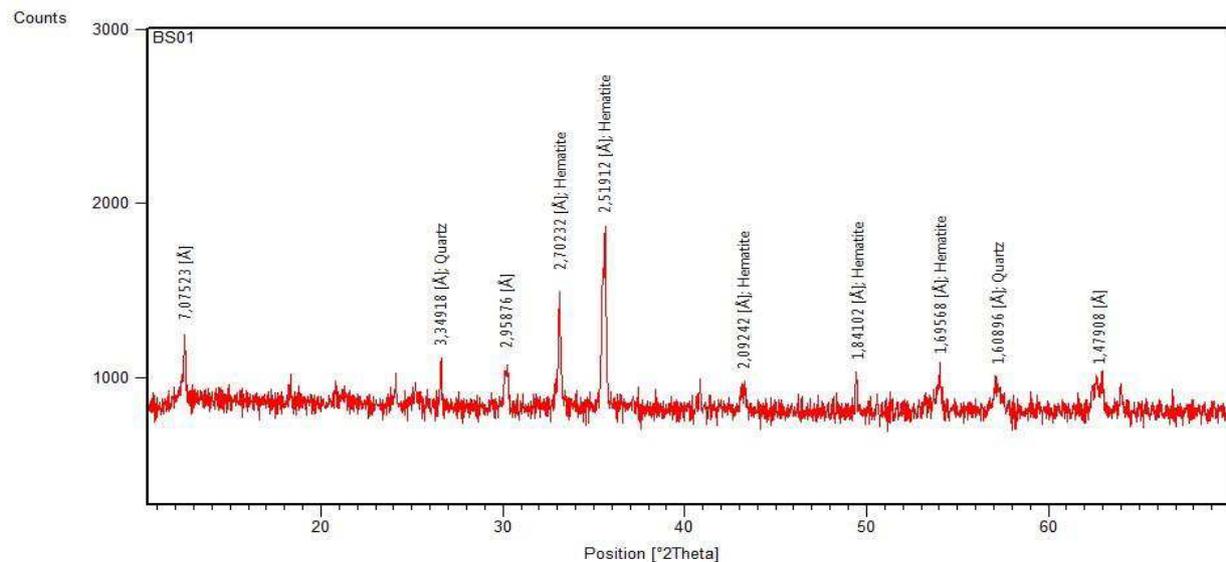
Le minerai de Gara Djebilet est composé de nombreux minéraux ferrifères dont la magnétite, la maghémite; (magnétite altérée), l'hématite, la goethite, la chamosite, la sidérite, la martite et la pyrite. L'apatite (phosphate de calcium) et la crandallite (minéral phosphaté) sont les deux minéraux non ferrifère 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.

## II.9 CARACTERISTIQUES DU MINERAI DE FER DU GARA DJEBILET TINDOUF

Les minerais de fer de Gara Djebilet sont considérés comme des minerais acides contenant des teneurs en  $\text{SiO}_2$  relativement élevées, d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 à 5%), de phosphore (0.8 %) et d'arsenic (0.03 %). Depuis la découverte de ces gisements, de nombreux travaux de recherche et d'études ont été effectués par le BRMA (Bureau de Recherche Minière Algérien en 1953), par le BIA (Bureau d'Investissement en Afrique en 1959) et enfin le SERMI (Service d'Etudes et de Recherches Minières en 1961). Après l'indépendance, plusieurs études ont été dirigées par la SONAREM avec des partenaires étrangers ayant une notoriété internationale dans le domaine minier (LKAB - Suède, IRSID - France, TEMPO & KAISER ENGINEERING - USA, INSC - Japon et KLOCKNER-RFA).

### II.9.1 Caractéristiques minéralogiques du minerai de fer de Gara Djebilet

Les résultats de l'analyse par diffraction des rayons X et l'analyse au microscope électronique à balayage montrent que le minerai de fer de Gara Djebilet est principalement constitué de la maghémite, la magnétite, l'hématite et la limonite tandis que la gangue du quartz et, occasionnellement, des minéraux en traces tels que le zircon et le rutile comme le montre la figure II.12.



**Figure II.12** Analyse par DRX de l'échantillon représentatif du minerai de fer de gisement de Gara Djebilet – Tindouf

#### ▪ Magnétite et Maghémite

Ils se présentent individuellement ou coexistent se trouvent sous 2 formes d'agrégation:

- ✓ Agrégats oolithiques où les oolithes sont ovales ou rondes, de diamètre allant de 0.15 à 0.6 mm. La plupart des oolithes ont des structures alternées d'arrangement de bandes de minéraux de fer (avec ou sans noyaux) et de gangue. Généralement, le taux de minerai de fer dans les oolithes est entre 40 et 90%.
- ✓ Agrégats irréguliers composés de particules de chamosite ou de fragments de quartz avec une taille de grains de 0.1 à 0.4 mm.

L'hématite se distingue de la maghémite par sa forme aciculaire ou sphéroïdique. Dans les deux formes l'hématite a une taille de cristal fine (0.05 à 0.15 mm) et croit entre le chamosite et quartz.

- **Limonite**, de distribution et de formes irrégulières, remplace la maghémite ou apparaît comme un noyau d'oolithes dans la maghémite. Elle est constatée dans les agrégats de chamosite. La taille des grains de limonite est généralement comprise entre : 0.05 à 0.25 mm.
- **Chamosite**, est présente dans le minerai sous forme de ciment, sa taille varie de 0.1 à 0.4 mm.

- **Quartz** se présente sous forme de particules irrégulières, peu ou sporadiquement diffusées parmi les particules de minerai de fer oolithiques.

A partir de la diversité minéralogique du minerai de fer de Gara Djebilet, la composition minéralogique est présentée dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** Composition minéralogique du minerai de Gara Djebilet

Minéral	Magnétite	Maghémite	Hématite	Limonite	Quartz	Chamosite	Colophane	Autres
%	16.9	34.5	18.1	8.2	4.8	15	2.3	0.2

## II.10 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Les minerais magnétiques, constituants essentiels de la couche utile telle qu'elle est définie ont fait l'objet de nombreuses études de laboratoire.

### 1. Aspect physique

Le minerai magnétique de Gara-Djebilet est un minerai oolithique, poreux, de teinte foncée, noir bleuté lorsqu'il est particulièrement riche noir verdâtre lorsqu'il contient de la chlorite, brun-noir ou noir rougeâtre lorsqu'il contient de l'oligiste. Parfois gris et moins magnétique, il contient alors davantage de sidérose et d'apatite.

### 2. Densité- Porosité-Humidité

**a) Densité apparente :** C'est la densité du minerai en place, compte tenu des vides en relation avec la porosité.

Des mesures ont été faites sur divers échantillons, par immersion dans le mercure. Compte tenu des résultats de laboratoire et de divers essais faits au chantier, on peut conclure :

La densité "apparente" des minerais magnétiques gisement Centre, varie entre 3.5 et 4.3 suivant la teneur, la densité moyenne étant très voisine de 3.8 pour un minerai à 57 %.

Pour les minerais magnétiques du gisement Ouest, la densité varie entre 3.2 et 3.9, la densité moyenne étant voisine de 3.5 pour un minerai à 58 %.

**b) Densité vraie:** C'est la densité propre du minerai, abstraction faite de sa porosité. Elle varie pour les minerais magnétiques, selon la richesse en fer, entre 4 et 4.8 sur le gisement Centre, entre 4 et 4.4 sur le gisement Ouest.

### Porosité

La porosité a été mesurée sur divers échantillons; elle varie considérablement d'un point à un autre suivant la composition des minerais, les minerais magnétiques à haute teneur, pauvres en chlorite et en carbonate étant particulièrement poreux (19 à 26 %), les minerais chloriteux ou carbonatés l'étant moins (6 à 11 %). La porosité moyenne paraît être de l'ordre de 15 % pour les minerais magnétiques du gisement centre, 18 % pour ceux du gisement Ouest.

### Humidité

De ces résultats on peut déduire la teneur en eau contenue dans le minerai en supposant que tous les pores sont remplis d'eau. Le calcul montre que cette teneur sera comprise entre 2 et 8 %.

### **Conclusion**

- 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.
- Dans le bassin de Tindouf deux gisements de fer ont été identifiés dénommés Gara Djebilet et Mecheri Abdelaziz. Les réserves globales de ces deux gisements constituent dans le Sud Ouest du pays un potentiel minier relativement important qui sont de l'ordre de plus de trois (03) milliards de tonnes de minerai de fer.
- Le bassin de Tindouf qui correspond à une dépression dissymétrique s'appuie en pente douce sur le bouclier Réguibat au Sud, alors que le flanc nord est fortement redressé vers sa limite nord, au contact de l'Anti-Atlas marocain. Il s'agit d'un bassin péricratonique qui s'est développé sur la marge nord du craton ouest-africain
- 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. L'apatite (phosphate de calcium) et la crandallite (minéral phosphaté) sont les deux minéraux non ferrifère importants relevés. Le phosphore, se localise principalement dans l'apatite authigène, mais aussi dans la crandallite et la florencite
- Le minerai de Gara Djebilet est un minerai sédimentaire oolithique ayant plus ou moins subi des phénomènes d'oxydation. Les oolithes sont constitués par la sidérose et le chlorite. C'est un minerai acide contenant des teneurs en SiO<sub>2</sub> élevées, d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4 à 5%), de phosphore (0.8%) et d'arsenic (0.03%).
- l'analyse par diffraction des rayons X montrent que le minerai de fer de Gara Djebilet est principalement constitué de l'hématite, quartz.

## **CHAPITRE III**

# **CARACTERISATION PHYSICO- CHIMIQUE DU MINERAL DE FER DE GARA DJEBILET**

### III CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU MINERAI DE FER DE GARA DJEBILET

#### III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre décrit l'ensemble des techniques pour caractériser les différents échantillons prélevés du minerai de fer de Gara Djebilet Tindouf, en vue d'en établir la composition minéralogique et chimique du minerai.

La caractérisation conventionnelle est généralement basée sur l'analyse de plusieurs paramètres chimiques et physiques. La caractérisation par l'approche minéralurgique repose principalement sur la distribution dans les différentes fractions granulométriques, sur l'identification de leur composition minéralogique, ainsi leur degré de libération (Minéral utile -gange). La figure III.1 représente les différentes étapes pour la caractérisation du minerai.

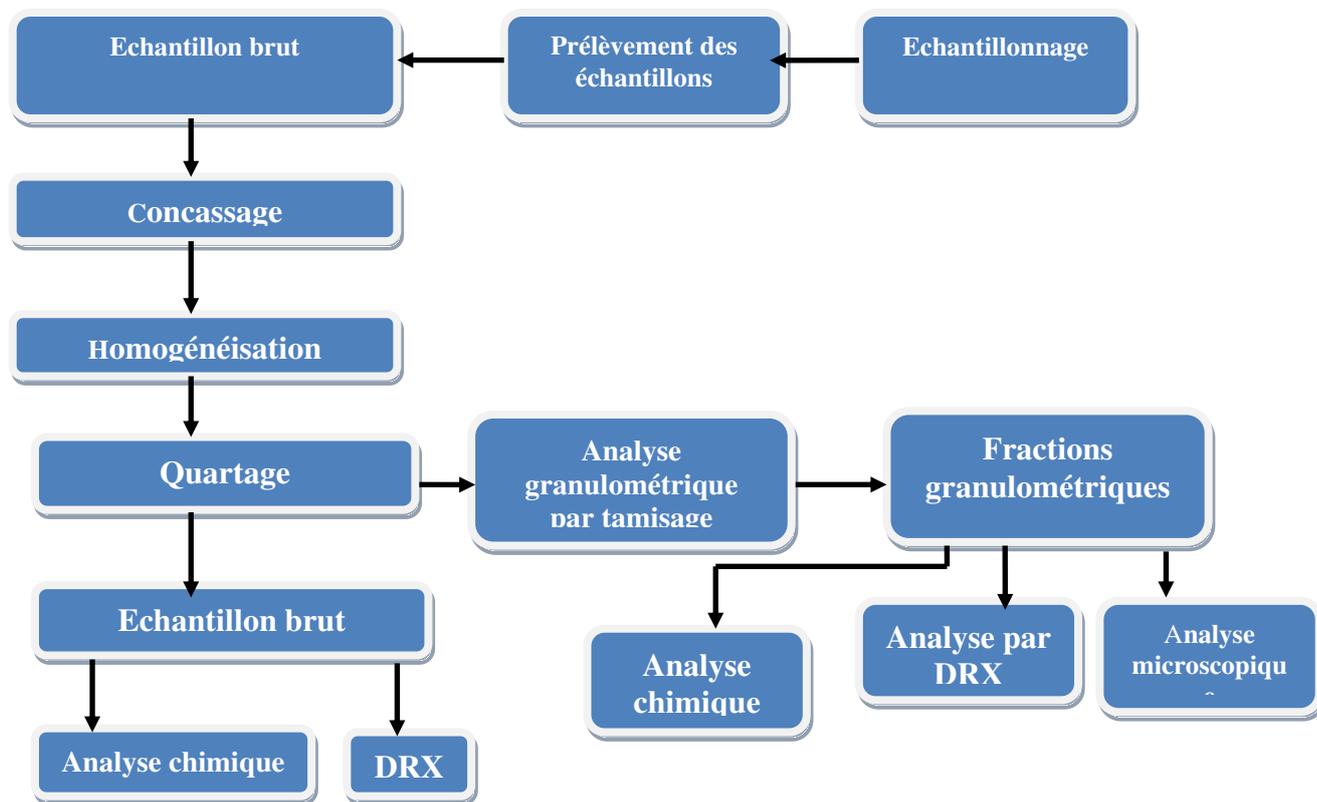


Figure III.1 Protocole de caractérisation du minerai de fer de Gara Djebilet.

### **III. 2 ECHANTILLONNAGE**

L'échantillonnage consiste essentiellement à tirer des informations d'une fraction d'un grand groupe ou d'une population, de façon à en tirer des conclusions. Son objet est donc de fournir un échantillon qui représentera la population et reproduira aussi fidèlement que possible les principales caractéristiques de la population étudiée.

L'analyse est une recherche d'informations, de renseignements ; c'est en quelque sorte une enquête. Il peut y avoir des enquêtes exhaustives comme celle du recensement d'une population, mais la plupart des enquêtes se font par sondage ; c'est une technique statistique où l'on travaille sur un sous ensemble de la population sur un échantillon. Cet échantillon peut être désigné par hasard ou en fonction de caractéristiques particulières ; mais sa vocation est de représenter le mieux possible l'ensemble qu'on veut connaître (Claude Paycheng Orstom 1997).

Les principaux avantages de la technique d'échantillonnage par rapport à un compte complet sont le moindre coût, la rapidité, la portée et la précision accrue. Tous ceux qui soutiennent que le seul moyen d'obtenir des informations exactes sur une population est de faire un recensement exhaustif oublient que les sources d'erreurs sont nombreuses dans un dénombrement complet et qu'un recensement à cent pour cent peut non seulement être faussé par un grand nombre d'erreurs, mais être pratiquement irréalisable. En effet, avec un échantillon on peut obtenir des résultats plus exacts car il est plus facile de contrôler les sources d'erreurs liées à la fiabilité.

La stratégie d'échantillonnage est basée sur le volume d'échantillon, le nombre d'échantillons, et la sélection de stations d'échantillonnage (nombre, position et positionnement). La représentativité des échantillons dépend en grande partie des choix qui sont faits (Gosselin et al, 1999).

Quelle que soit la précision des méthodes analytiques utilisées, si l'échantillon n'est pas représentatif, l'évaluation et les conclusions qui en seront tirées risquent de ne pas être en adéquation avec le lot à étudier (Hoenig et Thomas, 2002 ; Nicolas, 2006 ; Tshamala ,2008).

### **III.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

La granulométrie a pour objet la mesure de la taille de particules élémentaires ou de grains. Les méthodes qui permettent cette mesure doivent être reproductibles; c'est pourquoi elles suivent des normes strictes. Ces méthodes sont le tamisage, les méthodes optiques, le tri par fluide ou les méthodes électriques.

- Le tamisage à sec (> 100µm)
- Le tamisage sous eau (> 30µm)
- La sédimentation (1 à 100µm)
- La centrifugation (0.1 à 20µm)

- La diffraction laser (0.02 à 2mm)
- La microscopie optique ( $> 50\mu\text{m}$  à 2mm)

La granulométrie consiste aussi en l'analyse de la distribution statistique des classes de tailles d'une collection de grains. Le diamètre d'une particule se mesure à l'aide du diamètre de Féret qui mesure une taille dans une direction a donnée. On définit l'exo-diamètre comme étant la position de D pour laquelle  $D_f$  est maximal et le méso-diamètre avec  $D_f$  minimal (Dinard, janvier 2012).

#### • Matériel

Un laboratoire de sédimentologie contient plusieurs instruments destinés à l'analyse granulométrique. L'idéal est de disposer d'un plan de travail laissé libre et dédié au lavage et à la décantation des échantillons. Pour information, 40 capsules de 30 cm de diamètre placées côte à côte représentent  $2,8 \text{ m}^2$ . Le laboratoire doit disposer de postes de travail dédiés à la pesée, à l'observation des échantillons 1, éventuellement d'un poste informatique permettant la saisie des données. Le reste du laboratoire est dédié au séchage, au tamisage et aux analyses chimiques.

