

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

Université Abderrahmane Mira



Faculté de Technologie
Département des Mines et géologie

Mémoire de Fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines et géologie
Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

MANSERI LAKHDAR

IGUI LYNDA

Thème

*Contribution à l'étude d'enrichissement du
minéral de fer de SIDI-MAAROUF- JIJEL
par séparation physique*

Soutenu le 07 /10/2021 devant le jury composé de:

President: M^r AKDIM Abdelghani

Promoteur : M^r BOUABDALLAH Soufiane

Examinatrice : M^{me} TAHRI Tourkia

2020/2021

Remerciement

Je remercie **DIEU** le tout puissant de m'avoir aidé et fourni le courage nécessaire, qui m'ont permis de réaliser ce mémoire, qui est un aboutissement à de longues et difficiles années d'études universitaires.

De nombreuses personnes ont contribué scientifiquement intellectuellement ou techniquement à la rédaction de ce mémoire.

Que toutes les personnes qui ont participé à ce projet de près ou de loin en soient pleinement remerciées.

Nous exprimons notre grande reconnaissance et mes vifs remerciements à mon promoteur **M^rBOUABDALLAH Soufian** pour la confiance, ses encouragements, et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Nous remercions également **M^r AKDIM Abdelghan** pour avoir accepté de presider le jury de la soutenance, ainsi que **M^{me}TAHRITourki** d'avoir accepté d'examiné ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux laboratoires de Génie des procédés de l'université A. Mira de Béjaia, laboratoire des mines de l'université Badji Mokhtar de Annaba, à l'unité de recherche scientifique en analyse physico-chimiques de l'université Ferhat Abbas de Sétif.

Enfin, nous remercions très vivement l'ensemble d'enseignant de département des Mines et géologie et tous mes amis et collègues de promotion 2021.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents. A mes frères et ma sœur.

A tous(tes) les enseignants qui ont contribué à ma formation.

A tous mes amis(es), collègues et camarades.

Lakhdar.

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents. A mes sœurs et mon frère.

A mon mari et à toute sa famille.

A tous(tes) les enseignants qui ont contribué à ma formation.

A tous mes amis(es), collègues et camarades.

Lynda.

Remerciements	I
Dédicaces.....	II
Sommaire	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	VIII
Introduction générale.....	IX
Conclusion générale	X
Références bibliographiques	XI
Résumé	XIV
Abstract	XIV

Chapitre I : Recherche bibliographique sur les méthodes de traitement du minerai de fer.

I.1. Introduction	01
I.2. Évaluation de la technologie d'enrichissement du minerai de fer.....	01
I.3. Techniques de traitement du minerai	01
I.4. Séparation physique	02
I.4.1.Méthode de séparation magnétique	02
I.4.1.1. Propriétés magnétiques	02
a. Diamagnétisme.....	03
b. Paramagnétiques.....	03
c. Ferromagnétisme.....	03
I.4.1.2. Types de séparateur magnétique.....	03
I.4.1.3. Séparation magnétique à basse intensité(SMBI).....	03
I.4.1.4. Séparation magnétique à haute intensité (SMHI).....	03
I.4.1.5. Séparation magnétique à haut gradient et/ou haut champ (SMHG).....	04
I.4.1.6. Séparation magnétique des minerais de fer	04
I.4.2. Méthode de séparation gravimétrique.....	05
I.4.2.1. Principe de la séparation gravimétrique.....	05
a. Milieu dense	06
b. Pulsation stratification (accélération différentielle)	06
c. Nappe pelliculaire fluente	06
I.4.2.2. Séparation gravimétrique du minerai de fer	06

I.4.3. Méthode de séparation électrostatique.....	06
IV.4.3.1. Principes de la séparation électrostatique.....	06
I.5. Séparation physico-chimique du minerai de fer.....	07
I.5.1. Définition de la flottation.....	07
I.5.2. Principe de la flottation.....	07
I.5.3. Réactifs de flottation.....	07
I.5.3.1. Les collecteurs.....	08
I.5.3.2. les activant.....	08
I.5.3.3. les déprimant.....	08
I.5.3.4. les moussants.....	08
I.5.3.5. les régulateurs ou les modificateurs de PH.....	08
CHAPITRE II: Etude géologique et minéralogique du gisement de fer de Sidi Maarouf.	
II.1. Etude du gisement de fer de Sidi Maarouf	09
II.1.1. Situation géographique de gisement	09
II.1.2. Histoire du gisement.....	09
II.2. Géologie de la région	10
Stratigraphie.....	10
II.3. Géologie du gisement.....	11
II.3.1. Stratigraphie	11
II.3.2. Pétrographie.....	12
II.3.2.1. Minéralisation.....	12
II.3.2.2. Affleurement	12
II.4. Définition du minerai de fer.....	13
II.5. Propriétés du minerai de fer.....	14
II.5.1. Propriétés chimiques	14
II.5.2. Propriétés physiques.....	14
II.6. Les types de minerai de fer.....	15
II.7. Production de minerai de fer.....	18
II.7.1. production mondiale de minerai de fer.....	18
II.7.2. Production du minerai de fer en Algérie	18
II.8. Le cours du minerai de fer sur le marché	19
II.9. Utilisation du fer.....	20
II.9.1. Dans la construction	20

II.9.2. Dans l'automobile.....	20
II.9.3. Industrie alimentaire.....	21
II.9.4. En pharmacie	21
II.9.5. Autre secteur d'utilisation	21

Chapitre III: Caractérisations physico chimiques et traitement du minerai de fer de Sidi Maarouf

III.1. Introduction	22
III.2. Prélèvement des échantillons.....	22
III.2.1. Préparation mécanique de l'échantillon	23
III.2.1.1. Concassage.....	23
III.2.1.2. Broyage.....	23
III.2.1.3. Homogénéisation et Quartage.....	24
III.2.1.4. Analyse granulométrique par tamisage.....	24
III.3. Caractérisations et Analyses minéralogiques.....	25
III.3.1. Analyses diffractométrique à rayons X.....	25
III.3.1.1. Principe	25
III.3.2. Analyse Infrarouge à transformé de fourier (FTIR)	26
III.3.2.1. Principe	27
III.3.2.2. Appareillage.....	27
III.3.2.3. Réactifs.....	27
III.3.2.4. Mode opératoire.....	27
III.4. Analyse par fluorescence à rayon X.....	28
III.4.1. Principe de fonctionnement.....	28
III.5. Essai d'enrichissement du minerai de fer de Sidi Maarouf	29
III.5.1. Essais de séparation de fer de Sidi Maarouf par séparation magnétique (S.M.H.I).....	29
III.6. Résultats et discussion.....	30
III.6.1. Analyse granulométrique par tamisage.....	30
III.6.2. Analyses diffractométrique à rayons X (DRX).....	32
III.6.3. Analyse par fluorescence à rayon X (FX).....	35
III.6.4. Analyse Infrarouge à transformé de fourier (FTIR).....	36
III.7. Séparation magnétique	38
III.8. Résultats de l'analyse chimique après séparation	40

Liste des figures

Fig.1 : Une carte géographique de Jijel	09
Fig.2 : Coupe géologique transversale de M'cid Aicha	12
Fig.3: Prix mensuels moyens par tonne de minerai de fer de 2010 à2019en USD	19
Fig.4 : Echantillon représentatif du minerai de fer.....	22
Fig.5 : Concasseur à mâchoire de laboratoire.....	23
Fig.6 : Opération de quartage.....	24
Fig.7 : Tamiseuse électrique de laboratoire.....	25
Fig.8 : Principe du diffractomètre dans la géométrie de Bragg-Brentano.....	26
Fig.9 : Schéma de principe d'un spectromètre FTIR.....	28
Fig.10 : Principe de base de l'analyse par XRF	29
Fig.11 : Séparateur magnétique à haute intensité	30
Fig.12 : Courbe de la distribution granulométrique du minerai de fer de Sidi Maarouf	32
Fig.13 : Analyse par DRX de la fraction (>4mm).....	33
Fig.14 : Analyse par DRX de la fraction (-4+2mm)	33
Fig.15 : Analyse par DRX de la fraction (-2+1mm).....	34
Fig.16: Analyse par DRX de la fraction (-0.5+0.125mm).....	34
Fig.17: Analyse par DRX de la fraction (-0.125+0.063mm).....	35
Fig.18 : Spectre de FTIR du fer de Sidi Maarouf.....	36
Fig.19 : Variation des rendements en fonction de l'intensité du champ magnétique.....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : la constitution minéralogique et chimique des affleurements.....	13
Tableau 2 : les propriétés physique de fer.....	14
Tableau 3 : Types des minéraux de fer et leurs caractéristiques.....	15
Tableau 4 : Production minière mondiale de minerai de fer par pays en 2019.....	18
Tableau 5: Distribution granulométrique de minerai de fer étudié.....	31
Tableau 6: Principaux éléments détectés après l'analyse DRX.....	35
Tableau 7: Résultats d'analyse chimique du minerai de fer de Sidi Maarouf par FX Echantillon brut.....	36
Tableau 8 : Résultats d'analyse chimique du minerai de fer de Sidi Maarouf par FX Fraction	36
Tableau 9 : Identification des pics de la FTIR.....	37
Tableau 10 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=6A)	38
Tableau 11 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=8A)	38
Tableau 12 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=10A)	38
Tableau 13 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=12A)	39
Tableau 14 : Résultats FX de la granulométrie 1 mm de la fraction magnétique	40
Tableau 15 : Résultats FX de la granulométrie 0.5mm de la fraction magnétique	41
Tableau 16 : Résultats FX de la granulométrie 0.125mm de la fraction magnétique	41

DRX : Diffractométrie a Rayon x.

FTIR : Infrarouge a Transformé de Fourier.

FX : Fluorescence a Rayon x.

SMBI : Séparation Magnétique a Basse Intensité.

SMHI : Séparation Magnétique a Haut Intensité.

SMHG : Séparation Magnétique a Haut Gradient.