#### • Division

Le séparateur permet de diviser un échantillon de sédiment en deux parties rigoureusement égales (Figure III. 2). Ceci est très pratique lorsque l'échantillon a été prélevé à l'aide d'une benne embarquée sur un navire. Le volume de sédiment, a 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.2 Diviseur à riffle Jones

Certaines analyses, la calcimétrie notamment, demandent de broyer le sédiment à l'aide d'un mortier et d'un pilon. L'intégrité des clastes n'est évidemment plus assurée et toute analyse granulométrique s'en trouvera fortement biaisée.

### III.3.1 Analyse granulométrique par tamisage

Les tamis les plus larges sont nommés passoires (à partir de 3:315mm). Les tamis AFNOR respectent la progression suivante : 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800  $\mu\text{m}$ , 1, 1.25, 1.6, 2, 2.5 mm et les passoires : 3.315, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25 mm. Les tamis sont placés les uns sur les autres dans le sens décroissant. Le sédiment sec est déversé au sommet de la colonne. On utilise un fond étanche à la base de la colonne pour récupérer le refus.

La colonne est placée sur une tamiseuse (Figure III.3) qui va la faire vibrer à une fréquence connue pendant un temps connu (généralement 10 minutes). Le sédiment va ainsi être trié selon la taille des grains qui le compose. Chaque refus est alors versé délicatement dans une capsule pour être pesé. Un grand soin doit être apporté lorsque l'on enlève les derniers grains qui restent dans le tamis.

On utilise généralement un pinceau ou une brosse (selon la finesse de la maille). On ne doit jamais appuyer sur le tamis à l'aide de la brosse et on ne doit jamais enlever par la force un grain resté bloqué dans une maille. Il existe des systèmes de nettoyage des tamis qui utilisent les ultra-sons.



Figure III.3 Tamiseuse Retsch



Figure III.4 Tamis



Figure III. 5 Série de Tamis

Les tamis ne doivent pas être désolidarisés et la colonne ne doit pas être dépareillée. Le tamis ne doit pas appartenir à une colonne utilisée en laboratoire. L'usure des tamis doit être homogène, pour cette raison, la colonne doit être changée dans sa totalité (au moins les tamis).

•Pesage

Chaque refus de tamis est pesé à l'aide d'une balance de précision, préalablement stabilisée sur un plan parfaitement horizontal, tarée et à l'abri des mouvements d'air (Figure III. 6). Il est également essentiel que la balance de précision soit étalonnée par un organisme certifié avec une périodicité adaptée. Les refus sont stockés pour archivage dans des sachets clairement identifiés. Il est souvent utile de stocker séparément les fractions supérieures et inférieures à 40 ou 63  $\mu\text{m}$ .



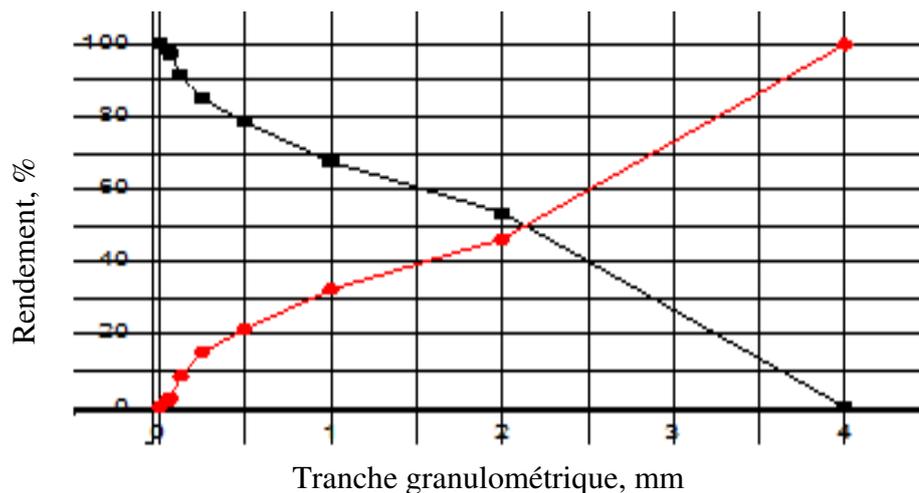
Figure III.6 Balance électronique

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture dans notre cas le temps de tamisage est égale à 10 min avec une amplitude de vibration égale à 60 et le poids total de l'échantillon égal à 500 g. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne du tamis est également pesé.

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. L'analyse granulométrique est réalisée au niveau de Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement (LAVAMINE) de département des mines de l'université de Badji Mokhtar Annaba. Les résultats de l'analyse sont représentés dans le Tableau III.1.

**Tableau III.1** Résultats d'analyse granulométrique de l'échantillon **brut**

Classes Granulométriques (mm)	Poids (g)	Rendement (%)	Refus cumulés (%)	Passants cumulés (%)
+ 2	268.30	53.65	53.65	<b>100</b>
-2 + 1	69.81	13.96	67.61	46.35
-1 + 0.5	54.55	10.91	78.52	32.39
-0.5 + 0.25	32.04	06.41	84.93	21.48
-0.25 + 0.125	32.79	06.56	91.49	15.07
- 0.125 + 0.063	30.07	06.02	97.51	08.51
-0.063 + 0.045	5.19	01.04	98.55	02.49
-0.045 + 0	7.25	01.45	100	01.45
TOTAL	500	100	-	-



**Figure III.7** Courbe granulométrique de l'échantillon de minerai de fer initial

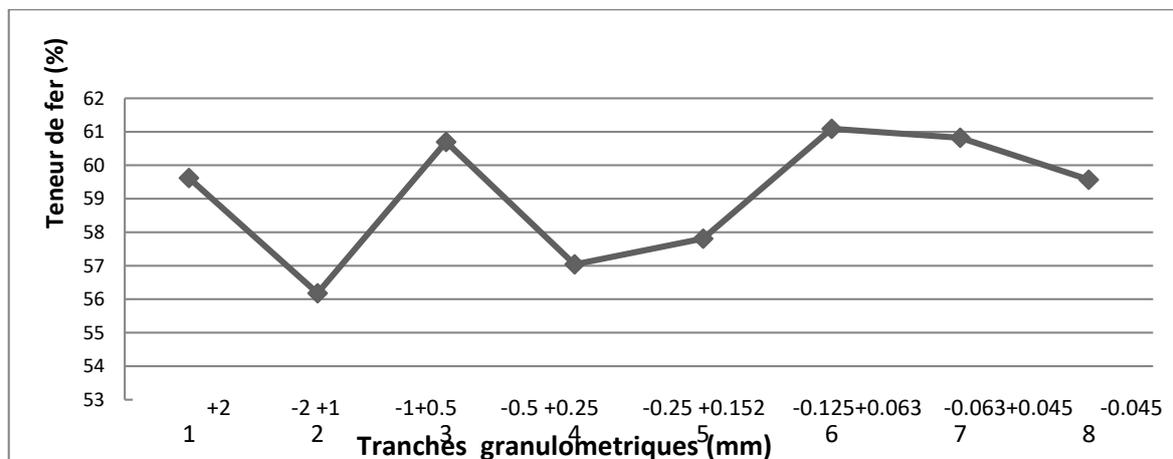
La courbe granulométrique d'un échantillon du minerai de fer concassé à 5 mm a été réalisée par tamisage à sec. Elle montre un produit présentant deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de : (0 mm +1 mm) et +2 mm donc la distribution des particules dans les tranches granulométriques est de manière irrégulière. Le tableau III.2 décrit le taux relatif de teneur en fer en fonction de la teneur en phosphore.

**Tableau III.2** Résultats d'analyse granulochimique du minerai de fer de Gara Djebilet par FX

Classes Granulométriques, mm	Rendement, %	Refus cumulés %	Passants cumulés %	Teneur fer %	Teneur P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %
>2	53.65	53.65	100	59.62	1.76
-2 + 1	13.96	67.61	46.35	56.18	1.63
-1 + 0.5	10.91	78.52	32.39	60.70	1.92
-0.5 + 0.25	06.41	84.93	21.48	57.04	1.80
-0.25 + 0.125	06.56	91.49	15.07	57.81	1.74
- 0.125 + 0.063	06.02	97.51	08.51	61.09	1.97
-0.063 + 0.045	01.04	98.55	02.49	60.82	1.90
-0.045 + 0	01.45	100	01.45	59.57	2.12
TOTAL	100	-	-		

Interprétation

Les résultats d'analyse granulochimique obtenus sont mentionnés sur le tableau III.2 représentent l'évolution de la teneur en Fer et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pour chaque classe granulométrique, on constate que les classes : (-1+0.5), (-0.125+0.063) et (-0.063+0.045) mm possèdent des fortes teneurs en Fer : 60.70, 61.09 et 60.82 % correspondants à des teneurs en oxyde de phosphore : 1.92, 1.74, et 1.90 %. La maille de libération est cernée entre les deux classes : (-0.125+0.063) et (-0.063+0.045) mm.



**Figure III. 8** Evolution de la teneur en fer en fonction des tranches granulométriques

### III.4 ANALYSE DES ECHANTILLONS PAR 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, pigments, argiles...) 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 ou moins denses qui sont désignés par leurs coordonnées (h, k, l) dans un système de repérage de l'espace. L'analyse par DRX de l'échantillon brut du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet est représentée sur la figure III.9. On constate d'après les courbes que la majorité des pics sont prédominés par l'hématite et le quartz, l'analyse par DRX des tranches granulométriques sont représentées sur les figures ci-dessous.

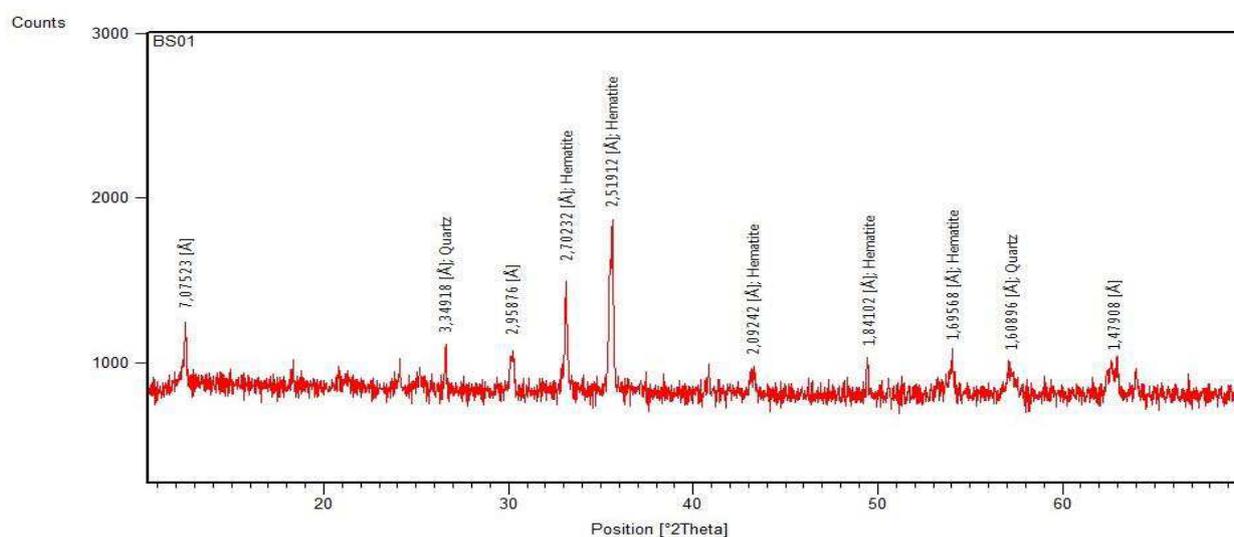


Figure III.9 Analyse par DRX de l'échantillon initial.

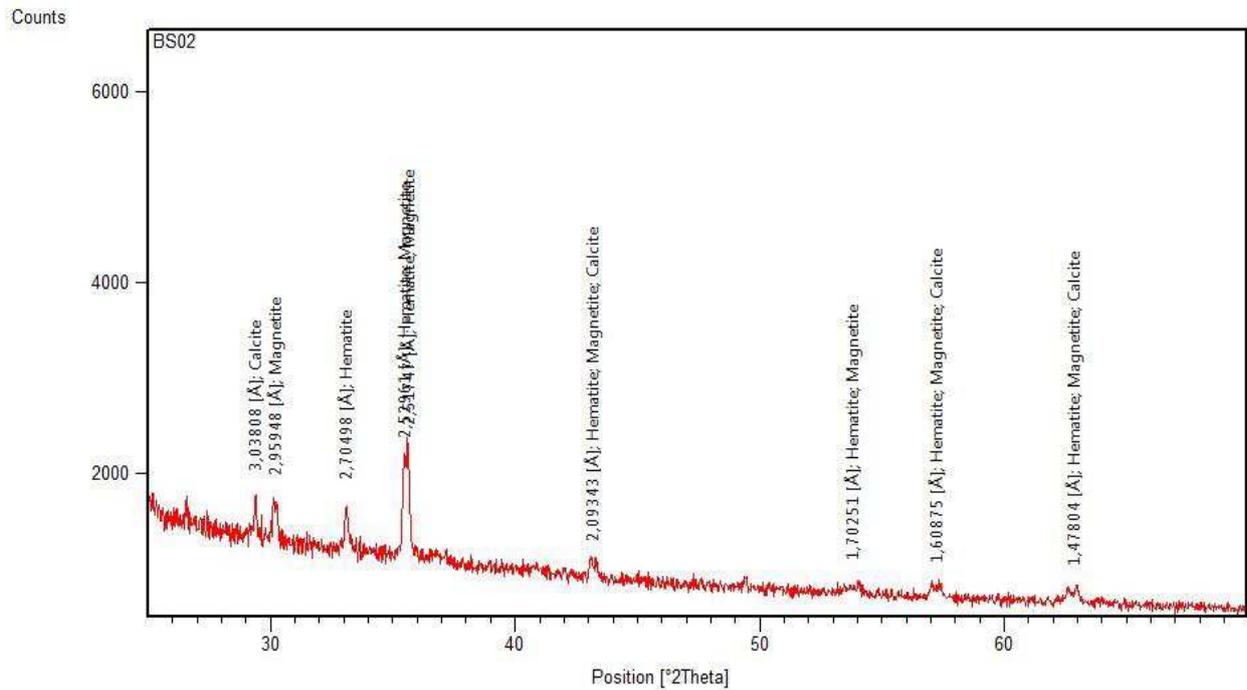


Figure III.10 Analyse par DRX de la fraction > 2 mm

Le spectre d'un échantillon de minerai de fer de la fraction > 2 mm illustré par la figure III. 10, L'analyse de cette figure montre que les phases minéralogiques observée sont majoritairement de l'hématite et de la magnétite, avec quelque trace de quartz en signalant l'absence de l'argile. L'analyse par DRX de la fraction < 2 mm est représentée sur la figure III.11.

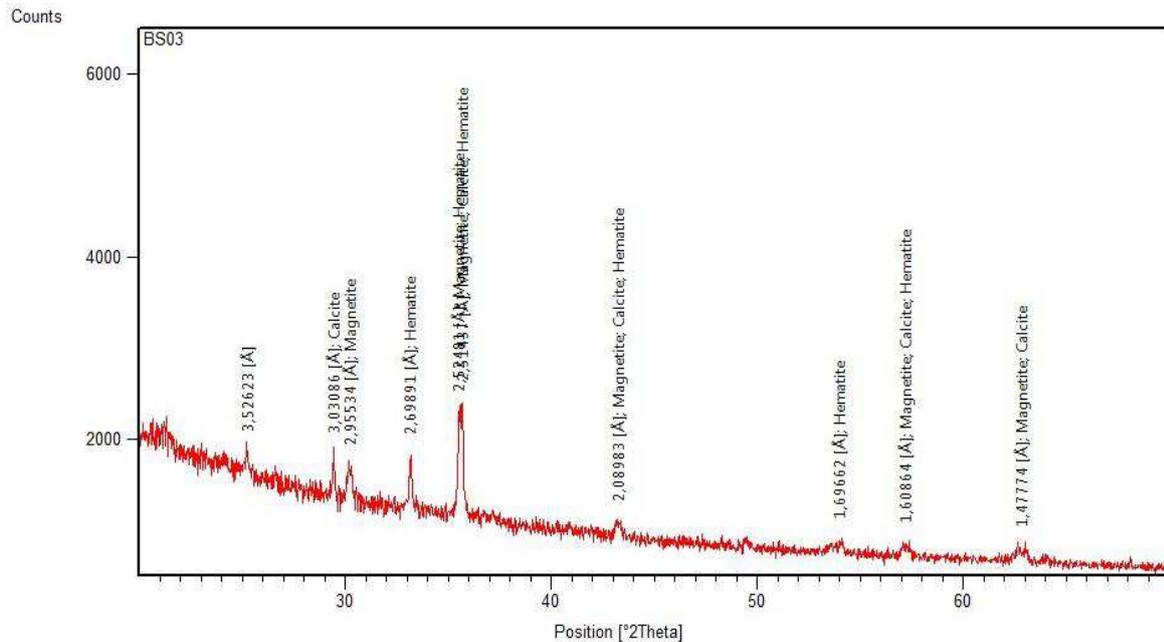


Figure III.11 Analyse par DRX de la fraction -2+1 mm

La figure. III.11, montre que les pics intenses sont représentés par l'hématite et la magnétite, avec un léger taux de calcite. L'analyse par DRX de la fraction <1 mm est représentée sur la figure III. 12

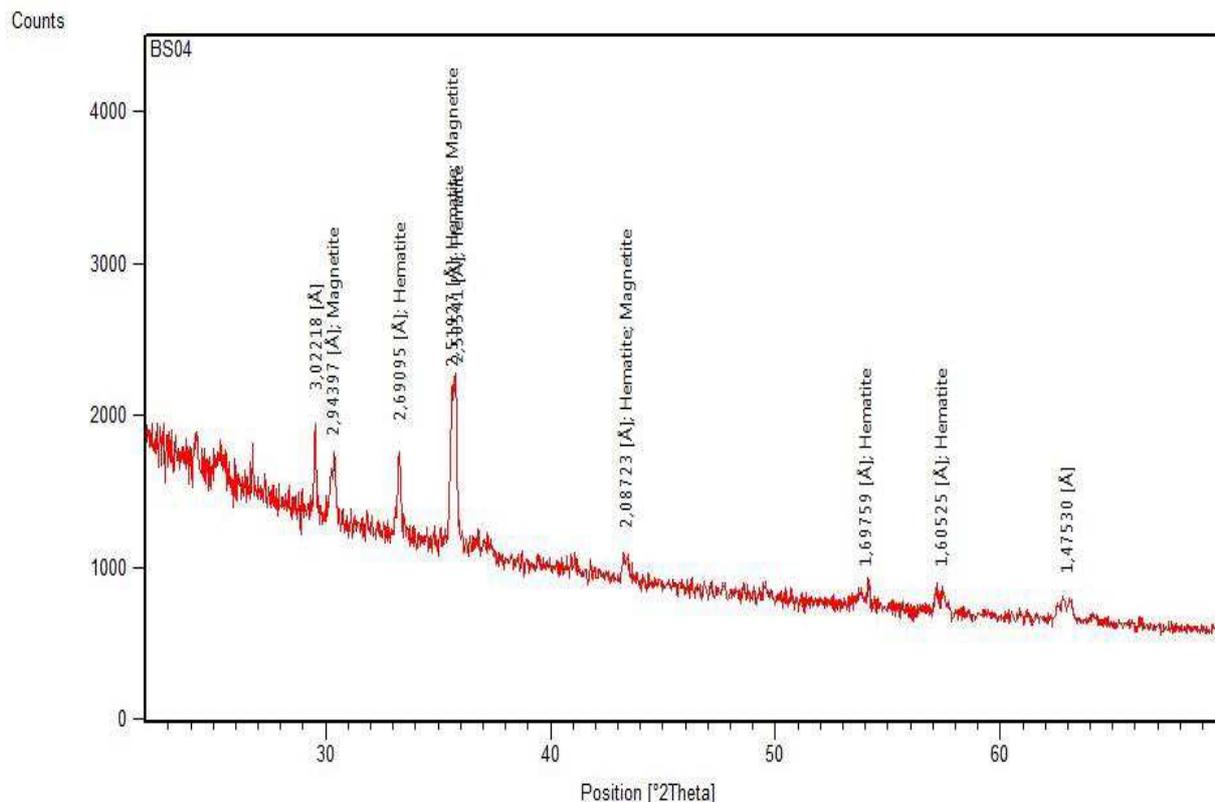


Figure III. 12 Analyse par DRX de la fraction -1 + 0,5 mm

La figure III. 12 montre la prédominance de l'hématite et de la magnétite représentés par des trois pics intenses. L'analyse par DRX de la fraction < 0.5 mm est représentée sur

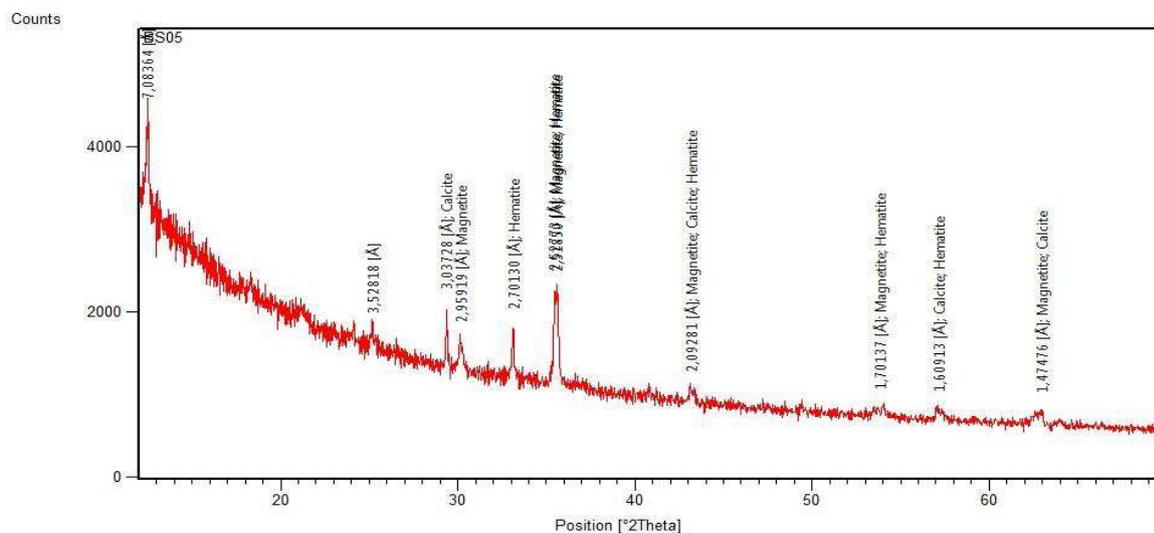


Figure III.13 Analyse par DRX de la fraction -0,5 + 0,250 mm

La figure III.13 montre la prédominance de l'hématite et de la magnétite représentés par des trois pics intenses. L'analyse par DRX de la fraction < 0.25 mm est représentée sur

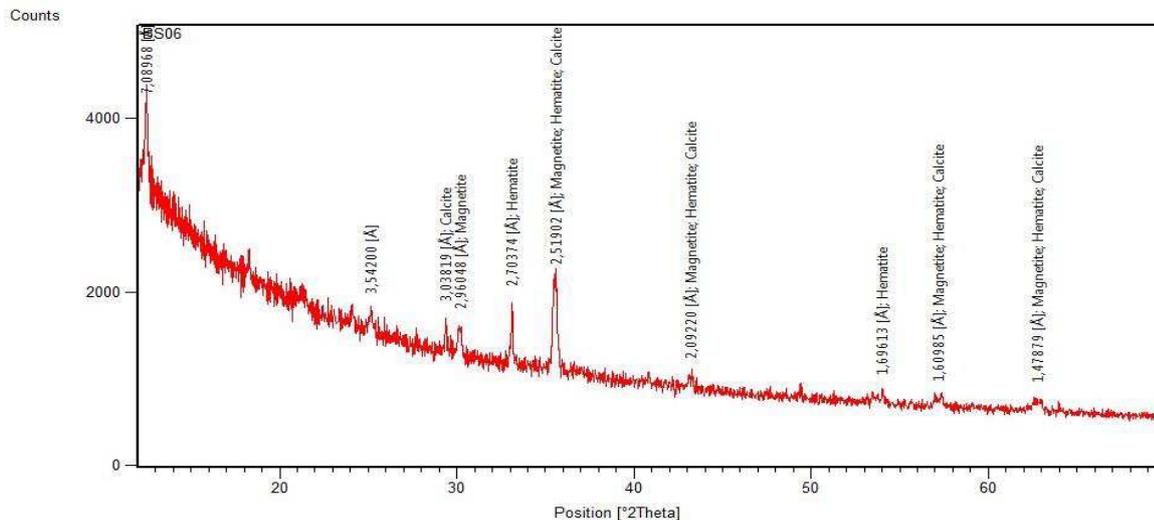


Figure III.14 Analyse par DRX de la fraction -0,250 + 0,125 mm

La figure III.14 explique l'inclusion de la calcite dans la magnétite et l'hématite qui sont représentés par trois pics, une qui est intense de fréquence 2.51902 et par les deux qui restent de fréquence de valeurs successives : 2.09220 et 1.60985. L'analyse par DRX de la fraction < 0.125 mm est représentée sur figure III.15.

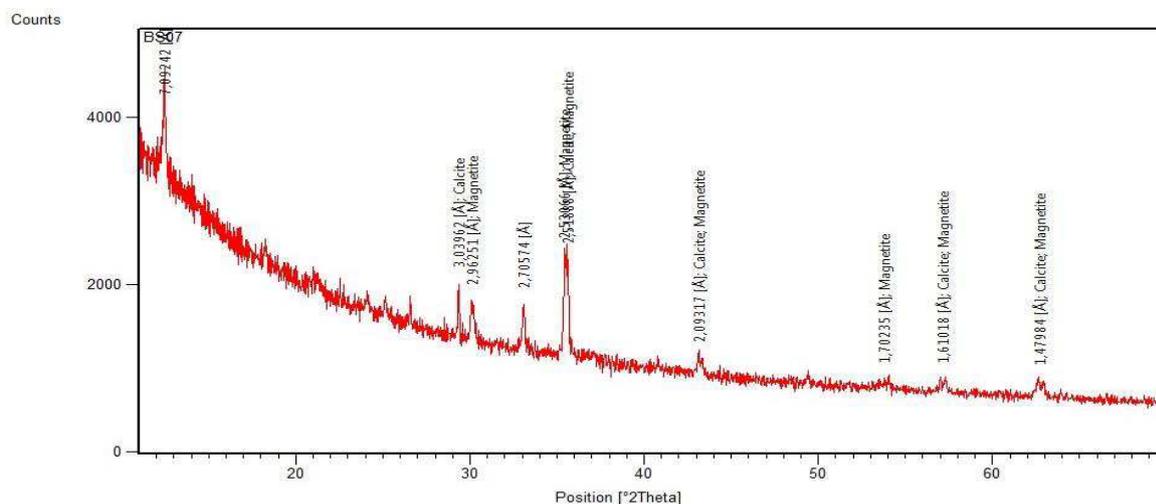


Figure III.15 Analyse par DRX de la fraction -0,125+0,63 mm

La figure III.15 décrit une diversité minéralogique du minerai de fer de Gara Djebilet représentée par la prédominance de calcite : 3.035 et magnétite 2. 1.479, avec (calcite magnétite) :1.610 et (calcite magnétite) :1.702 comme inclusion.

### III.5 OBSERVATION MICROSCOPIQUE DES ECHANTILLONS

L'observation directe ou la photographie microscopique optique est la méthode la plus simple et la seule qui peut se considérer comme absolue ; elle permet à l'opérateur de prononcer un jugement subjectif concernant le diamètre ou la forme des grains. Cependant, elle devient extrêmement ennuyeuse et peut souvent produire des mesures biaisées quand on veut faire des mesures objectives, comme des déterminations granulométriques (GROVES M.J., & WYATT-SARGENT J.L ; 1972).

- **Observation de l'échantillon par lame mince**

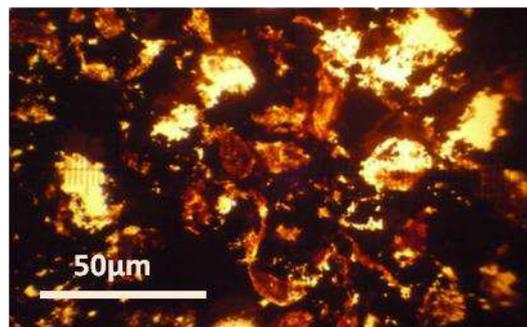


Figure III.16 Observation microscopique d'échantillon 1

**Commentaire :**

Roche à grain fin (oolithe fin). La granulométrie des oolithes non métallifères ne dépasse pas 0,15 mm. La quantité des minéraux non métallifères 25-30% du volume de la roche, l'agrégat minéral forme le liant de cimentation entre les grains et son volume est de 70 à 75%. On observe une intense hématisation des oolithes et leurs remplacements par des minéraux métallifères représentée par la figure III.16.

- **Observation de l'échantillon par section polie**

Le polissage de cette section montre des grains de magnétite plus claire.

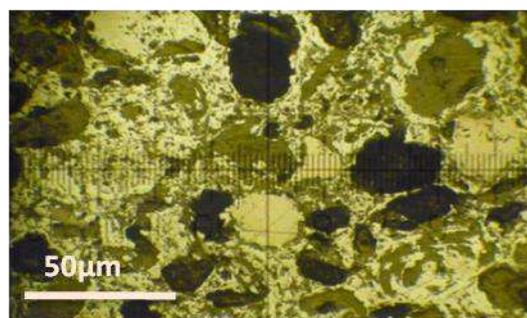


Figure III.17 Observation microscopique d'échantillon 1

- Observation de l'échantillon par lame mince

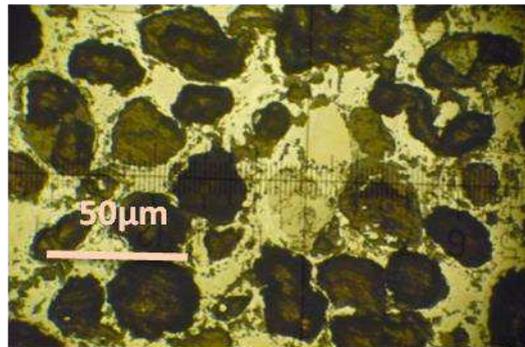


Figure III.18 Observation microscopique d'échantillon 2

**Commentaire :**

Nombre de minéraux métallifères de 65-70%. Il est le remplacement presque complet de l'unité d'hématite de ciment. Grains de magnétite restent comme des reliques, scellé dans l'hématite figure III.18.

On remarque qu'il y'a une substitution de grains primaires de magnétite hématite figure III .19, III .20 et III .21.

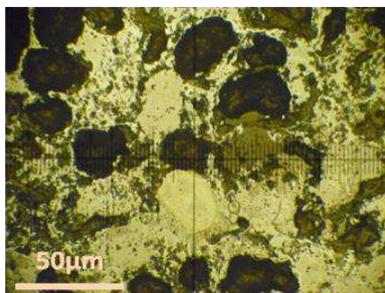


Figure III.19

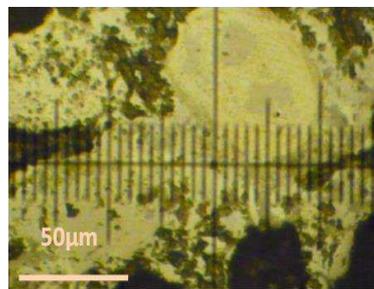


Figure III.20

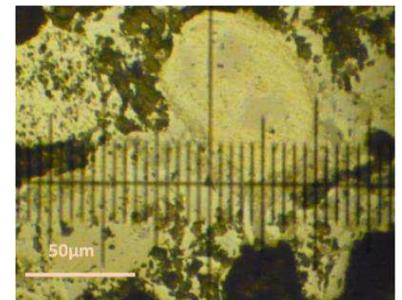


Figure III.21

- Observation de l'échantillon 2 par section polie Figure (III.22, III.23)

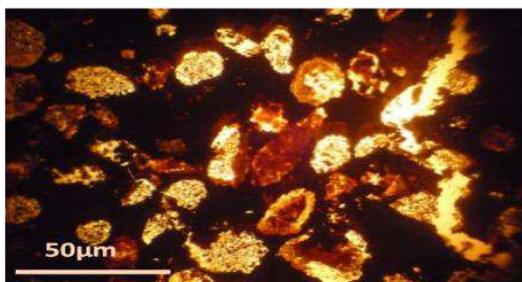


Figure III.22

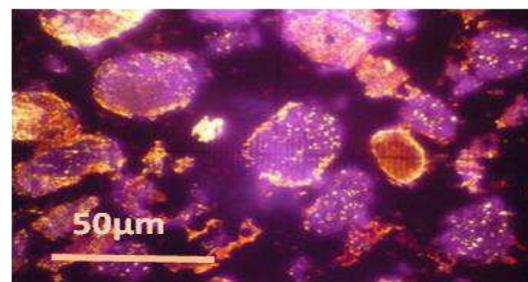


Figure III.23

**Commentaire :**

Nombre de minerai minéral de 65 à 70%. Unité non métalliques composé de 30 à 35% de grains arrondis jusqu'à 0,3 mm. Souvent, point culminant non métallique intensive, qui se reflète dans leur couleur rouge-brun. Ferrugénisation hématitique susceptible finement divisée dans à 0.01 mm, les grains d'apatite arrondis, cimenté granulats d'argile, les minéraux du minerai saturés Figure III.22.

Souvent, la libération des non métalliques est intensivement ferrugineuse Figure III.22, qui se reflète dans leur couleur rouge-brun. La ferruginisation d'hématite est une hématisation susceptible d'être finement divisée dans une masse d'argile. Les non métalliques sont constitués de petits grains inférieurs à 0,01 mm, les grains arrondis d'apatite cimentés par des granulats d'argile et des minerais métalliques saturés figure III.23.

• **Observation de l'échantillon 3 par lame mince**

• **Commentaire :**

La race est composée de grains arrondis, bien arrondis composées de minéraux argileux. Parfois, les grains ont une structure zonale claire (figures III.24, III.25). Grain effectué unité de grain fin, presque un diagnostic sous le microscope. Souvent beaucoup de grain non métalliques grains de minerai de minéraux cimentés qui brille dans transmises brun rougeâtre clairs (Figures III.26 et III.27). Souvent, le grain non métallique observé la structure de zone: la partie centrale est faite d'un matériau d'argile, qui est entourée par une bordure de minéraux du minerai et la partie extérieure de chlorite minérale (Figures III. 28 et III.29).