FM : Fraction Magnétique.

FNM : Fraction Non Magnétique.

Introduction générale

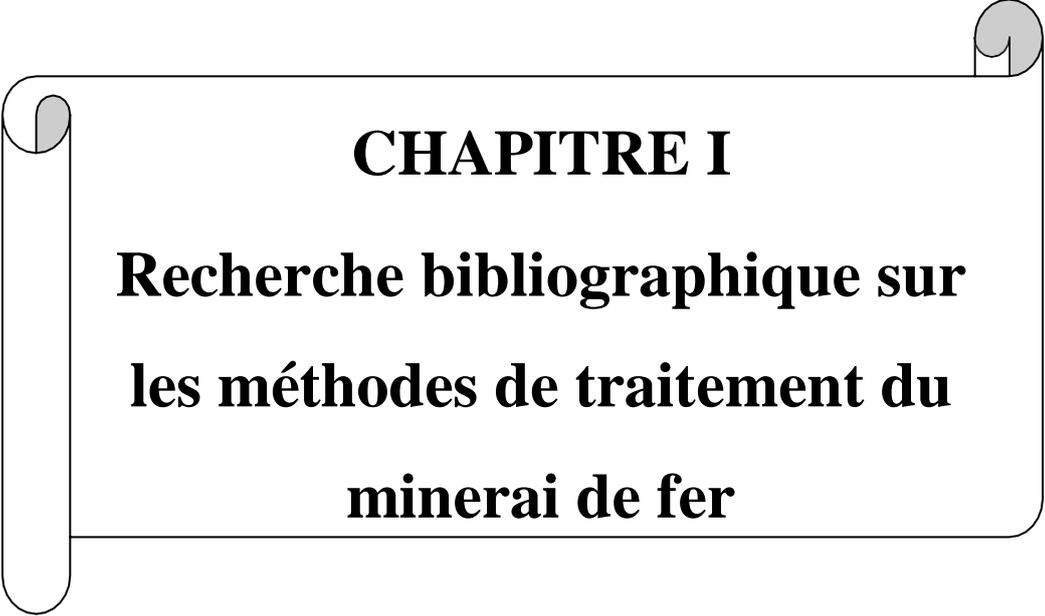
Le fer est l'un des éléments les plus abondants sur terre, car il se caractérise par de nombreuses propriétés qui lui permettent d'être utilisé dans de nombreux domaines, ce qui a conduit à une augmentation de la demande dans le monde, tout en déterminant la qualité.

L'Algérie est un pays riche en divers substances utiles dont la majorité n'est pas encore mise en valeur, le sol Algérien contient des réserves importantes en différents métaux et minéraux, elle vient d'enregistrer un saut particulier dans son parcours économique en particulier le secteur minier qui vient de connaître un nouveau souffle de reprise à de nouvelles ambitions de développement, après avoir vécu une longue période d'extinction [1].

La forte demande de l'acier sur le marché national et international a entraîné un accroissement de la production du minerai de fer en vue de répondre aux besoins des complexes sidérurgiques du pays, en matière de production et de qualité.

La consommation de fer en tant que matière première ne cesse d'augmenter, vu l'importance de ce minerai dans l'industrie nationale et mondiale qui exigent une croissance de production de cette matière en qualité et quantité. L'utilisation d'acier s'est développée pratiquement dans tous les domaines notamment l'industrie de l'automobile et de la construction qui représentent environ 70 % de son utilisation.

- ✓ Le premier chapitre expose les différentes conditions géologiques et minières de la région.
- ✓ Le deuxième chapitre de cette étude est consacré à l'analyse de la littérature scientifique sur les minerais de fer.
- ✓ Le troisième chapitre concerne le volet important de la caractérisation physico-chimique des échantillons prélevés à partir de la mine de fer de Sidi Maarouf.
- ✓ La quatrième partie de cette étude comporte une analyse bibliographique sur les procédés d'enrichissement des minerais de fer.
- ✓ La dernière partie de ce travail de recherche englobe les différents essais réalisés et les résultats obtenus.



CHAPITRE I

Recherche bibliographique sur les méthodes de traitement du minerai de fer

I.1.Introduction

La valorisation des minerais de fer englobe toutes les méthodes utilisées pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques, ou métallurgiques et assurer un minerai de fer qui répond aux exigences techniques pour l'élaboration de différents types d'acier ce qui le rend essentiel pour toutes les industries.

L'acier est un composant indispensable au développement industriel d'économie. Il a de nombreux usages possibles, il est principalement utilisé dans l'industrie de la construction automobile, aéronautique, navale ou dans le bâtiment, ainsi que dans les cimenteries, et d'autre domaine.

Les opérations d'extraction composent généralement des travaux préparatoires, notamment la découverte ou le percement des galeries, du forage, de l'abattage aux explosifs et du transport avant traitement [2].

Lorsque l'utilisation du minerai de fer n'est pas possible en raison de sa faible teneur en métal, les minerais de fer sont principalement traités par des technologies de concassage, broyage, criblage, classification, séparation gravitaire, séparation magnétique et flottation [3].

I.2. Évaluation de la technologie d'enrichissement du minerai de fer

Dans la plupart des cas, le minerai de fer ne se trouve pas pur dans la nature, la qualité du minerai doit être améliorée par l'élimination de quelques impuretés (Ahmed et al, 2012; Burt, 1999), l'enrichissement des minerais recouvre toutes les opérations simples ou complexes que peut subir un minerai de fer pour devenir un produit commercialisable et utilisable dans diverses industries [4], [5].

Lorsque l'utilisation du minerai de fer n'est pas possible en raison de sa faible teneur en métal, plusieurs méthodes de séparation ont été développées pour l'enrichissement de ce minerai peuvent être utilisées seules ou en combinaison.

I.3. Techniques de traitement du minerai

Devant l'augmentation de la demande de minerai de fer et la croissance régulière de la production d'acier dans le monde, les pays producteurs de minerai de fer ont augmenté leur production en lançant des mesures pour utiliser les qualités inférieures de minerais de fer. Tout d'abord, la faible teneur en oxyde de fer et les niveaux relativement élevés d'impureté de phosphore et de silice rendent l'utilisation de minerai n'est pas possible.

Le minerai tout-venant extrait de la mine, subit plusieurs processus de préparation mécanique (concassage, broyage, etc.) et de concentration (enrichissement) pour produire un concentré

de valeur économique. Donc l'enrichissement de minerai afin d'améliorer la teneur en oxyde de fer et de réduire au maximum la gangue [6].

Techniquement, plusieurs procédés minéralurgiques permettant de séparer le minerai de valeur de la gangue existent. Ces procédés utilisent les propriétés physiques et chimiques des minéraux. Nous citons les procédés les plus couramment employés telles que la séparation magnétique, la séparation gravimétrique, la flottation et la lixiviation [3].

I.4. Séparation physique

La minéralurgie consiste à séparer les différents minéraux contenus dans un minerai pour collecter sa partie valorisable. Pour ce faire, le minerai subit différents procédés de traitement impliquant des techniques physiques. Il sera ensuite prêt à être traité par voie métallurgique (traitements thermiques et chimiques) afin d'obtenir métaux et alliages.

I.4.1. Méthode de séparation magnétique

La séparation magnétique est une technique qui permet de séparer de divers types de matériaux selon leur comportement vis-à-vis d'un champ magnétique. C'est une technique largement utilisée pour séparer des éléments magnétiques, tel que le fer. Le principe de base est l'interaction entre les différentes forces dans un champ magnétique telles que les forces magnétique, gravitationnelle, hydrodynamique et interarticulaires.

Le choix de la séparation magnétique dépend plusieurs facteurs, tels que la composition minéralogique, la maille de libération, la susceptibilité magnétique, et la production du séparateur, le marketing et respect de l'environnement. Il existe deux catégories de séparation magnétique : la séparation à haute intensité et à basse intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux modes, soit en voie sèche ou en voie humide [7], [8].

La séparation magnétique sèche est beaucoup plus utilisée pour la purification tandis que la séparation humide donne un produit magnétique sous forme humide et fin (boues).

I.4.1.1. Propriétés magnétiques

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

a. Diamagnétisme

Les substances sont repoussées le long des lignes de force magnétique à un point où l'intensité du champ est plus petite. Les forces impliquées ici sont très petites et les substances diamagnétiques ne peuvent pas être concentrées magnétiquement.

b. Paramagnétiques

Les substances sont attirées le long des lignes de force magnétique aux points d'une plus grande intensité de champ. Les matériaux paramagnétiques peuvent être concentrés dans des séparateurs magnétiques à haute intensité.

c. Ferromagnétisme

Considéré comme un cas particulier de paramagnétisme, impliquant des forces très élevées. Les matériaux ferromagnétiques ont une très forte sensibilité aux forces magnétiques conservant ainsi un certain magnétisme lorsqu'ils sont retirés du champ (rémanence). Ils peuvent être aussi concentrés dans des séparateurs magnétiques de faible intensité. Le principal minéral ferromagnétique séparé est la magnétite (Fe_3O_4).

I.4.1.2. Types de séparateur magnétique

Les séparateurs magnétiques peuvent être classés en machines à faible et à haute intensité, qui peut encore être classés dans les séparateurs à sec et humide. Les séparateurs de faible intensité sont utilisés pour traiter les matériaux ferromagnétiques et certains minéraux hautement paramagnétiques [9].

I.4.1.3. Séparateur magnétique à basse intensité (SMBI)

Les séparateurs magnétiques à basse intensité fonctionnent normalement à champ ouvert, c'est-à-dire que les lignes de forces magnétiques se referment dans un milieu magnétique peu perméable, air ou eau. Ce sont en général des séparateurs à construction simple, peu onéreux et de dépense énergétique faible. Ils s'utilisent principalement pour les matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques.

I.4.1.4. Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI)

Ces séparateurs à circuits conventionnels sont à champ magnétique fermé et développent des champs magnétiques allant de 400 kA/m à 1 600 kA/m pour une consommation énergétique comprise entre 0,5 et 2,5 kWh par tonne traitée. Les débits solides varient quant à eux suivant le mode de séparation et l'opération de traitement (concentration, épuration) entre 6 et 180 t/h

[10].