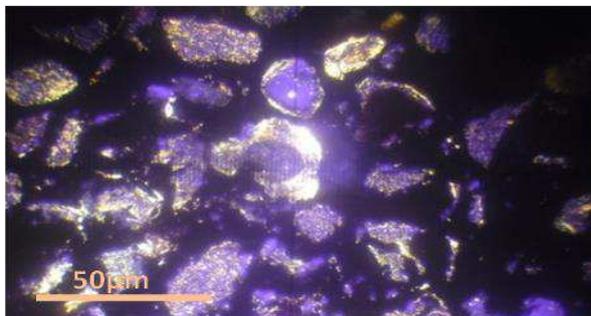


Figure III.24

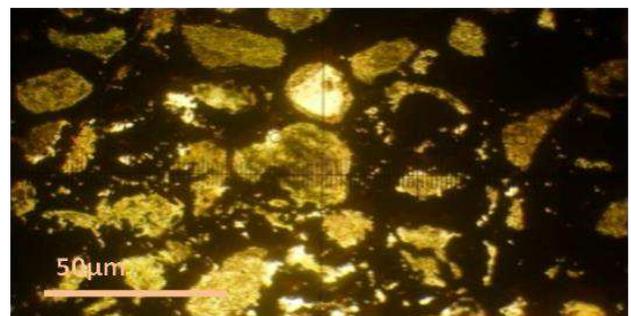


Figure III. 25

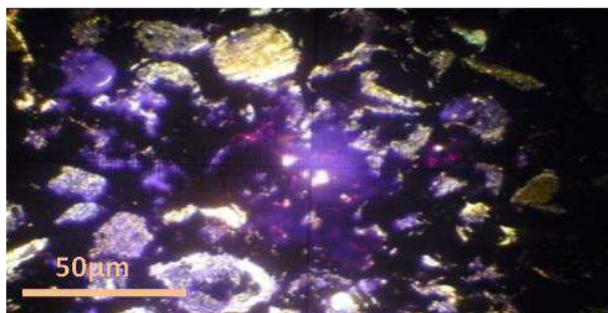


Figure III.26



Figure III.27

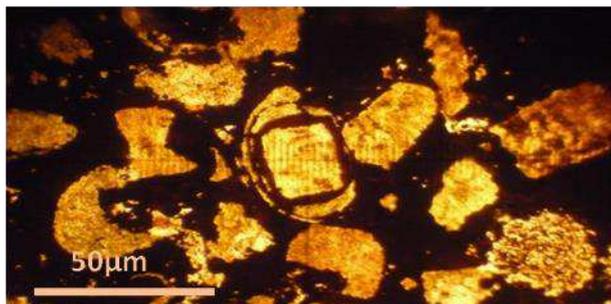


Figure III.28

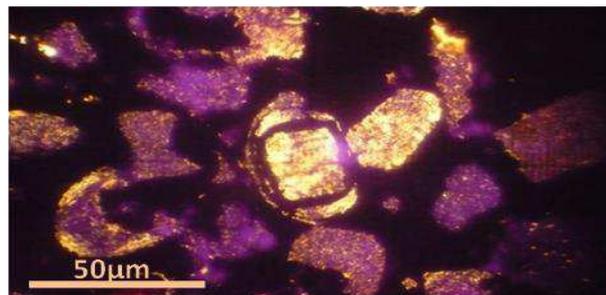


Figure III.29

• Observation de l'échantillon 3 par section polie

**Commentaire :**

Dans les sections polies de minéraux présents de minerai plusieurs générations:  
Minéraux primaires: la magnétite grains arrondis à 0,2 mm couleur brunâtre figure III.30.

Hématite forme la structure d'encrassement autour des grains de magnétite (Figures III.31 à III.32). La plus récente est une machine de brouillard goethite – hydro-goethite dans l'espace inter-granulaire de minerai figure III.33 et des minéraux non métalliques. Nombre de grains de magnétite de 3.2% Hématite de 5-10% Goethite - hydro-goethite de 20-25%.

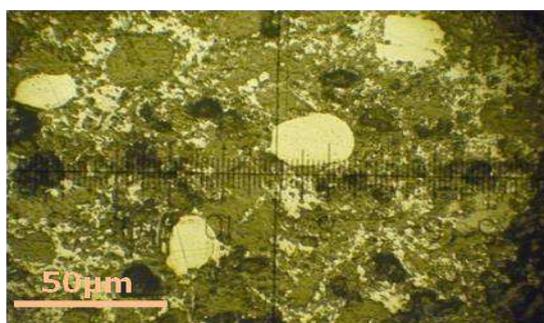


Figure III.30

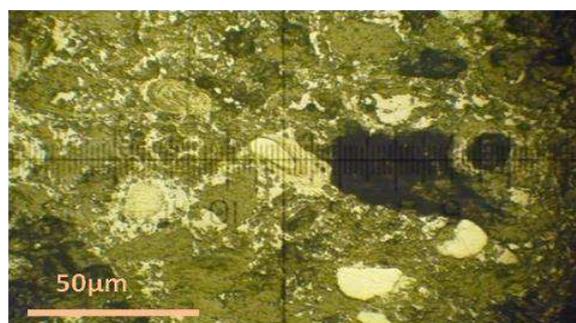


Figure III.31

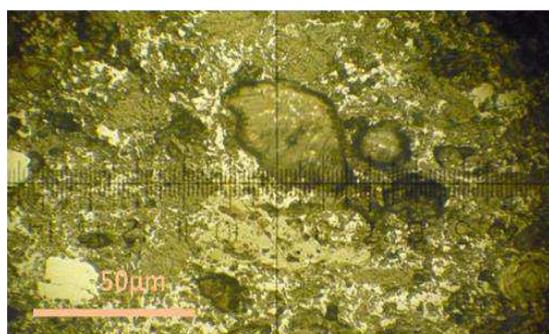


Figure III.32

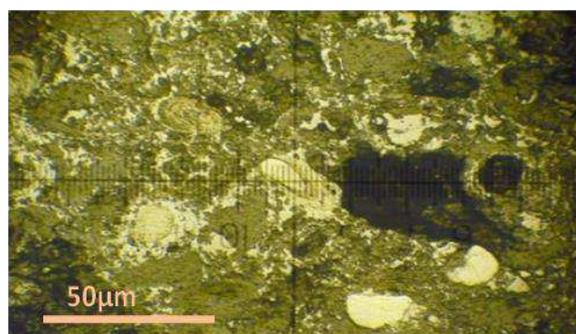


Figure III.33

• Caractérisation d'échantillon initiale par MEB

Les résultats de l'analyse au microscope électronique à balayage ont montré que le minerai de fer de Gara Djebilet est principalement constitué de la Maghémite, la Magnétite, l'hématite et la limonite tandis que la gangue de la chamosite, du quartz et de la colophane et, occasionnellement, des minéraux en traces tels que le zircon et le rutile à l'aide du MEB, une image a été prise pour l'échantillon de minerai de fer du gisement de Gara Djebilet –Tindouf à un agrandissement de 3000 fois ( Figure III.34 et III.35). Les taux des composants du minerai observé sont montrés et ordonnés par le spectre du MEB (Figure III.36) et détaillés dans le tableau III.3 des résultats quantitatifs du MEB.

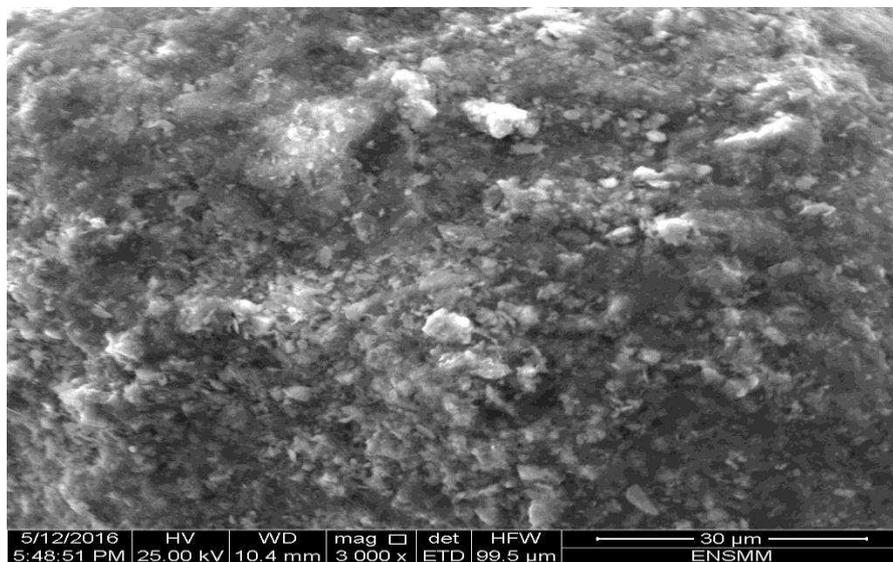


Figure III.34 Observation par MEB du minerai initiale de fer de Gara Djebilet (3000x)

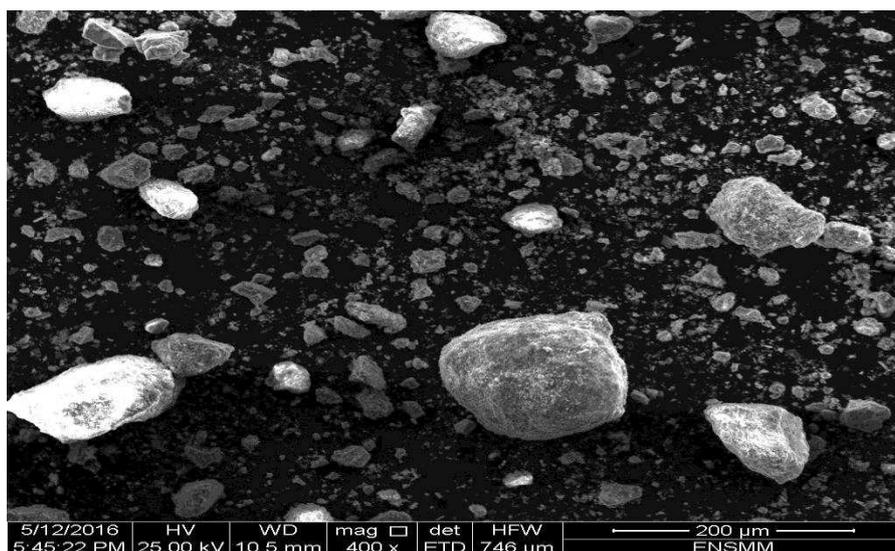


Figure III.35 Observation par MEB du minerai initiale de fer de Gara Djebilet (400x)

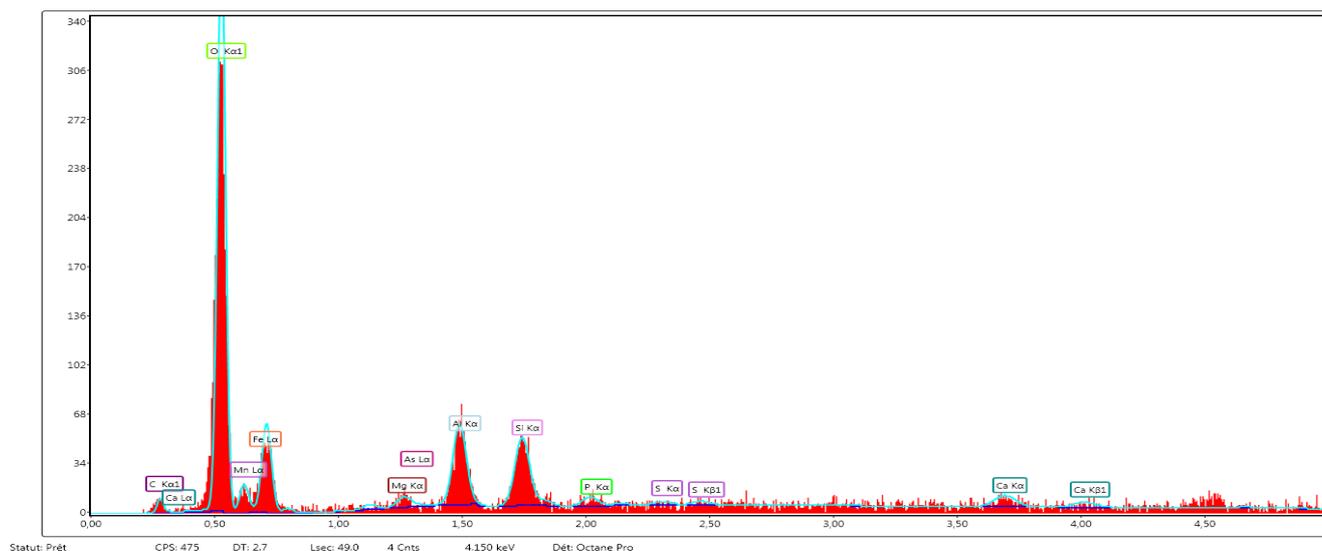


Figure III.36 Spectre du MEB du minerai initiale de fer de Gara Djebilet

Il s'agit d'une analyse EDX réalisée au MEB, sur un échantillon de minerai de fer prélevé de gisement de Gara-Djebilet. D'après le graphe, on observe un pic important de deux éléments représentés par l'oxygène et le fer (O et Fe), cela veut dire que l'échantillon est majoritairement composé par l'oxyde de Fer avec un taux de l'ordre de 84 %. En deuxième lieu, on note la présence de la silice et de l'alumine (Si et Al) qui peuvent témoigner de la présence d'une fraction argileuse dans ce minerai de fer (8%). La présence de Ca et de Mg peut être traduite par une présence minime de carbonates (Calcite et Dolomite). En fin, il est clair sur le spectre que cet échantillon renferme de l'arsenic (As = 1.09%) et de Phosphore sous forme d'apatite, avec un taux de P = 0.39 %. Ces deux éléments peuvent être nuisibles à l'industrie sidérurgique par rapport à la norme de qualité de minerai de fer, tout de même le tableau des résultats quantitatifs du MEB montre que le taux manquant du phosphore est substitué par l'arsenic.

Tableau III.3 Résultats quantitatifs de l'observation par MEB

Elément	% Massique	% Atomique	% Erreur	Intensité totale	K ration	Z	R	A	F
<b>C</b>	3.77	8.21	36.82	1.4	0.0092	1.1575	0.9027	0.2114	1
<b>O</b>	36.05	58.97	8.8	65.99	0.157	1.1165	0.9265	0.3899	1
<b>Mg</b>	0.68	0.73	70.55	1.49	0.0016	1.0427	0.9646	0.225	1.0038
<b>Al</b>	4.99	4.84	13.9	15.92	0.0165	1.0063	0.9729	0.327	1.0056
<b>Si</b>	3.27	3.05	15.75	13.93	0.0144	1.0304	0.9808	0.4235	1.008
<b>P</b>	0.39	0.33	67.31	1.72	0.0021	0.9914	0.9884	0.5263	1.0131
<b>S</b>	0.15	0.12	67.89	0.81	0.001	1.0126	0.9956	0.6413	1.0203
<b>Ca</b>	0.62	0.41	42.08	3.53	0.0062	0.9822	1.0215	0.9224	1.1035
<b>Mn</b>	0.78	0.37	52.36	2.9	0.0078	0.8691	1.0478	1.0053	1.1448
<b>Fe</b>	48.21	22.59	2.82	147.3	0.4444	0.8843	1.0522	1.0098	1.0324
<b>As</b>	1.09	0.38	62.36	1.02	0.0098	0.8021	1.0681	0.9779	1.1375

### Conclusion

- Quelle que soit la précision des méthodes analytiques utilisées, si l'échantillon n'est pas représentatif, l'évaluation et les conclusions qui en seront tirées risquent de ne pas être en adéquation avec le lot à étudier ;
- L'analyse granulométrique montre un produit présentant deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de : (-0.045 mm+1 mm) et +2 mm donc la distribution des particules dans les tranches granulométriques est de manière irrégulière ;
- L'analyse par DRX de l'échantillon initial montre que la majorité des pics sont prédominés par l'hématite et le quartz, bien que la magnétite et la calcite ne représentent des composants minéralogiques mineurs.
- L'observation microscopique optique est la méthode la plus simple et la seule qui peut se considérer comme absolue ; elle permet à l'opérateur de prononcer un jugement subjectif concernant le diamètre ou la forme des gouttes. Cependant, elle peut produire des mesures biaisées quand on veut faire des mesures objectives, comme des déterminations granulométriques.
- Les résultats de l'analyse au microscope électronique à balayage ont montré que le minerai de fer de Gara Djebilet est principalement constitué de la maghémite, la magnétite, l'hématite et la limonite tandis que la gangue de la chamosite, du quartz et de la colophane.

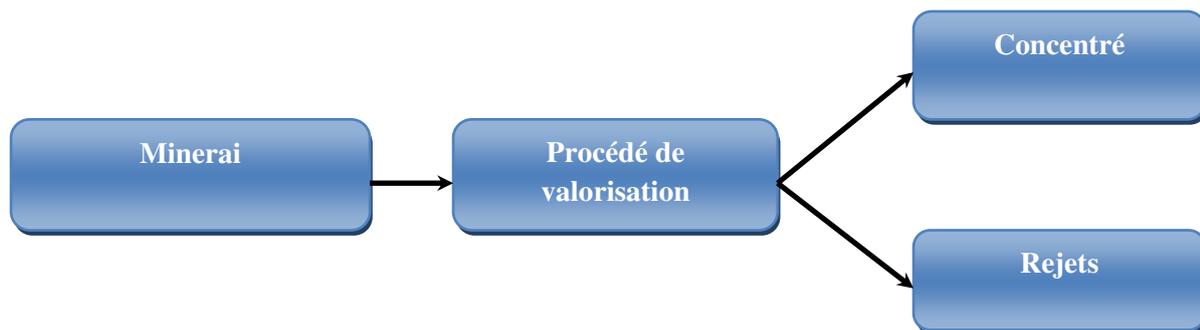
## **CHAPITRE IV**

# **TRAITEMENT DU MINERAI DE FER DE GARA DJEBILET**

## IV. 1 APERÇU SUR LA VALORISATION DES MINERAIS

### IV. 1 .1 Définition

La valorisation des minerais peut être considérée comme l'ensemble de procédés et de technique de préparation , de séparation et d'épuration des espèces minérales ou des éléments chimiques de valeur, à partir d'une matière brute , en vue d'obtenir un concentré utilisable industriellement et des rejets figure IV.1.



**Figure IV. 1** Schéma simplifié d'un procédé de valorisation du minerai

En fait, la valorisation des minerais s'étend non seulement au secteur traditionnel minier, mais encore à tous les domaines où elle peut se présenter, sous forme naturelle, artificielle ou résiduelle, le minéral ou l'élément chimique, dans le sol, les eaux ou l'air, en tant que produit de valeur à extraire ou à récupérer, ou facteur de nuisance à éliminer.

L'objet de la valorisation est de traiter les minerais afin d'en extraire, dans les conditions économiques données et sur un site dont il conviendra de préserver l'environnement, des produits de consommation primaire utiles que l'on puisse vendre avec bénéfice. Dans cette brève définition, apparaissent déjà les contraintes extérieures, rigides, imposées aux minéralurgistes : le minerai, le contexte économique, l'écologie ou l'environnement du site, les conditions de vente qui sont des données sur lesquelles il n'a pas de possibilité d'action directe.

### IV.1.2 Contraintes extérieures

#### IV.1.2.1 Le minerai

En dehors de quelques rares exceptions, la majorité des minéraux utiles sont présents dans la nature sous formes de mélanges dilués et hétérogène, et, sous cette forme, n'ont, en général, que peu d'intérêt pour les utilisateurs industriels qui demandent des produits minéraux hautement concentrés dont les propriétés chimiques et physique soient définies suivant des normes . Le minéralurgiste doit s'efforcer de séparer les minéraux désirables de leur gangue stérile et produire ainsi des concentrés.

En ce qui concerne le minerai, le principe de base des méthodes de la valorisation est l'exploitation des différences entre les propriétés des minéraux, il sera donc indispensable de connaître, pour un minerai donné :

1. la composition minéralogique du minerai, présentée sous forme d'une analyse modale (proportion volumétrique ou pondérale de minéraux présents dans le minerai),
2. la variabilité de la composition minéralogique dans le gisement,
3. la composition chimique des divers minéraux présents dans le minerai,
4. Les associations des divers minéraux entre eux (texture), et la variabilité de la texture dans le gisement,

Il doit être clair d'après cette liste que pour le spécialiste en valorisation au moins, la teneur chimique élémentaire d'un minerai n'a pas de signification pratique en l'absence de précision sur la composition minéralogique du minerai.

#### **IV.1.2.2 Contexte économique**

Il n'est pas nécessaire de rappeler ici les paramètres économiques classiques, qui ont d'ailleurs une influence sur l'industrie minière dans son ensemble : cours des matières premières, disponibilités des capitaux, prix de la main d'œuvre, prix du transport, etc..., ces paramètres économiques jouent un rôle bien étendu, sur la valorisation des minerais en fixant les conditions des prix de revient maximaux du traitement pour un minerai donné.

#### **IV.1.2.3 Ecologie du site**

On peut dire brièvement que l'un des problèmes majeurs des déchets de l'industrie minière se situe dans la mise en décharge des rejets fins, qui sont les résidus des usines de traitement.

Ils sont constitués de solides minéraux finement broyés (inférieur à 100 microns), généralement en suspension dans l'eau, cette eau contient également certains réactifs qui ont été utilisés au cours du traitement (agents de contrôle du pH, réactifs de flottation, agent de floculation ou de dispersion, etc...) dans des quantités habituellement faibles dans certains cas, l'effet de ces ions sur l'environnement n'est que très mal connu.

Les solides minéraux possèdent une réactivité variable dans l'eau. Certains minéraux qui étaient insolubles dans les conditions du gisement, deviennent solubles dans un nouvel environnement (en particulier, les sulfures qui s'oxydent lorsqu'ils sont finement broyés en présence d'eau, d'air et de bactéries).

Tous ces problèmes doivent être étudiés, évalués et résolus avant de pouvoir lancer une exploitation minière.

#### **IV.1.2.4 Conditions de vente des produits**

Il est important de réaliser que la valorisation est l'interface entre la mine et l'industrie utilisatrice, par l'intermédiaire des concentrés qui doivent être vendues. La qualité de ces produits conditionne très souvent l'économie d'un projet minier, soit par son influence directe sur le prix d'achat par les consommateurs, soit par des difficultés d'écoulement (voire des impossibilités de trouver un marché). Les conditions de vente représentent des cas très spécifiques suivant les types de produits minéraux que l'on cherche à commercialiser mais on doit distinguer quatre critères importants :

- 1) teneur chimique ou minérale en élément ou minéral majeur, son niveau doit souvent être supérieur à une limite fixée par l'utilisateur, et qui peut varier, non seulement en fonction de raisons technologiques mais également d'habitudes du marché, de la disponibilité de concentrés riches, etc....,
- 2) teneur chimique en élément pénalisant (par exemple, phosphore dans un concentré de fer, arsenic dans un concentré de cuivre, etc....) dont le niveau doit être inférieur à une limite fixée par l'utilisateur, et variable également,
- 3) teneur chimique en élément valorisant (par exemple, or et argent dans un concentré de cuivre, cuivre dans un concentré de plomb, etc....) et payé seulement au-dessus d'un niveau fixé par l'utilisateur,
- 4) caractéristique physique du concentré : dans certains cas dimensions des particules (fibre d'amiante, minerai de fer, de chrome), teneur en eau, mode de présentation (boulettes, agglomérés, etc....).

Il ne s'agit donc pas seulement pour le chercheur en valorisation d'obtenir un concentré, mais encore d'assurer que pour tout les types (ou présentations) de minerais rencontrés dans un gisement, les concentrés produits répondront aux normes du marché, tant sur les teneurs en éléments majeurs, mineurs ou valorisants, qu'en ce qui concerne les caractéristiques physiques du concentré.

#### **IV.1.2.5 Méthodologie de la valorisation**

Quels sont les moyens, procédés ou techniques de la valorisation qui permettent de résoudre un problème particulier, compte tenu des contraintes? La seule possibilité pour le chercheur est d'exploiter les différences entre les propriétés des minéraux contenus dans le minerai.

Cette possibilité est malheureusement limitée pratiquement par les difficultés suivantes :

- la texture des roches constituant le minerai conditionne la manière dont les minéraux vont se séparer au cours des opérations de fragmentation (concassage, broyage), la libération des minéraux les uns des autres est une condition sine qua non de la mise en application des différences entre les propriétés des minéraux.
- les propriétés des minéraux ne sont pas constantes, non seulement d'un gisement à un autre, mais également à l'intérieur d'un même gisement.

- les méthodes de séparation qui sont utilisées en pratique industrielle ont leurs limitations.
- Il existe une limite de discrimination dans la différence entre les propriétés des minéraux, pour chaque appareil, que l'on peut définir comme la sensibilité de la méthode.

La figure V.2, résume les principales difficultés qui apparaissent aux divers stades de la conception d'un procédé de traitement.

Par ailleurs, lorsque l'on essaye de faire un bilan des propriétés de minéraux qui sont effectivement utilisées pour réaliser des séparations minéralurgiques Figure V.3.

### **IV.1.3 Techniques de recherche en valorisation**

Il est important de réaliser les techniques de recherche en valorisation qui doivent être conçues pour répondre aux questions qui ont été posées ci-dessus.

En fait, pour mieux comprendre les besoins en techniques de recherches, équipements de laboratoire, compétences chercheurs en recherche et développement, il est plus utile de classer les thèmes des activités d'un centre de recherche en valorisation en distinguant les thèmes suivants :

- Phénomènes
- Procédé
- Cibles

Dans la plupart des techniques de recherche en valorisation, on se limite aux deux derniers thèmes ; procédés et cibles. Il est cependant utile d'évaluer l'ensemble des sujets sur lesquels il est nécessaire de réaliser des travaux de recherche.

L'étude des phénomènes représente un stade fondamental d'acquisition de données sur les propriétés des minéraux. On a déjà signalé que les propriétés utilisées en pratique, sont très limitées en nombre. Ceci ne veut pas dire que ces propriétés soient parfaitement connues. En particulier les phénomènes qui se produisent à l'interface entre un minéral et une solution aqueuse ne sont que très imparfaitement connus, en dépit de l'application massive qui en est faite dans la flottation des minerais.

Les travaux qui doivent être réalisés sur les procédés ne peuvent être conduits efficacement que si l'on possède une bonne connaissance des phénomènes. Ils consistent soit à concevoir des procédés nouveaux afin de mieux valoriser certains minerais déjà exploités ou de permettre le développement de nouveaux types de gisement, soit à améliorer les procédés classiques afin de parfaire l'économie de leur application.

Les travaux sur des cibles particulières correspondent manifestement à la partie la plus importante des techniques de recherche en valorisation. Elles consistent soit à des études d'application de procédés classiques sur des minerais particuliers, soit au développement de procédés nouveaux sur des gisements potentiels particuliers pour lesquels les blocages techniques et économiques se situent au niveau du traitement.

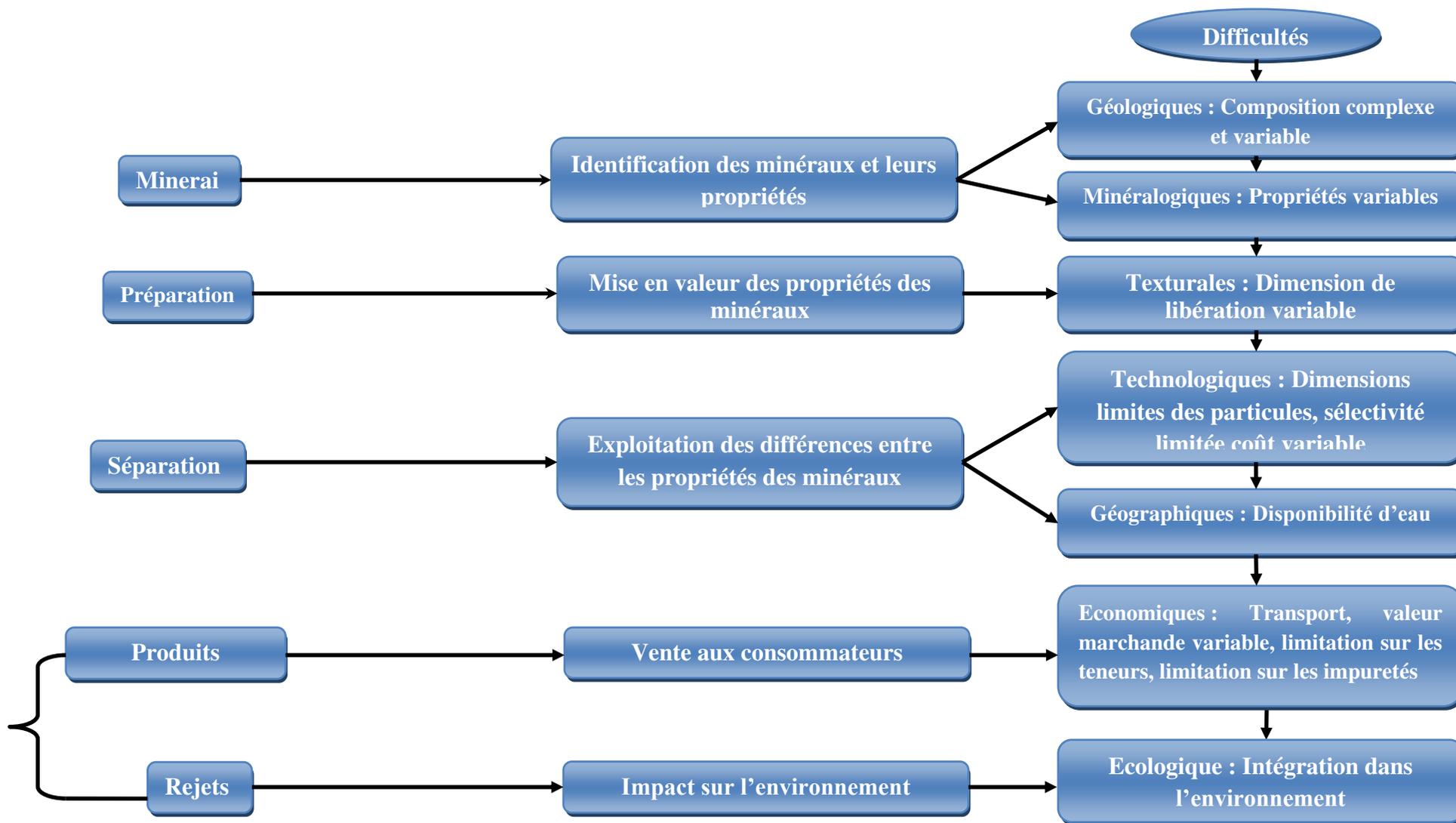


Figure IV.2 Classification des difficultés rencontrées dans un procédé de traitement minéralurgique

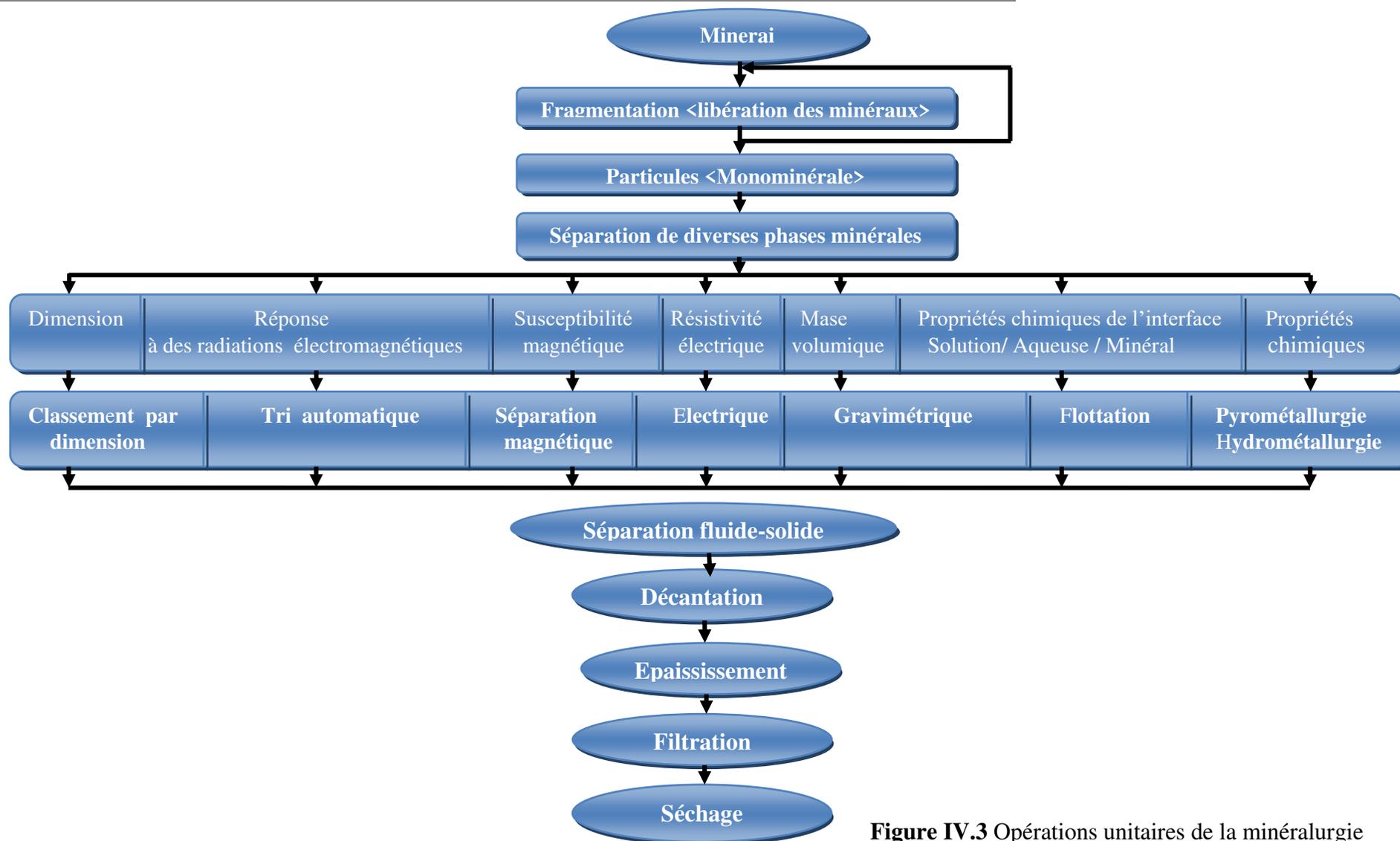


Figure IV.3 Opérations unitaires de la minéralurgie

### **IV.1.3. 1 Moyens à mettre en œuvre**

#### **IV.1.3. 1.1 Etude des cibles**

Les travaux menés sur des techniques de recherche en valorisation doivent s'intégrer à tous les stades du développement d'un projet minier, depuis l'examen d'indices, jusqu'à la construction et la mise en route de l'usine de traitement.

Au niveau de la prospection minière, le minéralurgiste, aidés de minéralogistes et de géologues - peut et doit orienter les recherches en évaluant les difficultés de traitement présentées par des échantillons types extraits du gisement potentiel, afin de guider l'exploration vers des zones où la séparation des minéraux présents sera industriellement rentable (en fonction de la texture du minerai, de la présence de minéraux qui donneraient des impuretés gênantes dans les concentrés éventuellement produits, etc...). Sa fonction est donc à ce stade de conseiller les géologues afin de diriger les recherches vers les types de minéralisation les plus sûrement valorisables.