Les séparateurs magnétiques à haute intensité peuvent fonctionner en voie sèche et en voie humide ils sont utilisés pour la purification ou la concentration de matériaux non magnétiques, faiblement ou fortement magnétiques.

Des séparateurs magnétiques à tambours à électroaimant sont utilisés pour le traitement en voie sèche. L'électroaimant rotatif crée un champ magnétique intense (16000-18000 Gauss) dans l'entrefer [11].

I.4.1.5. Séparation magnétique à haut gradient et/ou haut champ (SMHG)

C'est une séparation qui utilise des bobines en cuivre ou supraconductrices pour le traitement de particules ultrafines ($<5 \mu\text{m}$), ainsi les matériaux qui ont des propriétés magnétiques très faibles. Le champ magnétique élevé utilisé ou la forte excitation magnétique est produit par l'utilisation des bobines supraconductrices en alliage supraconducteur qui permet de générer une densité élevée de force magnétique.

I.4.1.6. Séparation magnétique des minerais de fer

Dans le domaine minier, la séparation magnétique est utilisée pour traiter les teneurs faibles et dispersées dans les gisements exploités, et cela, pour garantir la pureté et la richesse des concentrés exigées par les industriels utilisateurs [12].

Le meilleur résultat, pour la séparation magnétique, a été obtenu avec une intensité de $7,5 \times 10^{-3} \text{ T}$, et une taille de particules moyenne de $75 \mu\text{m}$. Dans ces conditions optimales, la séparation magnétique a enlevé 71 % des impuretés de fer présent dans le résidu. Le concentré magnétique récupéré contient 79% de concentration en oxyde de fer[8].

(Dwari et al, 2013) ont réalisés un essai de séparation pour l'enrichissement des fines particules de minerai fer de l'hématite dans un séparateur magnétique à tambour. Ils ont conclu que la teneur en fer dans le concentré a atteint 60% Fe avec un rendement de 22% avec une teneur dans le minerai initial égale à 42%.

La séparation magnétique à haute intensité par voie sèche a permis d'obtenir un concentré de bonne qualité. Le meilleur résultat est celui de la fraction (-0.125 +0,063 mm) avec une intensité du champ magnétique égale à 2.4 Tesla et la teneur en fer est améliorée de 30,85% à 54,09% avec un degré d'extraction et un rendement respectivement de 89,30% et de 62,82% [13].

(Chaabia et al, 2016). Ont montré qu'une quantité importante d'impuretés sont éliminées au concentré pendant l'étape de séparation magnétique à haute intensité en voie humide avec

l'entrées de courant électrique de 8 Ampère. On remarque que la teneur de Fe_2O_3 dépasse 65%, bien qu'on veuille amoindrir l'impureté de SiO_2 à 2,46 et Al_2O_3 à 1,73 %.

D'après (Badjoudj, 2011) Le minerai de fer de Sidi Maarouf testé sur diverses fractions granulométriques et différentes intensités de courant électrique.

► Pour la tranche granulométrique (- 2 + 1 mm) on utilise les intensités de courants $I = 2, 3$ et 5A. La teneur maximale en fer est de 56,88% a donné par 5 Ampères avec un taux de récupération faible de 81,36%. Donc on peut dire que les résultats n'ont pas été satisfaisants, cela prouve que la maille de libération du fer n'est pas atteinte.

► Pour la tranche granulométrique (- 1 + 0,5 mm) on différencie les intensités comme ceci $I = 2, 3$ et 5 Ampères. On a la teneur maximale en fer est augmentée a 57,10% et le taux de récupération significatif mais reste faible 89,17% ($I = 5A$). Donc on peut dire que les résultats n'ont pas été satisfaisants.

► Pour la tranche granulométrique (- 0,5 + 0,25 mm), on gardant les mêmes intensités $I = 2, 3$ et 5 Ampères. La teneur maximale en fer est augmentée à 57,84% et le taux de récupération est très significatif 95,43% ($I = 5A$). Donc on peut dire que les résultats sont très satisfaisants.

I.4.2. Méthode de séparation gravimétrique

I.4.2.1. Principe de la séparation gravimétrique

La séparation gravimétrique est un mode de concentration dans un fluide d'un matériau mettant en œuvre la différence qui existe entre les masses volumiques des minéraux d'une part et des gangues d'autre part. La concentration gravimétrique s'effectue dans un champ de forces de masse, en général celui de la pesanteur, combiné (l'action d'autres forces telles que la résistance offerte par le fluide (en général de l'eau pour la gravimétrie en voie humide) au mouvement des grains à séparer ou les forces de frottement entre ces particules et la surface de support [14].

Les clés d'une séparation gravimétrique efficace sont à rechercher dans la connaissance parfaite des paramètres minéralogiques du minerai à traiter (masse volumique des divers constituants, répartition granulométrique des espèces minérales,...). La taille des particules peut affecter de manière significative sur l'efficacité des séparations par gravité [15].

La séparation par gravité utilise les différences de masse volumiques des particules à séparer.

En effet, il est possible d'estimer l'applicabilité d'une telle approche à l'aide de la formule suivante : [16]

$$C_T = \frac{(\rho_L - \rho_f)}{(\rho_l - \rho_f)} \quad (1)$$

Où

CT: Critère de Taggart.

ρ_L : représente la masse volumique de la phase solide lourde.

ρ_l : la masse volumique de la phase solide légère et.

ρ_f : la masse volumique du fluide.

Les équipements de concentration gravimétrique sont divisés en quatre groupes selon les mécanismes de séparation impliqués:

a. Milieu dense

Cette méthode met seulement en jeu la force de gravité des particules. On utilise pour cela un milieu organique en laboratoire ou une suspension aqueuse et dense d'un matériau fin à l'échelle industrielle.

b. Pulsation stratification (accélération différentielle)

Elle est basée sur les sédimentations différentielles entre les particules lourds et légers provoqué par le mouvement périodique. On utilise pour cela des bacs à piston.

c. Nappe pelliculaire fluente

Il s'agit d'une nappe d'eau de faible épaisseur (quelques mm à quelques cm) s'écoulant sur un plan incliné. Les particules, suivant leur vitesse de chute et leur résistance au mouvement, se séparent en plusieurs catégories densimétriques. On utilise pour cela des spirales.

L'action de secousses horizontales combinée à l'action de la nappe pelliculaire fluente contribue aussi à obtenir la stratification désirée. On utilise pour cela les tables à secousses.

I.4.2.2. Séparation gravimétrique du minerai de fer

(Seif-Elnassr et al) ont réalisé des essais par séparation gravimétrique utiliser la table à secousses .Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque l'angle d'inclinaison de la table était de 5°. À ces valeurs de paramètres, le concentré était de 44,9 % Fe et le taux de récupération était de 86,7 %.

I.4.3. Méthode de séparation électrostatique

I.4.3.1. Principes de la séparation électrostatique

La séparation électrostatique tire profit de la différence de conductivité électrique existe entre les matériaux afin d'accomplir leur séparation. Cette technique s'applique à un nombre relativement restreint de minéraux tels que le rutile, l'ilménite, le zircon, l'étain, les

phosphates et certains sels. Elle peut aussi s'appliquer à la séparation de particules métalliques dans le sable. Il existe deux types de séparateurs électrostatiques: les séparateurs électrostatiques et les séparateurs électrodynamiques (aussi appelés séparateurs à haute tension). Seuls les séparateurs électrodynamiques sont abordés dans ce document car il s'agit des équipements les plus utilisés actuellement. Cependant, le principe de séparation est sensiblement le même pour les deux équipements [17].

I.5. Séparation physico-chimique du minerai de fer

I.5.1. Définition de la flottation

C'est une technique de séparation des solides basée sur la différence existante entre leurs propriétés superficielles dans une solution aqueuse en présence d'air. Cette technique permet de différencier les minerais hydrophiles et hydrophobes.

I.5.2. Principe de la flottation

Le principe de la flottation des minerais est le suivant : les particules solides sont mises en suspension par agitation dans l'eau après qu'un broyage humide, plus ou moins poussé ait libéré de la gangue de l'espèce minérale valorisable.

Ce mélange solide-eau (ou pulpe) est conditionné avec un réactif chimique appelé collecteur, dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface du minerai à flotter. La pulpe ainsi conditionnée est introduite dans des réacteurs munis d'agitateurs aérés (cellule de flottation), d'injecteurs d'air (colonne de flottation) ou d'électrodes (électro filtration) générant des bulles d'air et les dispersants.

Les particules rendues hydrophobes se fixent à la surface des bulles qui constituent un vecteur de transport grâce à leur mouvement ascensionnel vers la surface libre de la pulpe. On obtient ainsi une mousse surnageant chargée en solides appelées écumes.

La taille des bulles et la durée de vie de la mousse sont modulées par l'addition d'un moussant[18].

I.5.3. Réactifs de flottation

Les réactifs de flottation sont les différents composés chimiques qui sont employés dans le procédé de cette Techniques pour que l'opération se déroule dans de bonnes conditions. Employés de manière sélective en fonction du type de minerai, la flottation fait appel à 5 types de réactifs : le collecteur, L'activant, le déprimant et les régulateurs de pH agissent à la surface des minéraux, alors que le moussant agit sur l'hydrodynamique du système pulpe-

écume.

I.5.3.1. Les collecteurs

Ce sont des "substances tensioactives", c'est-à-dire des composés organiques qui s'adsorbent à la surface des minéraux, les rendant hydrophobes et leur permettant d'adhérer aux bulles. Ils se divisent en composés ionisants et en composés non ionisants.

I.5.3.2. les activants

Les activants sont des réactifs qui facilitent la fixation du collecteur sur la surface des particules solides, on peut distinguer comme activant des sulfures, les agents conditionneurs (chaux, carbonates de soude, silicate de soude) et les cations métalliques en solution.

I.5.3.3. les déprimants

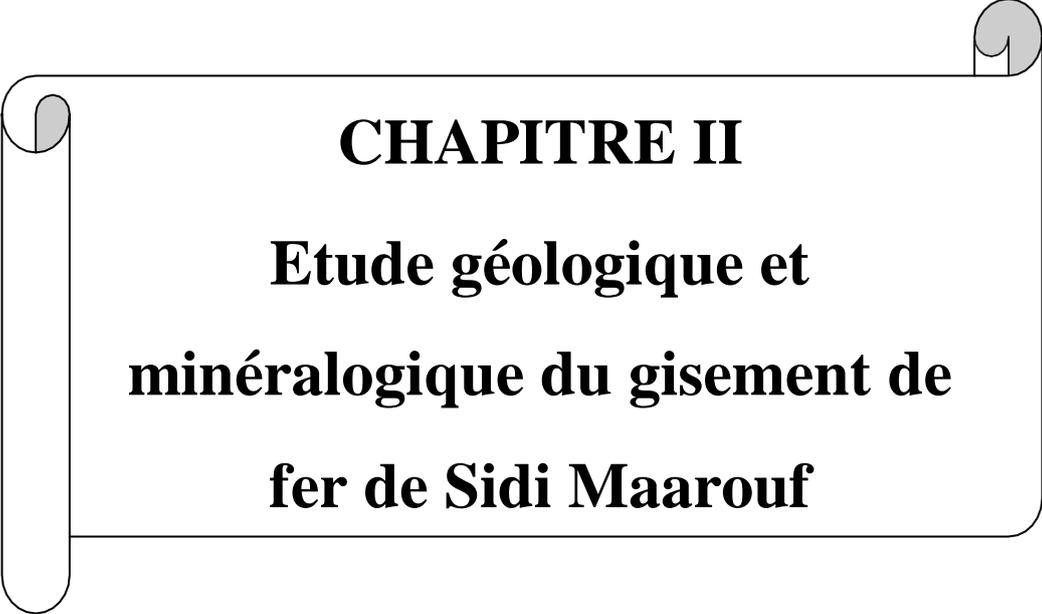
Les déprimants sont des réactifs qu'on peut ajouter à la pulpe pour déprimer de façon sélective une espèce minérale afin de l'empêcher de flotter. Les déprimants sélectifs des sulfures sont des sels organiques [19].

I.5.3.4. les moussants

Ce sont des réactifs qui permettent de maintenir la stabilité de la mousse, par exemple les acides, les amines et les alcools.

I.5.3.5. les régulateurs ou les modificateurs de PH

Ce sont des réactifs qui régulent l'opération de flottation. Les différentes classes sont les activateurs, les dépresseurs ou les modificateurs de pH. Les activateurs permettent l'adsorption des collecteurs sur les minéraux en modifiant le caractère chimique des surfaces minérales. Ces substances sont généralement des sels solubles. Les dépresseurs (silicate de soude, amidon, quebracho etc.), au contraire, rendent les minéraux hydrophiles et les empêchent de flotter. Les modificateurs de pH (tels que la chaux, la soude et la soude caustique pour l'alcalinité, et principalement l'acide sulfurique pour l'acidification) contrôlent le pH de la pulpe, qui influe de manière importante sur la plupart des étapes du traitement (adsorption des collecteurs et des dépresseurs, etc.).



CHAPITRE II

**Etude géologique et
minéralogique du gisement de
fer de Sidi Maarouf**

II.1. ETUDE DU GISEMENT DE FER DE SIDI-MAAROUF

II.1.1. Situation géographique de gisement

Le secteur Sidi Maarouf comprend les structures Sidi Maarouf, Tissimiran et McidAicha et se situe dans le NE de l'Algérie, plus exactement au Nord de Constantine dans les territoires des communes de Sidi Maarouf. IL est traversé par la route nationale 27(RN27) reliant Constantine -El Milia – Jijel à 85 km de Constantine, 15 km d'El Milia et à 75 km de Jijel.

II.1.2. Historique du gisement

En 1923, Berthier rédigea une coupe géologique, évalue les réserves à 650 000 tonnes et présente deux analyses chimiques avec la teneur en fer de 53,66 - 53,83 % et des éléments nuisibles en proportions négligeables.

En 1968, l'industriel EXPORT-ROUMANIA a effectué une étude technico-économique pour plusieurs gisements de fer Algériens. Pour Sidi Maarouf on avait considéré à 1.500.000 tonnes les réserves probables.

C'est à dire, d'après les évaluations préexistences et la dernière classification des gisements de fer, les accumulations de Sidi Maarouf ne représentent même pas un gisement de taille minimale. Par le rapport de recherche ferromagnétique et radiométrique sont mises en évidence, d'importantes anomalies magnétiques en bordure méridionale du massif ancien de la petite Kabylie signifiant soit des massifs éruptifs cachés soit même des accumulations de minerai de fer[20].

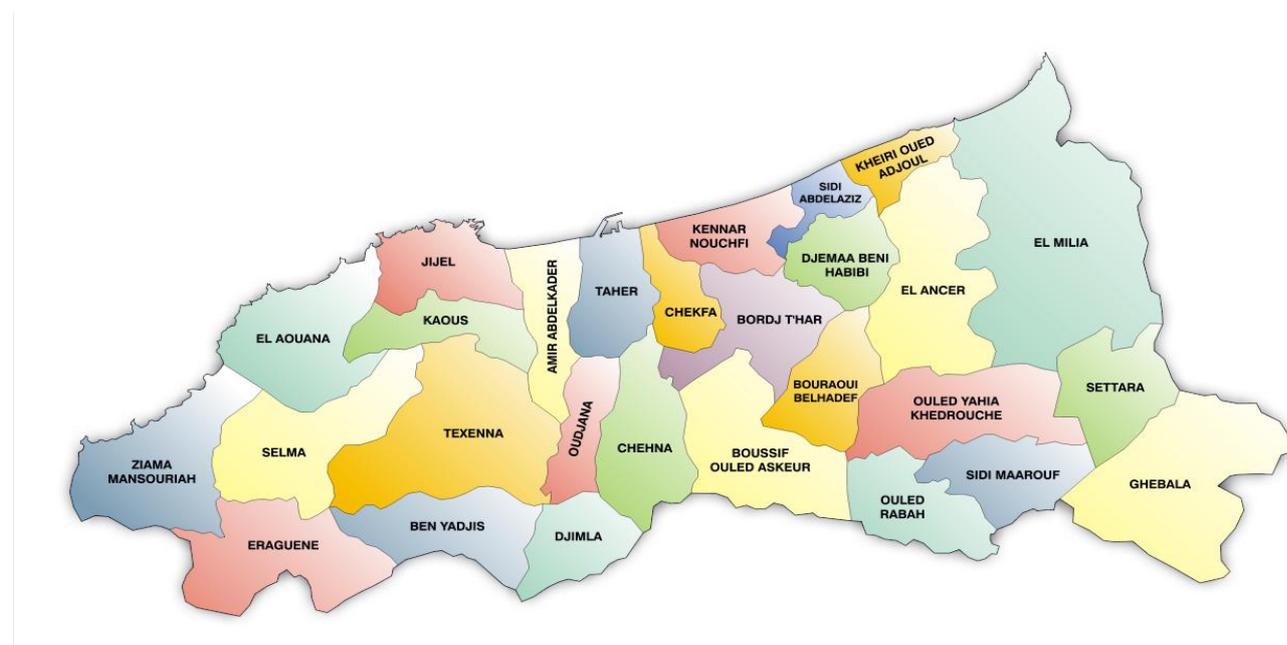


Figure 1. Carte géographique de Jijel

II.2. GEOLOGIE DE LA REGION

Stratigraphie

Pour aborder les problèmes concrets de la genèse et des perspectives des gisements il faut utiliser l'histoire géologique d'une région plus large sur la base d'une étude monographique comme celle de « Michel Durant Delga » [21], [22].

Cette étude commence avec l'observation que les zones paléogéographiques et structurales essentielles d'Algérie sont allongées parallèlement à la côte méditerranéenne. Dans la région de Constantine on rencontre du Nord au Sud la zone de Kabylie représentée par le massif paléozoïque métamorphique de la petite Kabylie, charrié vers le Sud sur :

La zone sous Kabylie où affleurent surtout des sédiments mésozoïques violemment disloqués où se trouvent les structures favorables pour l'accumulation des minerais de fer Sidi Maarouf, Tissimiran, M'cid Aïcha. La zone tellienne, séparée de la précédente par un alignement d'accidents plus ou moins continus. Le cristallophyllien Combro-Ordovicien constitué par des roches d'un métamorphisme, généralement de faible profondeur est recouvert par le Gotlandien moins développé non métamorphique remaniant le cristallophyllien sur lequel il repose en discordance. Il a produit également un front de migmatites d'intense transformation qui démontrent un réchauffage supérieur à 100°, avec une implication probable sur la formation et la migration des fluides. La mise en place du massif granitique Post-Burdigalien d'El Milia et ensuite le cortège des corps et des phénomènes associés, parmi lesquels la minéralisation avec des sulfures et peut être la minéralisation en oxydes et carbonates de fer. Dans la phase orogénique alpine tardive, les rigides formations Jurassiques tectoniquement compétents par rapport avec les formations du Trias et du Crétacé ont percé la couverture Crétacé comme:

- Écaille (Tissimiran)
- Klype (Sidi Maarouf)
- Horst (M'cid Aïcha).

Si la minéralisation était antérieure à ces mouvements, les accumulations monteraient vers la surface. Cette tectonique, d'après les caractères minéralogiques du minerai a déterminé de profondes transformations et même des mobilisations [20].

Si la minéralisation était postérieure à ces mouvements la formation des accumulations aurait été facilitée par la multiplication des voies d'accès et des surfaces actives pour les réactions chimiques.