Lorsqu'un site est retenu pour une évaluation plus précise, les travaux de valorisation des minerais consistent alors en des essais d'attitude au traitement sur des échantillons qui sont en général des moities ou de quarts de carottes de sondage. La sélection des métrages de carottes utiles pour constituer un échantillon est de première importance et ne peut être faite qu'en accord avec un géologue et un ingénieur des mines, afin de déterminer le nombre d'échantillons à retenir (pour représenter les divers types de minéralisation) et les dilutions qui seront éventuellement imposées par la méthode d'exploitation minière. La quantité de matériau disponible pour réaliser les essais est alors généralement de l'ordre de quelques dizaines de kilogrammes, et les essais se font nécessairement au niveau du laboratoire, en discontinu.

Dans la figure IV.4, on trouvera un diagramme représentant les diverses opérations qui sont effectuées à ce stade de développement. Le type d'information qui est alors obtenu permet de réaliser une première évaluation technique et économique des problèmes présentés, par le traitement du minerai, en particulier en ce qui concerne la composition minéralogique et chimique des concentrés susceptibles d'être produits et le niveau approximatif des prix de revient de la valorisation.

L'étape suivante des travaux de valorisation des minerais concerne, comme montré sur la figure IV.5, la vérification au moyen d'essais cycliques, qui permettent de simuler un procédé d'opération continu par des opérations en discontinu, puis au moyen d'essais en usine pilote - du procédé de traitement qui avait été retenu, ainsi que ses modifications éventuelles. La quantité d'échantillon nécessaire à ces essais est importante, puisqu'on peut difficilement réaliser des essais en usine pilote à un débit unitaire inférieur à 100 kg/h ce qui implique obligatoirement un ou des échantillons représentatifs de quelques dizaines ou centaines de tonnes.

La sélection des échantillons est là encore de première importance et ne peut être effectuée que par une collaboration entre chef de projet géologue minier - ingénieur des mines et minéralurgiste.

Le passage au niveau de l'échelle pilote est une décision qui est habituellement prise pour les raisons suivantes :

1-Evaluation d'un procédé nouveau, ou d'un type de minéralisation qui n'est pas exploité industriellement,

2-Obtention des données d'ingénierie pour l'usine de traitement, en ce qui concerne, par exemple, les temps de résidence dans les diverses machines, les débits en produits mixtes, etc...,

3-Obtention de résultats en continu sur des échantillons importants et variés pour rassurer et convaincre les responsables financiers.

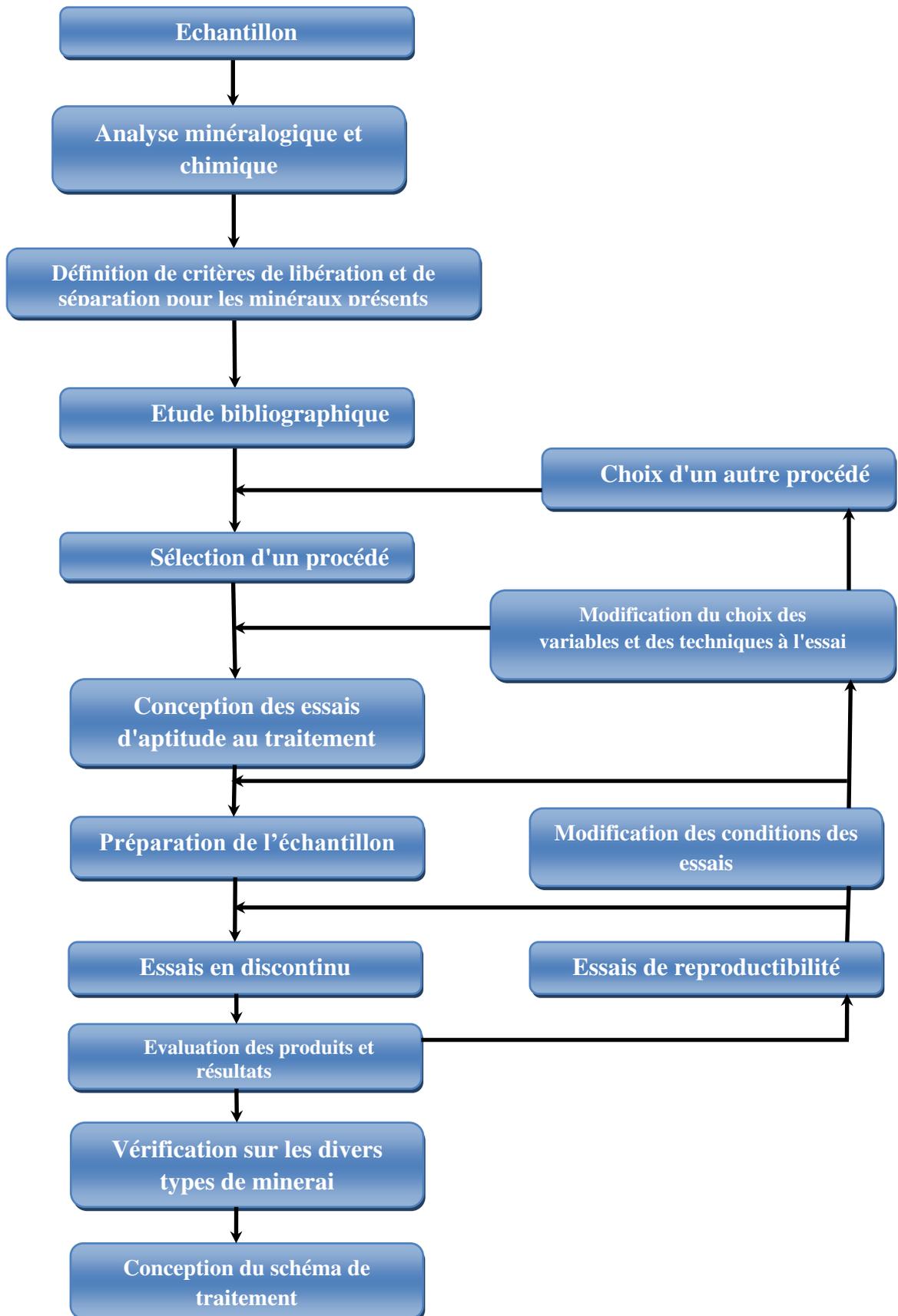


Figure IV.4 Travaux nécessaires à la conception d'un schéma de traitement

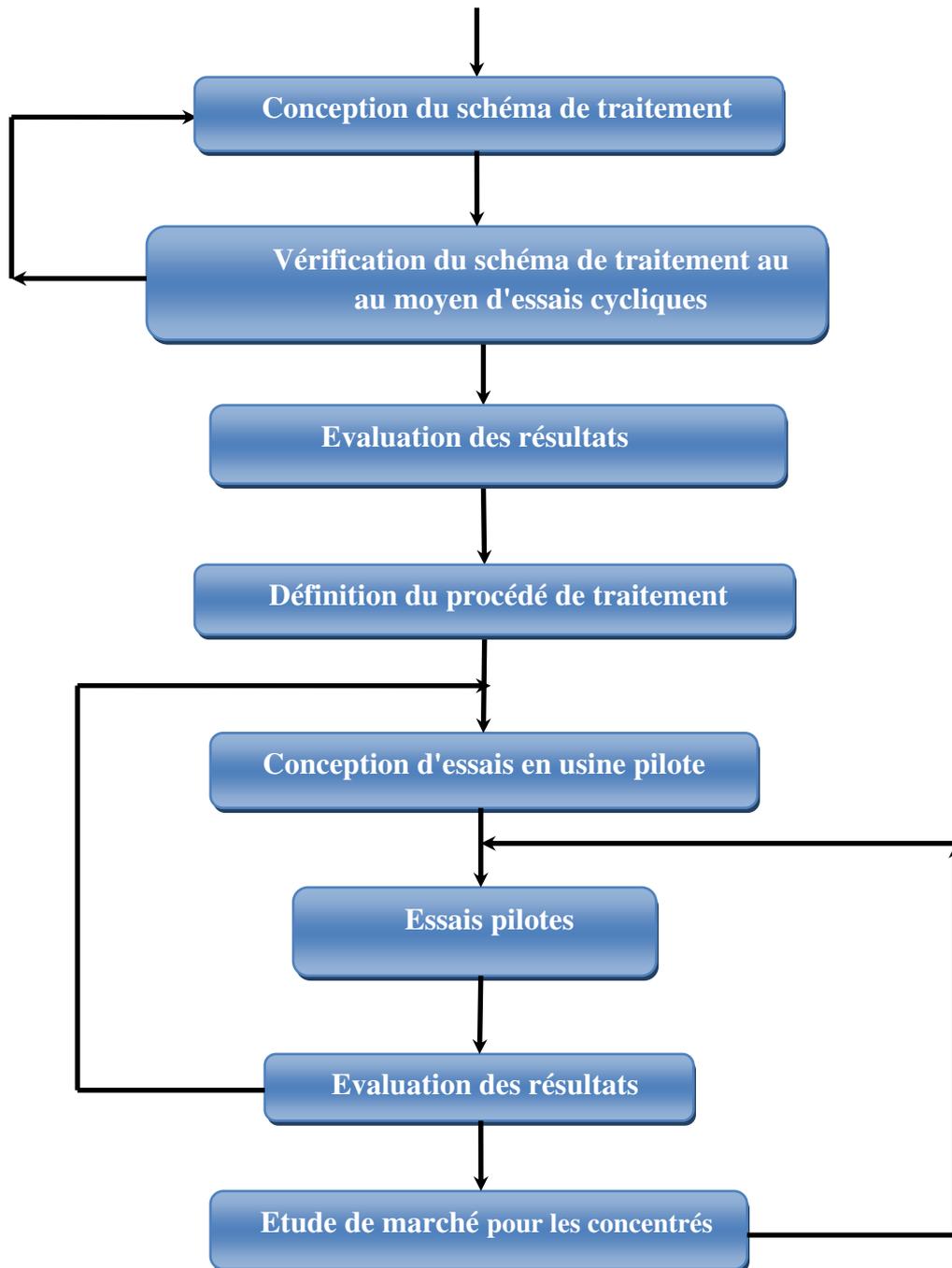


Figure IV.5 Travaux nécessaires à la conception d'une usine de traitement

4) Production d'échantillons importants de concentrés marchands pour évaluation par les utilisateurs primaires. Ceci est particulièrement valable pour les substances utiles pour lesquelles des échantillons de concentré de plusieurs tonnes sont parfois nécessaires pour obtenir de la part des industries concernées (céramique, chimie, verrerie, etc...) une évaluation du prix d'achat,

5) Obtention de données économiques précises.

Le développement récent des techniques instrumentales en minéralogie a permis d'atteindre un niveau de perfection assez remarquable dans le type de la qualité des informations que l'on peut actuellement obtenir. On doit en particulier signaler que :

- L'analyse ponctuelle (sur un volume de quelques microns cubes) est possible grâce à la microsonde électronique.

- L'analyse texturale de sections polies ou de lames minces est obtenue rapidement et automatiquement au moyen d'analyseurs d'image.

- L'évaluation de la texture des minéraux fins est accessible grâce au microscope électronique à balayage.

La combinaison de ces trois appareils, utilisés par des minéralogistes compétents permet de répondre à la plus grande partie des problèmes qui se posent aux minéralurgistes pour l'évaluation des produits, en combinaison avec les méthodes déjà plus classiques que sont l'identification au microscope optique, l'analyse thermique, l'analyse par spectrométrie infrarouge et l'analyse par diffraction des rayons X.

L'analyse chimique des produits peut permettre, après identification minéralogique, de suivre le comportement du minéral de valeur, dans le cas où il est le seul minéral porteur de l'élément à valoriser, au moyen de la simple connaissance de la composition élémentaire des matériaux.

Dans les cas favorables, qui sont heureusement les plus fréquents, l'analyse chimique élémentaire permettra donc de répondre à la plupart des questions que l'on peut se poser sur le comportement de minéraux au cours des traitements.

En outre, un centre de minéralurgie doit avoir à sa disposition un laboratoire d'analyse chimique possédant les moyens nécessaires pour réaliser rapidement et en toute sécurité toutes analyses que l'on est susceptible de rencontrer au cours des opérations de traitement de minerai. (G. Barbery 1977).

## **IV.2. TRAVAUX DE RECHERCHES ANTERIEURS SUR LES PROCEDES DE TRAITEMENT DE FER DE GARA DJEBILET**

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 oolitiques importants. A l'heure actuelle, il n'existe pas de procédé industriel sûr et fiable permettant l'enrichissement et la déphosphoration des minerais de fer oolithique phosphoreux. 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.

Ainsi, quelques travaux réalisés par des bureaux d'études étrangers portant sur le traitement du minerai de Gara Djebilet par la recherche de procédés fiables permettant l'augmentation de sa teneur en fer ainsi que la réduction de sa teneur en phosphore à des niveaux acceptables permettant son exploitation. Citons par exemple :

Les autorités Algérienne ont confié en 1964 à un bureau d'étude Français en occurrence l'Institut de Recherche de la Sidérurgie Française (IRSID) sur la possibilité de traitement des minerais de fer de Gara Djebilet. Ce bureau a effectué des essais comparatifs de triage magnétique à faible intensité, par voie humide, avec ou sans grillage magnétisant, réalisés sur les produits du triage magnétique par voie sèche. Les échantillons ont été broyés à 50  $\mu\text{m}$  et soumis à une séparation magnétique par voie humide. Ces essais ont montrées que les concentrés obtenus contiennent une plus grande proportion de phosphore lié au fer dont le pourcentage est souvent supérieur à 0.4 %

En 1977 une autre étude avec le bureau (IRSID), portant sur l'agglomération en boulettes (pelletisation) du minerai de Gara Djebilet et du comportement de celles-ci au cours de la réduction. Les résultats de cette étude ont montré que le minerai a été bouleté dans de bonnes conditions après broyage et une addition de 0.7% de bentonite (J.L. GERBE et al. 1977).

Le traitement thermique utilisé a permis d'obtenir des boulettes de bonnes caractéristiques physiques à froid. Le comportement de ces boulettes en cours de réduction n'est pas très bon : Dans les conditions de haut fourneau et dans les conditions du four à cuve de pré-réduction.

L'utilisation de ces boulettes ne peut donc être recommandée tant pour l'utilisation au haut fourneau que pour la réduction directe.

## **IV. 3 BIBLIOGRAPHIE DES MINERAIS DE FER OOLITHIQUE RECENTE**

### **V. 3. 1 Introduction**

Une étude bibliographique est menée sur les minerais de fer oolitiques à forte teneur en phosphore. Plusieurs articles ont été publiés ces dernières années dans diverses revues internationales.

Le minerai de fer oolitique du gisement Gara Djebilet n'est pas considéré comme un produit commercial en raison de sa teneur élevée en phosphore. L'objectif de l'étude est de réduire la teneur en phosphore et d'augmenter la teneur en fer afin de répondre aux exigences de l'industrie sidérurgique.

Des travaux de recherche sont effectués sur des minerais de fer Oolitiques à forte teneur en phosphore. Plusieurs articles ont été publiés dans diverses revues internationales. Ionkov (2012, 2013) a soumis le minerai de fer oolitique à 900 ° C pendant une heure. L'application de la lixiviation, de la séparation physique et du lavage des sels a entraîné une

réduction du phosphore de 0,7 à 0,15%. Une étude sur le potentiel des micrococccus Le phosphore (P) du minerai de fer Agbaja du Nigeria a été réalisé par la technique de culture submergée O. W. Obot (2012).

Obiorah S.M.O. Et al. (2011) ont mené une recherche sur les effets du temps de résidence, du taux de dilution, de la concentration de lixiviat et de l'interaction des variables sur la déphosphoration du minerai de fer Agbaja. Ils ont utilisé la technique de lixiviation chimique [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] et la méthode de la surface factorielle. La fraction goéthitique peut être éliminée avec un prétraitement par chauffage d'environ 300 ° C pendant 1 h suivi d'une lixiviation caustique.

Les effets du temps de séjour, du taux de dilution, de la concentration du lixiviat et de l'interaction des variables sur la déphosphoration du minerai de fer Agbaja ont été étudiés par une technique de lixiviation chimique [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] et une méthode factorielle à 23 facteurs. Les résultats indiquent 96%, 95% et 96% d'élimination du phosphore à un temps de lixiviation de 36 min, une concentration de 0,3 M de réactif et un rapport de dilution de 1:2, respectivement. La perte de fer au cours de la lixiviation était inférieure à 0,15%. On peut conclure que la lixiviation acide du minerai de fer Agbaja est faisable dans les conditions de l'expérience.

La technologie de réduction directe par addition de carbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) et de séparation magnétique a été développée par Zhu, D. Q. et al. (2013) pour traiter le minerai de fer à haute teneur en phosphore de l'Australie-Occidentale.

Selon Yang, M. et al. (2015), les résultats indiquent que le phosphore dans le minéral est associé à la goéthite et existe principalement dans la phase amorphe Fe<sub>3</sub>PO<sub>7</sub>. Le phosphore reste dans la phase amorphe après avoir été torréfié au-dessous de 300 ° C. Li, Y. L et al. (2012), ont obtenu les meilleurs résultats pour l'élimination du phosphore dans le grillage à réduction directe de l'hématite Oolitique à haut phosphore de type Ningxiang, la seule condition que l'agent déphosphorant NCP et le nouvel agent de déphosphoration TS soient utilisés ensemble.