A la fin du Pliocène quaternaire un fort enlèvement est manifesté. Comme effet quelques

parties des gisements sont arrivées à affleurer et une forte oxydation jusqu'à une profondeur importante sur la liaison magmatique de minerai de fer dans les structures Sidi Maarouf, Tissimiran, M'cid Aicha.

Dans la région seulement les moyens indirects peuvent établir quelques liaisons. Les apophyses du massif granitique d'El Milia s'étendent vers le Sud près de la structure Tissimiran mais de dimensions de plus en plus réduites, ce qui démontre l'approfondissement du massif au Sud vers la structure minéralisée.

Cependant d'après les anomalies ferromagnétiques, le massif d'El Milia n'est pas seul, il arrive à la surface, mais il en existe d'autres massifs granitiques qui demeurent toujours à une profondeur plus ou moins importante [1], [23].

II.3. GEOLOGIE DU GISEMENT

II.3.1. Stratigraphie

Dans la région de recherche se présente des formations des cycles structogéniques du calédonien jusqu'à l'Alpin.

Toutes ces formations ont peut-être des différentes implications sur la genèse de minéralisation de fer. Le cristallophyllien est constitué de:

- micaschistes (série inférieure) avec les intercalations de Hess vertes d'âge infracambrienne attribué par : M, D, Delga, mais qui n'affleurent pas dans notre région.
- Gneiss fins avec de grosses masses cipolins dans leur partie moyenne ou supérieures et parfois avec une barre de gneiss ocellés à leur base, d'âge géorgien Acadien.
- Gneiss ocellés attribués au cambrien supérieur ordovicien inférieur.
- Micaschiste (série supérieure) avec porphyroïdes inter stratifiés vers le haut surtout, d'âge ordovicien et niveau lenticulaires de calcaires dolomitiques ou de cipolins.

En relation avec notre but, il y a deux éléments que nous considérons dignes d'être mentionnés : (les calcaires cipoliniques, les roches granitoïdes, les migmatites et les processus tardifs) Les calcaires cipoliniques.

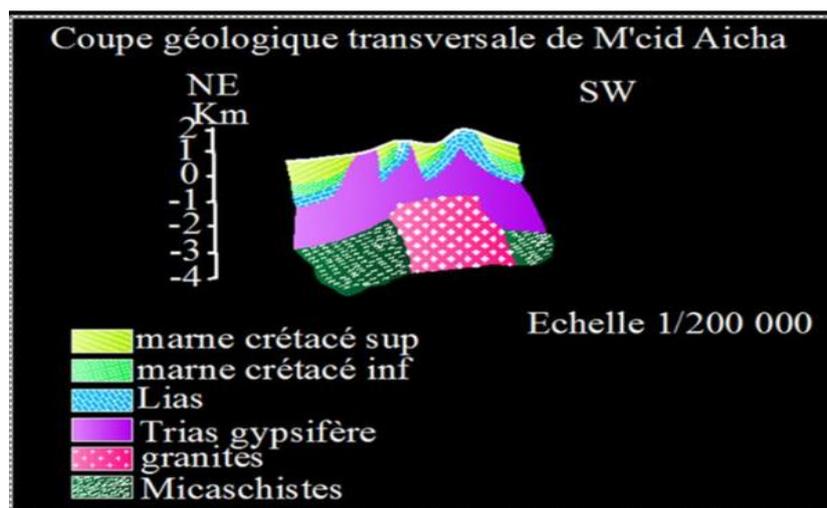


Figure 2. Coupe géologique transversale de M'cid Aicha

II.3.2. Pétrographie

II.3.2.1. Minéralisation

Premièrement on présentera la situation des affleurements puis celle des structures des localisations des amas de minerai.

II.3.2.2. Affleurement

Dans le secteur sidi Maarouf et extension à peu-près partout ou affleurent les formations de lias inférieurs-moyen, il y a des affleurements de minerai sur la première place se trouve la structure sidi Maarouf avec les plus puissantes et les plus nombreux affleurements de minerai de fer puis la structure Tissimiran avec 18 affleurements de minéralisation en fer ou des zones d'hydrothermalisme et la structure Mcidaicha avec 7 minéralisations de fer et 8 plus importantes pour les structures mais les minéralisations en fer représentent plutôt de concentration super gènes de la goethite dans les chapeaux de fer des minéralisation plus profondes[20].

Toutefois il faut mentionner quelques affleurements de minerai de fer sur les petits massifs du lias inférieur moyen situés entre sidi Maarouf et Tissimiran toujours près de la bordure du cristallin et en contact direct avec le trias diapirique le long de la faille profonde de chevauchement du massif cristallin sur les formations mésozoïques.

L'accumulation de minerai se trouve à quelques dizaines de mètres de profondeur ou même

plus.

A Tissimiran tous les affleurements font partie de cette catégorie une autre catégorie d'affleurements est le minerai de fer proprement dit qui a une teneur élevée en fer, toujours avec des nids filonnets de barytine et de calcite parfois contournés par des calcaires béchiques fortement limonitisés et aussi par d'importants vides karstique particulièrement dans la partie supérieure des affleurements.

Dans ces affleurements la barytine atteint de grandes teneurs. Pour les apophyses filoniennes la surface moyenne d'affleurement est de 75 m² et pour les apophyses –colonnes est de 82 m² coupole d'amas de minerai qui éjecte vers le haut des apophyses de minerai et qui sont contournés par des importants vide karstique dans lesquels il y a des stalactites, des stalagmites et des idéaux, la calcite en croute etc.[24].

Synthétiquement la fréquence et la puissance des affleurements par types morphologiques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Constitution minéralogique et chimique des affleurements [22].

Caractère Morphologique	Nombre d'affleurements	Surface totale m ²	Surface moyenne m ²
Coupole d'amas	8	16530	2066
Apophyse colonne	38	3229	≈ 82
Apophyse filonienne	27	2036	≈ 75
Filon	7	226	≈ 32
Nids	60	113	≈ 2
Zone d'hydro thermalisation	16		
Total		22,134	

II.4. Définition de minerai de fer

Les minerais de fer sont des roches et des minéraux à partir des quels, le fer métallique est extrait. Le fer se trouve dans divers montants dans des gisements où il se produit principalement comme des oxydes, Fe₂O₃ (hématite) et Fe₃O₄ (magnétite), de sulfure FeS₂, et de carbonate FeCO₃, ainsi que des silicates et nombreux autres minéraux de moindre importance.

Le fer est l'élément de transition le plus abondant, On ne le trouve pas sous l'état métallique

à la surface terrestre. C'est un métal ductile, maniable, et magnétique le plus important pour son utilisation industrielle, surtout sous forme d'alliage, d'aciers et de fontes.

Le fer est un élément chimique de symbole Fe, de masse atomique 55.845, de numéro atomique 26) [25].

II.5. Propriétés du minerai de fer

Dans les conditions normales de pression et de température, le fer est un solide cristallin de structure cubique centré (fer α ou ferrite).

II.5.1. Propriétés chimiques

Laissé à l'air libre en présence d'humidité, le fer se corrode en formant de la rouille Fe_2O_3 .

La rouille étant un matériau poreux, la réaction d'oxydation peut se propager jusqu'au cœur du métal, contrairement, par exemple, à l'aluminium, qui forme une couche fine d'oxyde imperméable. En solution, il présente deux valences principales :

- Fe^{2+} (le fer ferreux) qui présente une faible couleur verte.
- Fe^{3+} (le fer ferrique) qui possède une couleur rouille caractéristique. Le fer ferrique (Fe^{3+}) peut être réduit par du cuivre métallique, par exemple, réaction à l'origine du procédé de gravure des circuits imprimés par le trichlorure de fer, $FeCl_3$ [26].

II.5.2. Propriétés physiques

Les différentes propriétés physiques du minerai de fer :

Tableau 2 : Les propriétés physiques de fer[27].

Système cristallin	Cubique centré
Température de fusion	1 534,9 °C, 1808 K
Température d'ébullition	2 749,9 °C, 3023 K
Volume molaire	$7,09 \times 10^{-6}$ m ³ /mol
Pression de vapeur	7,05 Pa
Vitesse du son	4910 m/s à 20 °C
Énergie de fusion	13,8 kJ/mol
Énergie de vaporisation	349,6 kJ/mol
Dureté	(4-5)
Densité	(5-6) g /Cm ³

II.6. Types de minerai de fer

Il existe à travers le monde un nombre important de roches contenant du minerai fer. Elles sont en général réparties en plusieurs catégories: les minerais oxydés, les carbonates, les minerais sulfurés et les silicates.

Tableau 3 : Types des minéraux de fer et leurs caractéristiques [28].

Minerai	Répartition chimique	Couleur	Caractéristiques
Minerais oxydés			
Magnétite Fe_3O_4	72,36% fer 27,64 % oxygène	Gris foncé à noir	C'est une roche très magnétique. Elle a pris de plus en plus d'importance avec le développement des techniques de concentration magnétique et l'utilisation accrue de produits de haute qualité.
Hématite Fe_2O_3	69,94% fer 30,06% oxygène	Gris acier à rouge vif	L'hématite est l'un des principaux minerais de fer. Cette roche possède une dureté qui peut aller de 5,5 à 6,5 selon la famille à laquelle elle appartient. C'est la forme de roche la plus répandue à la surface de la terre et c'est également celle qui est le plus souvent employée dans l'industrie.

<p>Limonite (ou Hématite brune) FeO(OH). nH₂O</p>	<p>62,85% fer 27,01% oxygène 10,14% eau</p>	<p>Jaune, marron, parfois noir</p>	<p>Les limonites sont également une source importante de minerais à travers le monde. Elles sont à la fois oxyde et hydroxyde de fer. La goëthite qui est une sorte de limonite se rencontre souvent en association avec de l'hématite.</p>
<p>Ilménite FeTiO₃</p>	<p>36,80% fer 31,57% titane 31,63% oxygène</p>	<p>Noir</p>	<p>On la rencontre parfois en association avec de petites quantités de magnétite. Elle est généralement exploitée pour le titane qu'elle contient. Le minerai de fer peut être alors extrait en tant que sous-produit au cours du traitement de la roche. Contrairement à l'hématite ou à la magnétite, cette roche n'est pas magnétique.</p>
<p>Les carbonates</p>			
<p>Sidérite FeCO₃</p>	<p>48,20% fer 37,99% CO₂ 13,81% oxygène</p>	<p>Blanc à gris vert, elle peut virer au brun, en présence d'humidité</p>	<p>Les sidérites contiennent en général une proportion assez variable de calcium, magnésium ou manganèse.</p>

Les silicates			
<p>Chamosite, Stilpnomélane, Greenalite, Minnesotaite, Grunerite.</p>	<p>La formulation chimique est difficile car nous sommes en présence d'un groupe très complexe d'aluminosilicates alcalins de magnésium, aluminium, manganèse, baryum et fer. Les minerais de ce type, bien que d'une importance assez limitée en tant que tels pour la production de minerai de fer, présentent un certain intérêt en tant que source de minerais oxydés.</p>		
Les sulfurés			
<p>Pyrite FeS₂</p>	<p>46,55% fer 53,45% soufre</p>	<p>Jaune cuivré</p>	<p>Cette roche est souvent connue sous le nom d'or des fous du fait de sa grande ressemblance avec l'or. Elle est la roche contenant du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer qu'elle contient mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est le sous-produit le plus communément extrait.</p>
<p>pyrrhotite FeS₂</p>	<p>60,4% fer 39,6% soufre</p>	<p>Bronze</p>	
<p>marcassite FeS₂</p>	<p>46,55% fer 53,45% soufre</p>	<p>Jaune cuivré</p>	<p>Très proche de la pyrite, de même composition chimique mais de forme cristalline différente.</p>

II.7. Production de minerai de fer

II.7.1. Production mondiale de minerai de fer

Les Principaux pays producteurs de minerai de fer dans le monde sont résumés dans le (Tableau 4) ci-dessous :

Tableau 4: Production minière mondiale de minerai de fer, par pays, en 2019 [29].

Classement	Pays	Millions de tonnes	Total (%)
1	Australie	930	36,50
2	Brésil	480	18,90
3	Chine	350	13,70
4	Inde	210	8,20
5	Russie	99	3,90
6	Afrique du sud	77	3,00
7	Ukraine	62	2,40
8	Canada	58	2,30
9	États-Unis	48	1,90
-	Autres pays	232	9,10
Total		2546	100

II.7.2. 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.

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 gréso-marneuses du Crétacé, et actuellement en phase d'étude afin de relancer son exploitation.

La filiale SOMIFER-spa, du groupe Ferphos à travers ses mines de Khanguet (Tébessa), Sidi Maarouf (Jijel), Djebel Anini (Sétif) ce dernier a des réserves géologiques de 6,75 millions de tonnes avec 55 % Fe [30].

La Minéralisation hématitique encaissée dans les calcaires du lias sous forme de filons et de

poches. Le gisement de Rouina (Ain Defla) assure une production du minerai de fer représenté par de l'hématite destinée essentiellement pour la fabrication du ciment.

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

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

Mecheri-Abdelaziz : réserves géologiques sont de 1 350 millions de tonnes avec 52% Fe, une minéralisation ferrifère oolithique localisée sous forme de lentilles dans les grès du Dévonien Supérieur.

II.8. Le cours du minerai de fer sur le marché

D'après les données de l'Index Mundileprix annuel moyen du minerai de fer était de 145,90 \$ US en 2010. La figure 1 ci-dessous représente un graphique linéaire des prix mensuels moyens par tonne de minerai de fer en dollars américains de 2010 à 2019. On constate que le prix monte entre 2009 et 2011 pour atteindre 187,18 \$ US. Puis il baisse avant de connaître une lancée de courte durée au début de 2013, puis continue sa baisse jusqu'à la fin de 2015 alors qu'il atteint 40,88 \$ US. Le prix du minerai de fer a par la suite remonté en 2016 et 2017 pour atteindre 89,44 \$ US en février 2017 avant de descendre à 72,25 \$ US à la fin de l'année. Au début de l'année 2019, le prix est 76,16 \$ US et monte à 120,24 \$ US en juillet et descend graduellement à 84,98 \$ US en novembre. Le prix atteint 92,65 \$ US en décembre 2019.

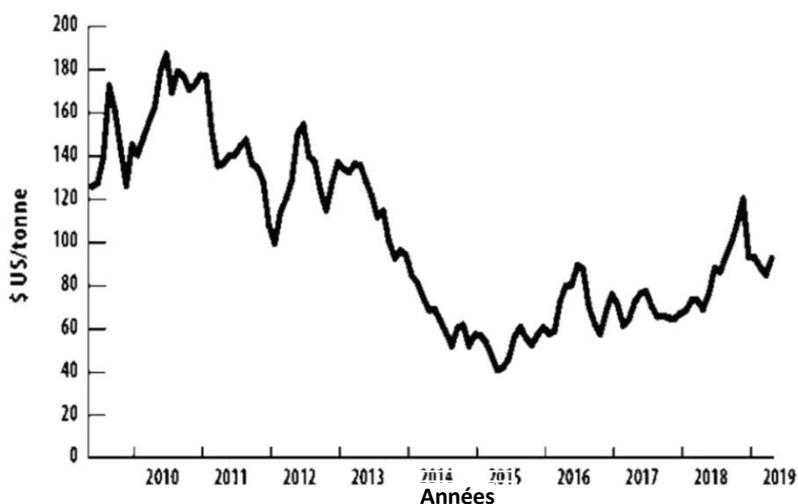


Figure 3. Prix mensuels moyens par tonne de minerai de fer de 2010 à 2019 en USD [31].

II.9. Utilisation du minerai de fer

Le fer n'est pas utilisé à l'état naturel mais utilisé sous forme d'alliage de fer qui s'appelle acier. L'acier est un alliage de fer et de carbone obtenu par affinage de la fonte, c'est-à-dire par diminution, jusqu'au niveau désiré de la teneur en carbone du mélange. L'acier présente souvent des éléments sous forme:

Impuretés appelées scories (l'oxygène, phosphore ou du soufre).

Nouveaux produits comme le silicium, le manganèse, le chrome, le nickel, le cobalt, le molybdène, le vanadium, l'aluminium ou le cuivre par exemple.

L'ajout de ces éléments est destiné à améliorer les caractéristiques physiques et/ou mécaniques de l'alliage [32].

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. Il supporte la déformation par compression ou par extension à chaud ou à froid. Il prend également très bien la trempe, c'est à dire qu'il est susceptible d'acquérir une très grande dureté par chauffage à une température élevée (au-delà du point de transformation - austénisation) et refroidissement rapide, par immersion dans un liquide, eau ou huile ou même simplement à l'air. L'utilisation du fer s'étale sur plusieurs domaines qui sont :

II.9.1. Dans la construction

L'acier a commencé à être plus généralement employé notamment dans la réalisation d'ouvrages architecturaux. Il est aujourd'hui le métal le plus utilisé dans ce secteur où il sert notamment à la réalisation d'ouvrages d'arts tels que des ponts par exemple. Même s'il n'en constitue pas le matériau de base, l'acier est presque toujours présent puisqu'il sert à armer le béton, permettant ainsi de renforcer les fondations et de le rendre plus résistant aux années. Il permet également de former le squelette de certains bâtiments. La construction est le premier secteur d'utilisation de l'acier [33].

II.9.2. Dans l'automobile

Le secteur de l'automobile est le deuxième marché pour l'acier. Les pièces en acier représentent de 55% à 70% du poids d'un véhicule. Au sein de cette industrie, l'acier va servir à fabriquer des châssis, des pièces de carrosserie ou de moteur. Sous forme de fils, il peut entrer dans la réalisation de carcasse de pneu. Si l'acier est employé sous sa forme brute, il devra être traité contre la corrosion (application d'une couche de zinc et d'une couche de

peinture, pour les carrosseries notamment).

II.9.3. Industrie alimentaire (emballages, ustensiles de cuisine...)

L'acier est un métal avec lequel chacun est quotidiennement en contact. Sous la forme de fer blanc, on s'en servira pour produire des emballages domestiques tels que des boîtes de conserve, des canettes de boisson, des conditionnements pour laque à cheveux ou pour déodorant, ainsi que des ustensiles de cuisine comme des plats, des casseroles ou des couverts. Ils sont aujourd'hui plus fréquemment fabriqués en inox (alliage de nickel et de chrome) qui ne nécessite aucune protection particulière puisqu'inaltérable dans la masse.

L'inox ne se détériore pas au contact de l'eau, ni des détergents. Il est parfaitement sain et n'altère ni le goût ni la couleur des aliments.