Un meilleur taux de récupération a été obtenu par grillage à réduction directe avec agent de déphosphoration suivi de deux étapes de concassage et de séparation magnétique XU, C. Y et al (2012). La teneur en phosphore a diminué de 0,82% dans le minerai brut et de 0,06% dans le concentré.

Une nouvelle méthode (basée sur la séparation des gaz et la séparation de la matière fondue) a été proposée pour extraire le phosphore du minerai de fer à haute teneur en phosphore, dont la teneur en phosphore était de 1,25% et 50,0% de fer. Tang, H. Q et al. (2010).

Le minerai de fer oolitique du gisement Gara Djebilet n'est pas considéré comme un produit commercial en raison de sa teneur élevée en phosphore. L'objectif de l'étude est de réduire la teneur en phosphore et d'augmenter la teneur en fer afin de répondre aux exigences de l'industrie sidérurgique.

Obiorah S.M.O. Et al. (2011) ont mené une recherche sur les effets du temps de résidence, du taux de dilution, de la concentration de lixiviat et de l'interaction des variables sur la déphosphoration du minerai de fer Agbaja. Ils ont utilisé la technique de lixiviation chimique [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] et la méthode de la surface factorielle. La fraction goéthitique peut être éliminée avec un prétraitement par chauffage d'environ 300 ° C pendant 1 h suivi d'une lixiviation caustique.

### **IV. 3. 2 Situation du minerai de fer de Gara Djebilet**

L'étude minéralurgique réalisée sur le minerai de fer a pour but la détermination des différentes espèces minérales. L'observation par méthodes analytiques et l'étude de leurs propriétés physico-chimique servent à bien caractériser le matériau envisagé pour lequel on opte pour le procédé adéquat à cette caractérisation.

En fonction des résultats obtenus dans le chapitre de la caractérisation, le minerai de fer oolithique de Gara Djebilet a une teneur en fer 57.0 %. Le choix du procédé de traitement dépend de son devenir à l'échelle industrielle, du coût qui doit être admissible lors son commercialisation, on tient compte des contraintes environnementales. La perspective envisagée c'est de diminuer le taux des éléments nuisibles en premier ordre le phosphore qui est de 1.89%, ce taux réduit considérablement la valeur marchande internationale du minerai étudié.

Ce travail scientifique de thèse porte essentiellement sur la caractérisation et le traitement du minerai de fer oolithique de Gara Djebilet, Tindouf, Algérie. Les analyses chimiques et minéralogiques effectuées sur l'échantillon représentatif prélevé dans la zone étudiée montrent la forte présence d'oxyde de phosphore P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Cela affecte négativement la qualité des produits sidérurgiques. L'objectif de la présente étude est de réduire la teneur en impuretés dans le minerai de fer de ce gisement.

Donc, 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.

La plupart des gisements de fer oolithiques n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'attention et ce, pour différentes raisons. Ces gisements présentent un certain nombre de caractéristiques complexes qui rendent inadéquates les méthodes traditionnelles de valorisation du minerai de fer. Tout d'abord, la faible concentration de fer et les niveaux relativement élevés de silice et de phosphore rendent les techniques traditionnelles inutilisables.

La minéralogie du fer oolithique est souvent non magnétique, aussi on ne peut obtenir de concentré par séparation magnétique. Ensuite, les minéraux qui contiennent du fer sont extrêmement fins et sont répartis de manière aléatoire dans les oolites ; ainsi, même après avoir effectué le micro-broyage nécessaire pour les séparer, ils ne peuvent être concentrés par flottation. Enfin, une fraction importante du phosphore fait partie du cristal ferrifère, aussi les moyens mécaniques de séparation ne peuvent être utilisés.

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'épingles quelquefois à peine perceptibles à l'œil nues. Chaque oolithe est généralement formé de couches concentriques de peroxyde de fer hydraté.

Les oolithes sont des petits grains sphériques ou ferrugineux, composés d'un corps central entouré de fines couches concentriques superposées et ressemblant à un œuf de poisson. Souvent les infiltrations amènent, autour de ces grains de sable, le dépôt d'enveloppes concentriques de carbonate de chaux, donnant naissance à des oolithes.

### **IV. 3. 3 Matériels et méthode**

#### **IV. 3. 3.1 Collecte et caractérisation des échantillons**

Les échantillons de minerai de fer sur lesquels ce travail est basé sont collectés à différents endroits dans le gisement de Gara Djebilet, afin de couvrir la zone d'étude maximale avec un niveau de fiabilité acceptable, l'échantillon brut et représentatif est présenté sur la figure IV.6.



**Figure IV.6** Echantillon brut de minerai de fer de Gara Djebilet

L'échantillon de minerai de fer est broyé et soumis à une analyse granulométrique. L'échantillon de minerai de fer est broyé et soumis à une analyse chimique en utilisant FX, dans d'autres pour définir la composition chimique du minerai de fer brut broyé de Gara Djebilet.

Donc, pour identifier ce minerai, un prélèvement des échantillons sur site est effectué afin d'avoir un échantillon représentatif. Une caractérisation est réalisée sur des sections polies et des lames minces, l'analyse chimique de l'échantillon initial, l'analyse DRX des différentes fractions granulométriques de l'échantillon initial et l'analyse chimique granulaire des principaux éléments du minerai de fer de Gara Djebilet par FX et analyse quantitative par EDX 74.

Des essais sont effectués sur différents types de tranches granulométriques (-0.250 + 0.125 ; -0.125 + 0.063 ; -0.045 + 0.063 et -0.045 + 0) mm.

Afin de permettre à cette étude d'avoir plus d'informations sur l'échantillon à étudier, une analyse granulochimique est réalisée au Laboratoire de l'Office national de la recherche géologique et minière de Boumerdes, en Algérie.

Les résultats de l'analyse par fluorescence X des différentes tranches granulométriques des éléments majeurs, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sont présentés dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** Résultats granulochimique des éléments majeurs du minerai de Fer de Gara Djebilet par fluorescence X

<b>Tranches granulométriques</b>	<b>Rendement</b>	<b>Refus cumulatif</b>	<b>Passants cumulatifs</b>	<b>Teneur fer</b>	<b>Teneur P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>
<b>Mm</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
> 2	53.65	53.65	100	59.62	1.76
-2 + 1	13.96	67.61	46.35	56.18	1.63
-1 + 0.5	10.91	78.52	32.39	60.70	1.92
-0.5 + 0.25	06.41	84.93	21.48	57.04	1.80
-0.25 + 0.125	06.56	91.49	15.07	57.81	1.74
- 0.125 + 0.063	06.02	97.51	08.51	61.09	1.97
-0.063 + 0.045	01.04	98.55	02.49	60.82	1.90
-0.045 + 0	01.45	100	01.45	59.57	2.12
<b>TOTAL</b>	100	-	-	-	-

Les résultats des analyses granulochimique des éléments majeurs du minerai de fer de Gara Djebilet dans le chapitre IV montre que plus le minerai est fin plus la teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est élevée et atteint 2.12%.

Cette étude est basée essentiellement sur l'effet des variables de processus de traitement du minerai de fer de Gara Djebilet, avec l'utilisation de chlorure de calcium.

Le CaCl<sub>2</sub> est un sel à caractère hygroscopiques (imperméable) dû au chlorure, il absorbe l'humidité qui se trouve dans le minerai et forme une solution saline qui se combine aux particules du mélange (minerai et éléments nuisibles).

La solution de CaCl<sub>2</sub> ne s'évapore pas facilement grâce à sa haute température de vaporisation et à la tension superficielle qui la lie aux particules fines qui seront piégées par la suite (Laquet Tennis, Béton poreux, Tennis info N°430, 2011).

Ce travail de recherche réside dans l'application du procédé de torréfaction utilisant le chlorure de calcium à différentes granulométries, températures et concentrations. Selon l'analyse granulochimique réalisée au laboratoire de recherche géologique et minière de

Boumerdes, en Algérie, la maille de libération du minerai de fer de Gara Djebilet commence à partir de - 0.25mm. De ce fait, les tranches granulométriques prises en considération pour les essais de torréfaction sont : (- 0.250 + 0.125; - 0.125 + 0.063; - 0.063 + 0.045 et - 0.045 + 0.00) mm.

Un échantillon représentant le mélange de chlorure de calcium et le minerai de fer de poids total égal à 100g. Ce mélange est composé d'un rapport en fonction des tranches granulométriques.

- 10 grammes de Ca Cl<sub>2</sub> ajouté à 90 grammes de minerai de fer ;
- 15 grammes de Ca Cl<sub>2</sub> ajouté à 85 grammes de minerai de fer ;
- 20 grammes de Ca Cl<sub>2</sub> ajouté à 80 grammes de minerai de fer ;
- 25 grammes de Ca Cl<sub>2</sub> ajouté à 75 grammes de minerai de fer.

Une fois que ces rapports sont établis, chaque un des échantillons est subdivisé en quatre sous échantillons pour subir une torréfaction à différentes températures : 600°C, 700, 800 et 900°C à l'aide du four Naberterm, figure IV.7.

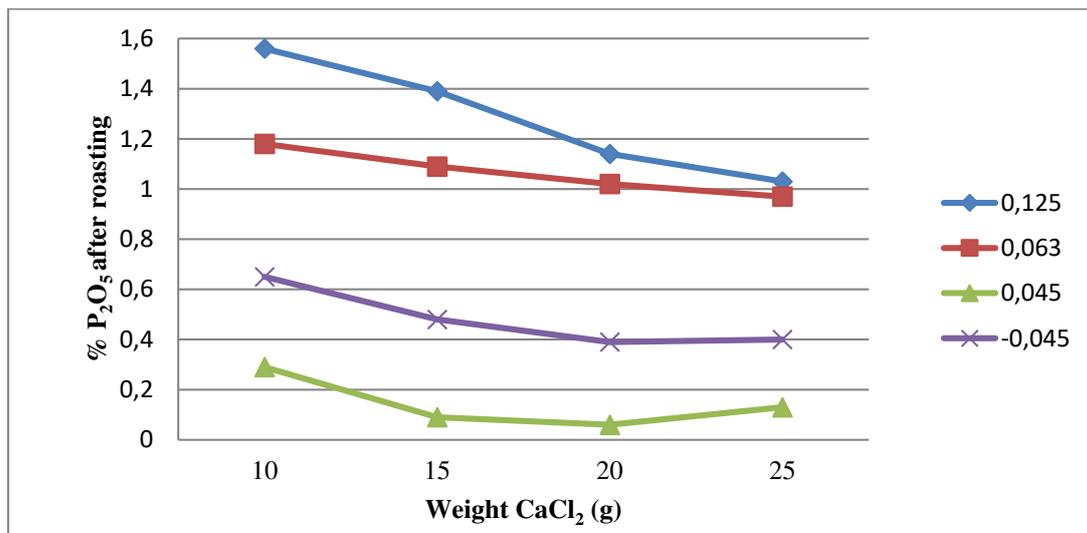


Figure IV.7 Four de laboratoire Naberterm température maximale 1100°C

## **IV. 4 ETUDE DES PARAMETRES INFLUANTS SUR LA QUALITE DU PRODUIT**

### **IV. 4. 1 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, l'effet de la granulométrie sur le phosphore est présenté sur la figure IV.8.

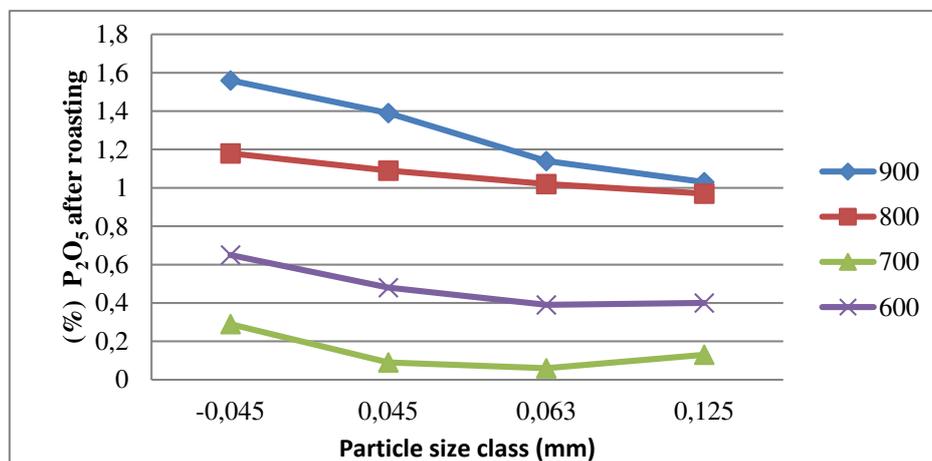


**Figure IV.8** Effet de la granulométrie sur le phosphore pendant la torréfaction

La taille des particules influence la réduction du phosphore, on peut voir sur le graphique que lorsque la taille des particules devient plus fine, le taux du phosphore diminue avec l'augmentation du chlorure de calcium.

#### IV. 4. 2 Effet de la température sur la teneur en phosphore du minerai de fer

L'effet de la température a un impact sur le phosphore pendant la torréfaction du minerai de fer est montré sur la figure IV.9.

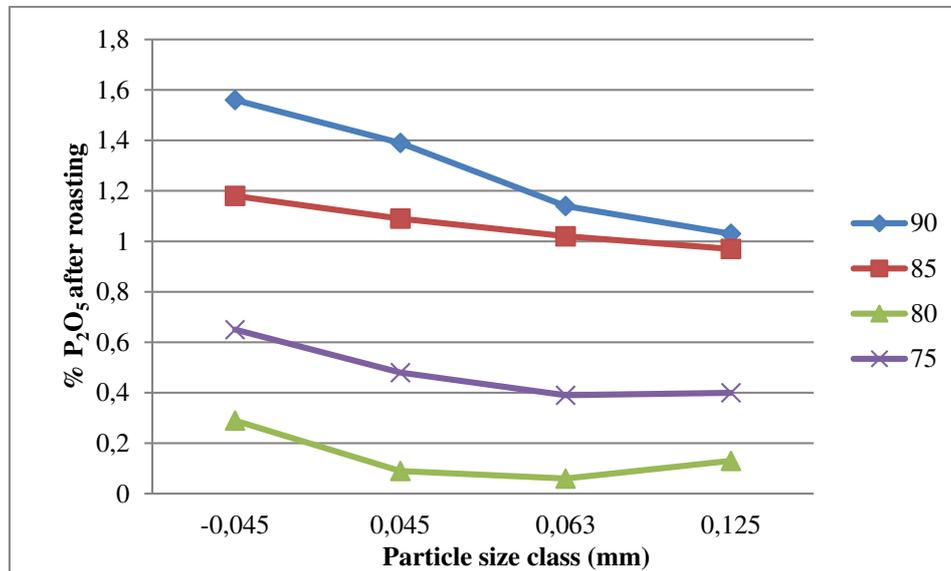


**Figure IV.9** Effet de la température sur le phosphore pendant la torréfaction du minerai de fer.

On constate que la température a un impact sur le phosphore lors du grillage du minerai de fer Gara Djebilet, l'augmentation de la température augmente le taux d'élimination du phosphore.

#### IV. 4. 3 Effet de l'additif CaCl<sub>2</sub> sur la teneur en phosphore dans le minerai de fer

L'effet de l'addition du chlorure de calcium avec le minerai de fer dans le mélange est montré sur la figure IV.10.



**Figure IV.10** Effet de l'additif CaCl<sub>2</sub> 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.

#### IV. 5 RESULTATS ET ARGUMENTS

Le minerai de fer est très demandé sur le marché mondial. Cependant, les impuretés contenues doivent être traitées pour que le produit soit commercialisable. Par conséquent, le minerai de fer traité par ce procédé répond aux exigences de l'industrie et aux normes internationales, en particulier l'industrie sidérurgique; la teneur en fer est de 61.67% et de 0.06% de phosphore.

L'originalité de ce travail de recherche réside dans l'application du procédé de torréfaction utilisant du chlorure de calcium à différentes granulométries, températures et concentrations. Ce processus nous permet de réduire le phosphore à un niveau acceptable pour l'industrie sidérurgique. Ce procédé est simple, économique et ne nécessite pas d'investissement dans des équipements industriels.

Les résultats des essais de traitement du minerai de fer de Gara Djebilet –Tindouf réalisés sont montrés sur le tableau IV.2.

**Tableau .IV.2** Résultats des essais de Traitement du minerai de fer de Gara Djebilet -Tindouf

Classes granulométriques des particules, (mm)	Valeurs						
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Masse CaCl <sub>2</sub> (g)	Masse Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	Température °C	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
<b>-0.250 + 0.125</b>					600	1.56	57.93
	1.74	57.81	10	90	700	1.39	57.97
					800	1.14	58.68
					900	1.03	58.96
<b>-0.125 + 0.063</b>					600	1.18	60.67
	1.97	61.09	15	85	700	1.09	61.84
					800	1.02	61.97
					900	0.97	62.01
<b>-0.063 + 0.045</b>					600	0.29	60.78
	1.90	60.82	20	80	700	0.09	61.19
					800	0.06	61.67
					900	0.13	60.96
<b>-0.045</b>					600	0.65	59.53
	2.12	59.57	25	75	700	0.48	58.61
					800	0.39	53.39
					900	0.40	53.46

L'étude de l'effet de la granulométrie des particules de minerai de fer en fonction du dosage du CaCl<sub>2</sub> pour différentes tranches granulométriques est prise en compte, compte tenu de son impact sur la qualité du produit final. Les résultats obtenus montrent que la diminution de la taille des particules a un impact sur la déphosphoration du minerai de fer. Les meilleurs résultats sont obtenus pour la gamme de tailles de particules - 0,063 + 0,045 mm.