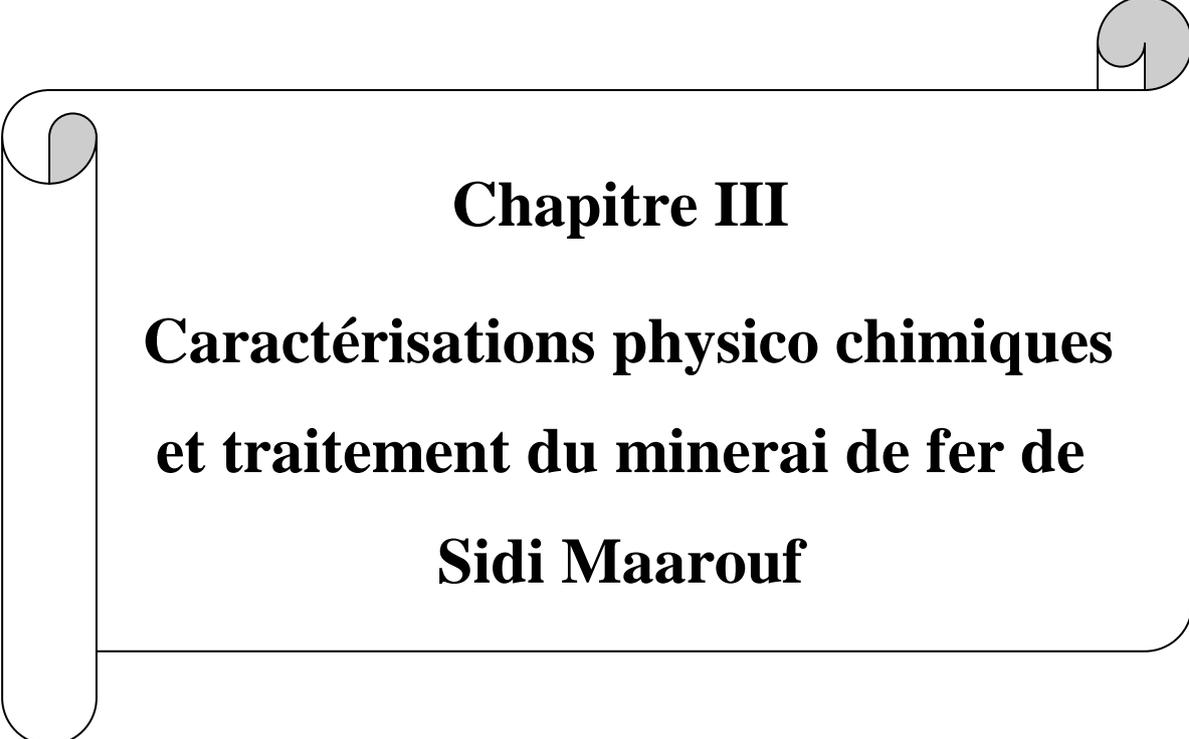
II.9.4. En pharmacie

Le fer est utilisé pour la préparation de médicaments. Du XVII^e siècle au début du XX^e siècle, il était l'un des principaux composants des boules d'acier vulnérables, boules de Nancy, boules de Molsheim, boules minérales des Chartreux, qu'on faisait tremper dans de l'eau pour la charger en substances réputées bénéfiques.

II.9.5. Autres secteurs d'utilisations

Peu de domaines échappent à la polyvalence de l'acier et de ses alliages. Le secteur de l'informatique et de la téléphonie sans cesse en évolution servent de tremplin à ce métal qui entre notamment dans la fabrication de composants électroniques. Dans le domaine de l'aérospatiale, l'acier est utilisé dans la réalisation de pièces très pointues pour les satellites.

Le secteur de l'énergie utilise également les alliages à base de fer que ce soit en ce qui concerne le forage (plateformes de forage), le transport du pétrole ou du gaz naturel, la construction de centrales nucléaires ou les câbles électriques pour le transport de l'énergie vers l'utilisateur final. L'industrie chimique quant à elle cumule les défis avec des milieux hautement corrosifs, un travail à très haute température et des contraintes mécaniques élevées [31].

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shading on the top and bottom edges, framing the text.

Chapitre III

**Caractérisations physico chimiques
et traitement du minerai de fer de
Sidi Maarouf**

III.1.Introduction

Ce chapitre décrit l'ensemble des techniques pour caractériser les différents échantillons prélevés du minerai de fer de Sidi Maarouf /Jijel, 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.

III.2. Prélèvement des échantillons

C'est l'opération de prélèvement d'une fraction ou d'une matrice pour but de l'analyse physique et chimique ou minéralogique. Les techniques d'échantillonnage sont variées en fonction de la forme géométrique (surface) et la nature de l'échantillon, il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage.

Le but de l'échantillonnage est d'obtenir un éventail d'échantillons représentatifs qui reflète toutes les caractéristiques physiques et chimiques de l'ensemble du gisement.

Pour cela on a prélevé quelques échantillons de la mine de sidi Maarouf qui est sous forme de roches. Les échantillons prélevés sont en quantité suffisante pour les différentes analyses de caractérisation et des essais de séparations à réaliser au laboratoire. Les échantillons prélevés sont mis dans des sacs en plastiques numérotés.



Figure 4. Echantillon représentatif du minerai de fer.

III.2.1. Préparation mécanique de l'échantillon

III.2.1.1. Concassage

Le concassage est un traitement mécanique qui sert à réduire le diamètre des grains des matières premières à un diamètre inférieur.

A l'aide d'un concasseur à mâchoire de laboratoire de marque Fritsch Pulverisette, l'opération a été faite au niveau du laboratoire, la matière première initiale (échantillon) est sous forme de roche, ensuite concassés à une dimension inférieure à 1mm.



Figure 5. Concasseur à mâchoire de laboratoire.

III.2.1.2. Broyage

Le broyage est une opération qui a pour but de diviser un solide, pour augmenter sa surface spécifique (surface développée de la poudre par unité de masse). On a broyé notre échantillon jusqu'à une granulométrie suffisante pour l'obtention d'une poudre suffisamment fine.

Le broyage de l'échantillon est effectué par un broyeur à planétaire de marque Fritsch au laboratoire de préparation mécanique, jusqu'à une granulométrie de $63\mu\text{m}$ pour préparer une quantité de 100 g de chaque classe granulométrique, à utiliser dans les analyses chimiques et DRX.

III.2.1.3. Homogénéisation et Quartage

Le quartage est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon. C'est une Opération qui a pour but de réduire un échantillon de minerai, et au cours de laquelle un lot de matériau est mis en cône, puis étalé pour être partagé en quartiers approximativement égaux dont un seul sera retenu.

Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation qui est un procédé mécanique qui consiste à mélanger l'échantillon, dont on utilise le diviseur à rifle au niveau du laboratoire.



Figure 6. Opération de quartage.

III.2.1.4. Analyse granulométrique par tamisage

Le tamisage consiste à répartir les grains d'un échantillon brut par rapport à leur dimension à travers une série de tamis normalisée avec des ouvertures décroissantes, ces ouvertures appelées " mailles " sont de forme carrées faites en toiles métalliques.

Un échantillon représentative de 1693g versé dans une série de tamis d'ouvertures (4 mm, 2 mm, 1mm, 500 μ m, 125 μ m, 63 μ m), montés dans une tamiseuse électrique.



Figure 7. Tamiseuse électrique de laboratoire.

III.3. Caractérisations et Analyses minéralogiques

L'étude minéralogique a pour but de déterminer les différentes espèces minérales constituant le minerai. Cette étude permet donc l'orientation de la recherche et la technique d'enrichissement.

III.3.1. Analyses diffractométrique à rayons X

C'est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X par la matière, et qui permet de préciser la nature des éléments des phases minérales et leurs quantifications.

III.3.1.1. Principe

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde ($0,1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon orienté ou non.

On utilise un rayonnement électromagnétique en cuivre dont la longueur d'onde est $\text{CuK}\alpha = 1,542 \text{ \AA}$. Ce rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté.

Chapitre III

Si l'on calcule les directions dans lesquelles on a du signal, on s'aperçoit que l'on obtient une loi très simple : si l'on trace des plans imaginaires parallèles passant par les atomes, et si l'on appelle d la distance entre ces plans (ou distance interréticulaire), alors les interférences sont constructives si :

$$2d \sin(\theta) = n \lambda$$

Où θ est la moitié de la déviation, n est un nombre entier appelé «ordre de diffraction», et λ est la longueur d'onde des rayons X. C'est la loi de Bragg (figure 7).

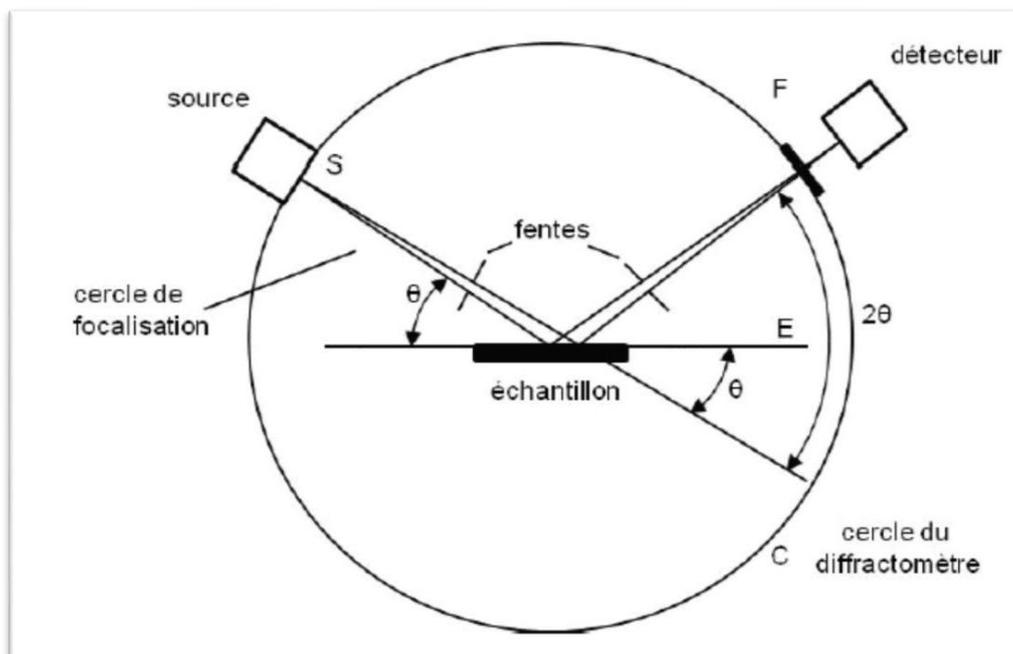


Figure 8. Principe du diffractomètre dans la géométrie de Bragg-Brentano [34].

► Les éléments du numéro atomique inférieur à celui du carbone ne peuvent pas être analysés par DRX.

III.3.2. Analyse Infrarouge à transformé de Fourier (FTIR)

Appelé la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier ou FTIR (Fourier Transformed Infra Red Spectroscopy), elle est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par un matériau, et permet de déterminer la présence de groupements fonctionnels dans les molécules organiques. Le principe de cette méthode consiste à mesurer la quantité de lumière absorbée par un matériau en fonction de la longueur d'onde lors d'une interaction entre la radiation électromagnétique et la matière[35].