L'influence de la température sur le phosphore pendant la torrification du minerai de fer de Gara Djebilet est étudiée. Les résultats montrent qu'une augmentation de la température de 600 à 900 ° C entraîne une diminution du taux du phosphore dans le minerai de fer. Lorsque la température est élevée, une meilleure déphosphoration est obtenue.

Le chlorure de calcium utilisé comme ajout avec le minerai de fer de Gara Djebilet avec un pourcentage de 10, 15, 20, 25% 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 20% de CaCl<sub>2</sub> et de 80% de minerai de fer.

Dans cette étude, la possibilité d'utiliser un métal alcalino-terreux (CaCl<sub>2</sub>) pour une déphosphoration du minerai de fer du gisement de Gara Djebilet, en vue de son exploitation. Il est constaté que le minerai de fer de ce gisement dépend des paramètres du procédé de grillage, tels que la taille des particules, la température et l'additif oxydant.

Les résultats d'analyses obtenus montrent que la composition minéralogique comprend: de l'hématite, du phosphore, de la silice, de l'alumine et de la chaux. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les paramètres suivants: la gamme de tailles de particules – 0.063

+ 0.045 mm, lors de la libération complète du composant utile de sa matrice avec une teneur en  $P_2O_5$  égale à 0.06% et  $Fe_2O_3$  égale à 61.67%. L'effet du  $CaCl_2$  (additif alcalino-terreux) sur le phosphore lors du grillage du minerai de fer dans un rapport de 20%  $CaCl_2$  et 80%  $Fe_2O_3$  contribue grandement à la réduction du phosphore dans le minerai de Gara Djebilet, Tindouf, Algérie.

Cependant, il est prouvé que la déphosphoration du minerai de fer de Gara Djebilet dépend du processus de variables mentionné ci-dessus et a donné des résultats très encourageants. Les résultats des essais de traitement du minerai de fer de Gara Djebilet – Tindouf sont présentés dans le tableau IV.2.

### **Conclusion**

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 oolitiques importants. Actuellement, il n'existe pas de procédé industriel sûr et fiable permettant l'enrichissement et la déphosphoration des minerais de fer oolithique phosphoreux.

Les analyses chimiques et minéralogiques effectuées sur l'échantillon représentatif prélevé dans la zone étudiée montrent la forte présence d'oxyde de phosphore  $P_2O_5$ . Cela affecte négativement la qualité des produits sidérurgiques.

Une caractérisation est réalisée sur des sections polies et des lames minces, l'analyse chimique de l'échantillon initial, l'analyse DRX des différentes fractions granulométriques de l'échantillon initial et l'analyse chimique granulaire des principaux éléments du minerai de fer de Gara Djebilet par FX et analyse quantitative par EDX 74.

Le travail de recherche réside dans l'application du procédé de torréfaction utilisant le chlorure de calcium à différentes granulométries, températures et concentrations. Selon l'analyse granulochimique la maille de libération du minerai de fer de Gara Djebilet commence à partir de – 0,25mm.

L'effet de la granulométrie sur le phosphore pendant la torréfaction, montre comment la taille des particules influence la réduction du phosphore. Plus la taille des particules deviennent plus fine, plus le taux du phosphore diminue avec l'augmentation du chlorure de calcium.

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

## CONCLUSION GENERALE

- La production mondiale de minerai de fer a atteint 3320 millions de tonnes en 2015, soit une légère diminution par rapport à 2014 (3420 millions de tonnes).
- En dehors des hydrocarbures, le fer est l'un des principales richesses minières de l'Algérie. L'exploitation des gisements des minerais de fer a toujours eut une place prépondérante dans l'industrie extractive du pays.
- L'analyse par DRX de l'échantillon initial montre que la majorité des pics sont prédominés par l'hématite et le quartz ; bien que la magnétite et la calcite ne représentent des composants minéralogiques mineurs.
- Le minerai de Gara Djebilet est un minerai sédimentaire oolithique ayant plus ou moins subi des phénomènes d'oxydation. Les oolithes sont constitués par la sidérose et le chlorite. C'est un minerai acide contenant des teneurs en  $\text{SiO}_2$  élevées, d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 à 5%), de phosphore (0.8%) et d'arsenic (0.03%).
- Le minerai de fer de Gara Djebilet a connu plusieurs essais d'enrichissement plus ou moins détaillés, qui ont été réalisés par des organisations diverses, avec des résultats variables. Les essais d'enrichissement du minerai soumis par Kaiser portent essentiellement sur : Triage du minerai brut ; Séparation humide à haute intensité magnétique (SHHIM) ; Frittage magnétique et une réduction directe.
- L'analyse granulométrique montre un produit présentant deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de : (-0.045 mm+1 mm) et +2 mm donc la distribution des particules dans les tranches granulométriques est de manière irrégulière
- L'observation microscopique optique est la méthode la plus simple et la seule qui peut se considérer comme absolue ; elle permet à l'opérateur de prononcer un jugement subjectif concernant le diamètre ou la forme des gouttes. Cependant, elle peut produire des mesures biaisées quand on veut faire des mesures objectives, comme des déterminations granulométriques.
- Les analyses chimiques et minéralogiques effectuées sur l'échantillon représentatif prélevé dans la zone étudiée montrent la forte présence d'oxyde de phosphore  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Cela affecte négativement la qualité des produits sidérurgiques.
- Le travail de recherche réside dans l'application du procédé de torréfaction utilisant le chlorure de calcium à différentes granulométries, températures et concentrations.

Selon l'analyse granulochimique la maille de libération du minerai de fer de Gara Djebilet commence à partir de - 0.25 mm.

- L'effet de la granulométrie sur le phosphore pendant la torréfaction, montre comment la taille des particules influence la réduction du phosphore. Plus la taille des particules deviennent plus fine, plus le taux de phosphore diminue avec l'augmentation du chlorure de calcium.
- Le chlorure de calcium est utilisé comme additif en proportion avec le minerai de fer de Gara Djebilet. L'impact de ce dernier est important puisqu' il contribue à la réduction du taux phosphore dans le concentré de fer.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**AKKOUCHE M., 2007.** Application de la datation par traces de fission à l'analyse de la thermicité de bassins à potentialités pétrolières. Exemple de la cuvette de Sbaâ et du bassin de l'Ahnet-Nord (plate-forme saharienne occidentale, Algérie), Thèse de doctorat, l'Université de Bordeaux 1.

**ALGERIE-FOCUS., 2013.** 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.

**ALIEV M. et al., 1971.** Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz du Sahara algérien. Tome 1. Sonatrach. Altamira Rotopress, S. A. Madrid. Espagne. 275p.

**AMROUCHE F., NEDJARI A., 2004.** Géodynamique du bassin de Tindouf au paléozoïque.

**AUSTRALIAN.,** Journal of Agricultural and Resource Economics, 57, pp. 521–538.

**BARBERY G (BRGM), 1977.** Conception d'un centre de minéralurgie. 1<sup>er</sup> séminaire Brésilien de technologie minérale. Poços de Caldas – M-G- Brésil 27 juin au 1<sup>er</sup> Juillet 197.

**BELHAI D et al., 1996.** Paléo pôle Dévonien pour le massif du Chenoua (Algérie) : Accrétion du domaine Kabyle à l'Afrique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série 2. Sciences de la terre et des planètes, 322 (8) (1996) 685 - 691.

**BERSI M et al., 2010.** Aerogravity and remote sensing observations of an iron deposit in Gara Djebilet, southwestern Algeria. Journal of African Earth Sciences, 116, 134-150.

**BERTRAND S J et al., 1990.** Cover sequences of the West-African craton. In : Dallmeyer R.D. et Lécorché J.-P. (Eds.), The West African orogens and circum-Atlantic correlatives. Springer Verlag. 6582.

**BERTRAND - SARFATI J. et al, (1996).** Une faune d Ediacara découverte pour la première fois dans le groupe de Cheïkhia (Grès supérieurs), Néoprotérozoïque Saharien, Algérie. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie Vol. 5, n° 2, p 115 - 128.

**BERSI M et al., 2016.** Aero-gravity and remote sensing observations of an iron deposit in Gara Djebilet, southwestern Algeria. Journal of African earth sciences, 116, 134-150.

**BESSELES B., 1977.** Géologie de l'Afrique Le craton ouest-africain. Mémoires BRGM, 88 Paris.

**BESSELES B., 1977.** Géologie de l'Afrique : le carton ouest africain, volume 1, N° 88-89, pages 402.

- BITAM L et al., 1996.** Les formations paléozoïques anté-carbonifères du sous-bassin de Djebilet (flanc sud du bassin de Tindouf, Nord-Ouest du Sahara Algérien). *Mémoires du Service Géologique de l'Algérie*, n° 8, pp. 91-111.
- BOUNOUALA M., 1988.** Recherche et élaboration d'une technologie de traitement du minerai de fer cuivreux de l'Ouenza. Thèse magistère, Université d' Annaba pp.8.
- BUBENICEK L et al., 2017.** « FER - Minerais de fer », Encyclopédie Universalise.
- BUMBY A J et al., 2005.** The geodynamic setting of the Phanerozoic basins of Africa Original Research Article ; sciencedirect pp. 1-12.
- CHABOU M C., 2001.** Etude Pétrographique et Géochimique du Magmatisme Mésozoïque de l'ouest de la Plate-forme Saharienne. Mémoire de Magister, ENSP, Alger.
- CHABOU A., 2001.** Lithostratigraphie du bassin de Tindouf.
- CORBION J., 2003.** Le savoir...fer : glossaire du haut fourneau – 4<sup>e</sup> édition - 2003, (page 1609, Tome II).
- CORNET A., 1964.** Introduction à l'Hydrogéologie du Sahara, Algérie', *Revue Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, Vol. 6, N°1, pp. 5 – 72.
- DELACHAUX N., 2005.** Roches et Minéraux du monde 2005.
- DESTOMBES J et al., 1985.** Sur la tectonique précoce hercynienne et le rôle des accidents antéschisteux dans le Haut-Atlas occidental paléozoïque au Sud d'Imi-n-Tanout (Maroc). Relations avec les Djebilet occidentales. *C. R. Acad. SCI., Paris, sér. II, t. 301*, p. 1157-1162.
- DINARD., Janvier 2012.** C.N.R.S, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Jérôme Fournier, Chantal Bonnot-Courtois Raphaël Paris, Olivier Valloire, Monique Vote.
- DUMONT M., 2007.** Annuaire des minéraux du canada, pp 1, 8-9
- DURAND C., 1893.** Industrie minière. Lorraine. 1893, p.15.
- EPA, Environmental Protection Agency (US), 1994.** Extraction and Beneficiation of Ores and Minerals. Technical Resource Document. Volume 3.Iron, p 122.
- FABRE J., 1971.** Introduction a` la géologie du Sahara. S.N.E.D., Alger, 422pp.
- FABRE J. , 1976.** Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions avoisine. Soc. Nat. Ed. SNED. Alger, 142 p., 163 fig., 4 tab, 4 pl.
- FABRE J., 2005.** Géologie du Sahara occidental et central. *Tervuren Afr. Geosci. Coll.*108, p 572.
- GOSSELIN A et al., 1999.** Protocole D'évaluation De La Traitabilité Des Sédiments, Des Sols Et Des Boues A L'aide Des Technologies Minéralurgiques. SainteFoy, Canada, pp. 148.

- GROVES M J et al., 1972.** "Particule Size Analysis", Soc. Analyt. Chemistry, London.
- GRÜNER EL. , 1878.** Traité de métallurgie-métallurgie générale, t. 1, agent et appareils métallurgiques, principe de la combustion, Dunod, 1878 partie I, p. 233
- GUERRAK S et al ., 1985.** Les minéralisations ferrifères du Sahara Algérien : le gisement de fer oolithique de Mecheri Abdelaziz (bassin de Tindouf).
- GUERRAK S., 1988.** Geology of the early Devonian oolitic iron ore of the Gara djebilet field, Saharan platform, Algeria. Ore geology reviews, 3(4), 333-358.
- GUERRAK S., 1988.** Geology of the Early Devonian oolitic iron ore of the Gara Djebilet field, Saharan Platform, Algeria. Ore Geology Reviews, 3(4), 333-358.
- GUIRAUD R., 1975.** L'évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du Hodna et des régions voisines. Rev. Géogr. Phys. Et Géol. Dyn. 17, 427-446.
- HOENIG M et al., 2002.** Préparation d'échantillons de l'environnement pour analyse minérale, Dossier P4150, Techniques de l'Ingénieur, p 12.
- HOLLARD H., 1970.** Le Dévonien du Maroc et du Sahara nord-occidental, In: International Symposium on Devonian System, Alberta. Soc.Petrol. Geol., 1, 203-244.
- HURST L., 2013.** West and Central African iron ore development and its impact on world prices.
- IDRES A et al. 2005.** Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer de l'Ouenza par radiométrie, Journal de Physique, éd. EDP sciences, France.
- IONKOV K., Gaydardzhiev S., Bastin D., de Araujo, A. C., & Lacoste M. 2012.** Removal of phosphorous through roasting of oolitic iron ore with alkaline earth additives. In Proceedings of the XXVI International Mineral Processing Congress (pp. 2194-2205). New Delhi.
- IONKOV K., Gaydardzhiev, S., D'araujo A. C., Bastin, D., & Lacoste M. 2013.** Amenability for processing of oolitic iron ore concentrate for phosphorus removal. Minerals Engineering, 46, 119-127.
- LAPPARENT A. 1886.** Géologie des oolithes. 1886, p.65.
- LI Y L et al., 2012.** New dephosphorizing agent for phosphorus removal from high-phosphorus oolitic hematite ore in direct reduction roasting. Journal of Central South University (Science and Technology), 3, 009.
- MANIEH A A., 1984.** Oolite libération of oolitic iron ore, Wadi Fatima, Saudi Arabia. Int.J. Miner. Process., 13: 187-192.

**MARY JY et al., 2005.** (ill. Pierre-Albert Leroux), Hommes et ouvrages de la ligne Maginot, t. 1, Paris, éditions Histoire & collections, coll. ( L'encyclopédie de l'Armée française » n° 2, 2000 (réimpr. 2001 et 2005), 182 p.

**MATHERON G., 1955.** Le Gisement de fer de Gara Djebilet, extrait du bulletin scientifique B.R.M.A .N°2.

**Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM), 2007.** Direction générale des mines, Bilan des activités minières, Vol.1 pp8-9.

**OBIORAH S et al., 2011.** Beneficiation Processing of Agbaja Iron Ore By Chemical Leaching Technique. New York Science Journal, 4(5), 22-27.

**OBOT O et al., 2012.** Removal of phosphorus from Nigerias Agbaja iron ore through the degradation ability of Micrococcus species. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 4(4), 114-119.

**OUZEGANE K et al., 2003.** Textures and phase relationships in ferrous granulites from Tidjenouine (Hoggar, Algeria): fayalite- ferrossilite-quartz secondary assemblage. Journal of African Earth Sciences, 37, 241-255.

**PAYCHENG C O., 1997.** Montpellier Échantillonnage, Passage du matériau hétérogène à l'échantillon représentatif. PARIS, 1997, page 9.

**PEREZ JB., 2013.** « Notes sur les oolites », Spéléo-Info Meurthe et Moselle n° 33 Comité départemental de spéléologie de Meurthe-et-Moselle, Villers-lès-Nancy, p. 2-6.

**PERRIN., 1994.** Histoire des Alaouites, Benoit-Méchin, Histoire des Alaouites, Librairie Académique, Page 165.

**PLAZIAT JC., 2017.** « OOLITES ou OOLITHES », Encyclopédie Universalise

**PREVOT C., 2013.** Les perles des cavernes du Spéleo-drome , Le P'tit Usania n° 178 Union spéléologique de l'agglomération nancéenne, Nancy, p. 1-2.

**SEDDIKI A. et al., 2004.** The volcano-sedimentary Boukaïs inlier (south-western Algeria): evidence for lithospheric thinning during the Late Neoproterozoic. Journal of African Earth Sciences. Vol. 39, Issues 3–5, Pages 257-266.

**SONATRACH 1987.** Document interne D.E.S-Division Exploration.

**SOULAIMANI A., et al. 2004.** The Tasrirt structure (Kerdous inlier, Western Anti-Atlas, Morocco): a late Pan-African transtensive dome. Journal of African Earth Sciences. Vol. 39, Issues 3–5, Pages 247-255.

**STATISTA G., 2010.** production-de-minerai-de-fer-par-pays-2010, Brunch Office.

**SWEDEN Wallingatan., 2017.** 34-11, 24 Stockholm, Sweden, 2017.

**TANG H** et al., **2010**. Phosphorus removal of high phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17(9), 1-6.

**WEC Algérie** ., **2007**. Cours de Géologie Saharienne « 3ème année géosciences, La géologie pétrolière de l'Algérie ».

**XU C** et al., **2012**. Mechanism of phosphorus removal in beneficiation of high phosphorous oolitic hematite by direct reduction roasting with dephosphorization agent. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(11), 2806-2812.

**YANG M** et al., **2015**. Roasting-induced phase change and its influence on phosphorus removal through acid leaching for high-phosphorus iron ore. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 22(4), 346-352.

**YELLISHETTYA M.**, Ranjith P.G., Tharumarajah A., **2010**. Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1084–1094.

**ZHU D Q** et al., **2013**. Upgrading and dephosphorization of Western Australian iron ore using reduction roasting by adding sodium carbonate. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(6), 505-513.