Un spectromètre IR à transformée de Fourier (IRTF) est composé des éléments suivants :

► Une source

Chapitre III

- ▶ Un interféromètre de Michelson
- ▶ L'échantillon
- ▶ Un détecteur

III.3.2.1. Principe

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier, permet d'effectuer une analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau par la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques du matériau en question.

Pour préparer l'échantillon, on a mélangé (0.002g) de notre minerai de fer brute avec (0.08g) de KBr préalablement séchée a (80 °C) pour former avec ce mélange une pastille de 10 mm de diamètre qu'on fait passé par une presse hydraulique afin de se débarrasser des bulles d'airs présentes dans la pastille. L'appareil utilisé est un spectrophotomètre de type SCHIMADZU 8400.

III.3.2.2. Appareillage

- Spectrophotométrie infrarouge a transformé de Fourier.
- Presse hydraulique.
- Cellule démontable.
- Balance électronique.
- Mortier et pilons enagate.

III.3.2.3. Réactifs

- 0,08g de KBr.
- 0,002g de minerai de fer de Sidi Maarouf.

III.3.2.4. Mode opératoire

On met 0,08 g de bromure de potassium (KBr), dans un mortier en agate, on ajoute 0,002g de minerai de fer de Sidi Maarouf, on mélange bien les deux produits, on va le mettre dans la presse sous une pression, après avoir terminé on a obtenu une pastille c'est cette pastille obtenue qu'on met dans l'appareil IR pour être analysé.

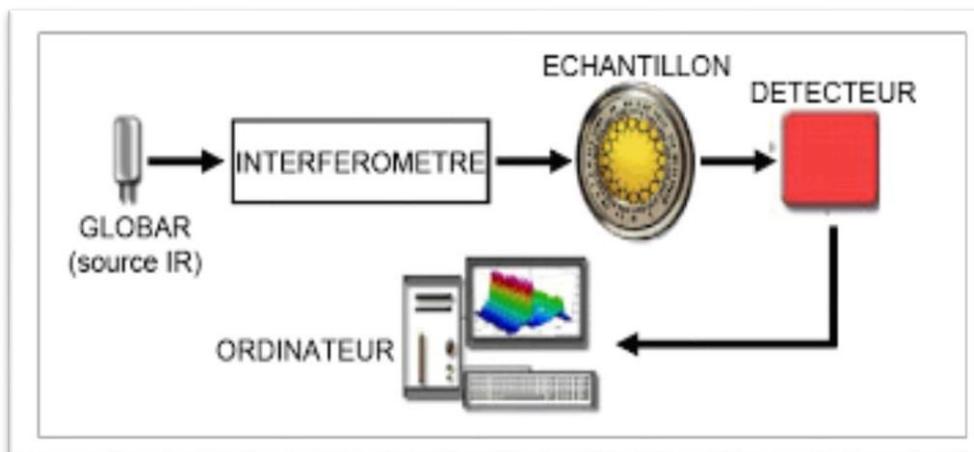


Figure 9. Schéma de principe d'un spectromètre FTIR.

III.4. Analyse par fluorescence à rayon X

La spectrométrie de fluorescence atomique, appelée encore spectrométrie de fluorescence à rayon X, est une technique d'analyse qualitative et quantitative très répandue. Elle permet d'identifier et de doser tous les éléments à partir du carbone, parfois à l'état de trace, dans des échantillons très divers : liquides, alliages, poudres, céramiques. Elle repose sur l'émission d'un rayonnement caractéristique par les atomes après ionisation.

III.4.1. Principe de fonctionnement

Quand un matériau est soumis à un rayonnement de faible longueur d'onde et donc de forte énergie, comme les rayons X, les rayons gamma ou bien un faisceau d'électrons ou d'ions suffisamment accélérés, les atomes constituant le matériau peuvent subir une ionisation, c'est-à-dire qu'un ou plusieurs électrons peuvent être éjectés des couches électroniques (on parle aussi d'orbitales atomiques) de chacun de ces atomes.

Le rayonnement fluorescent peut donc être analysé de façon équivalente en énergie par le logiciel d'analyse, à partir des concentrations en éléments et des formules chimiques on parle d'analyse dispersive en énergie ou en longueur d'onde [36].

Les analyses chimiques ont été réalisées à l'unité de recherche scientifique en analyse physico-chimiques appartenant à l'université FERHAT ABBAS, Sétif.

L'Équipement utilisé est un spectromètre de fluorescence à rayons X « ZSX Primus II de Rigaku » utilisé pour analysés les échantillons de minerai de fer de Sidi Maarouf sous forme de poudre.

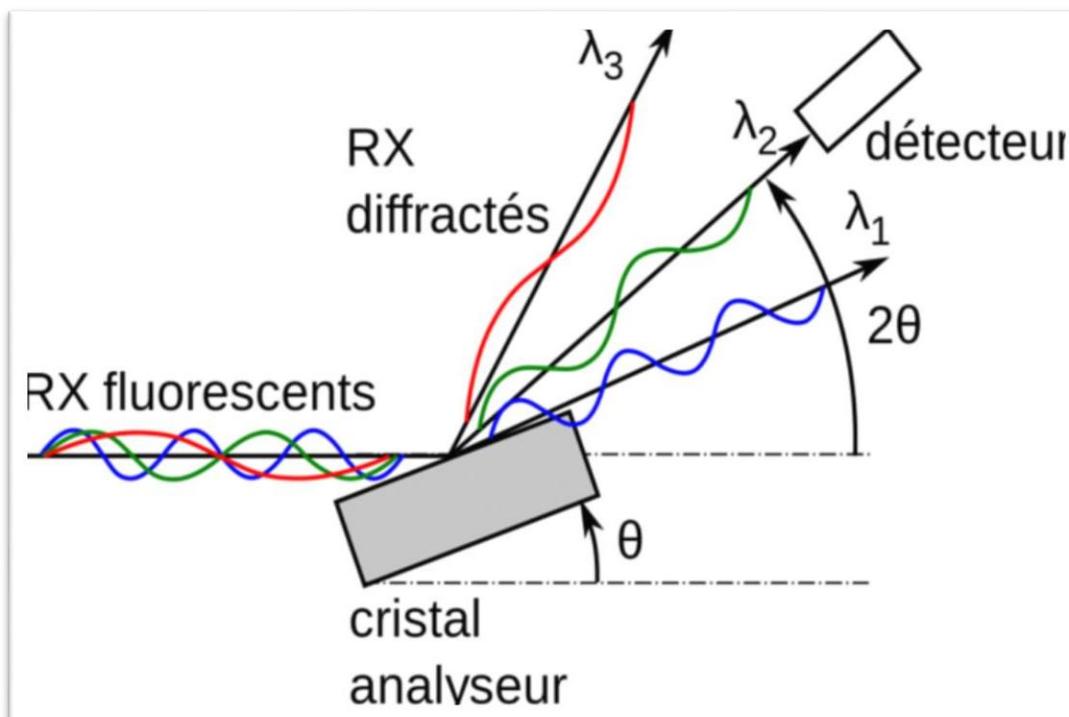


Figure 10. Principe de base de l'analyse par FX

III.5. Essai d'enrichissement du minerai de fer de Sidi Maarouf

L'enrichissement du minerai de fer a pour objet d'améliorer la qualité du point de vue teneur en Fe_2O_3 et éliminer le plus possible les impuretés comme le quartz et phosphore qui influent sur la qualité de l'acier.

III.5.1. Essais de séparation de fer de Sidi Maarouf par séparation magnétique (S.M.H.I)

La séparation est effectuée pour la réduction de certaines impuretés (quartz et en phosphore) et améliorer la teneur de minerai de valeur. Les propriétés magnétiques de ce minerai peuvent être utilisées pour appliquer la méthode de séparation magnétique.

La séparation magnétique exploite les propriétés magnétiques des matériaux afin d'effectuer leur séparation. La susceptibilité magnétique est la propriété d'un matériau qui détermine son comportement dans un champ magnétique.

La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique.

Des essais d'enrichissement par séparation magnétique à haute intensité ont été réalisés sur trois échantillons de 50 g chacun et d'une granulométrie de (-2+1mm), (-1+0,5mm) et (-

Chapitre III

0,5+0,125mm). Les échantillons testés sont soumis à une variation de l'intensité du courant électrique de 6, 8, 10 et 12 Ampère. Les essais sont réalisés en se basant sur la variation de l'intensité du courant électrique, et cela nous a permis de savoir quelle est l'intensité électrique la plus adéquate pour la réalisation d'une bonne séparation.

L'essai s'effectue par un séparateur à tambour canulé, sous un champ magnétique intense créé par les électro-aimants (figure 18), dont lequel un courant électrique avec une alimentation vibrant au laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement (LAVAMINE), département des Mines, université Badji Mokhetar, Annaba.



Figure 11. Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI)

III.6. Résultats et discussion

III.6.1. Analyse granulométrique par tamisage

Les résultats obtenus par l'analyse granulométrique par tamisage sont mentionnés dans le tableau suivant, et interprétés sous forme de courbe granulométrique dans la (figure 10) d'après :

Tableau 5 .Distribution granulométrique du minerai de fer étudié.

Overtures des tamis (mm)	Masse (g)	Rendements pondérales (%)	Rendements cumulatifs (%)	
			Refus (%)	Tamisât (%)
>4	541,7	31,994	31,994	68,006
-4+2	549,3	32,443	64,437	35,563
-2+1	237,7	14,039	78,476	21,524
-1+0,5	133,3	7,873	86,349	13,651
-0,5+0,125	108,4	6,402	92,751	7,249
-0,125+0,063	52,3	3,089	95,84	4,16
<0,063	70,4	4,158	99,998	0,002
Totale	1693,1			

Dans la figure ci-dessous on a représenté les rendements sous forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, et les rendements en ordonnée.

L'analyse granulométrique par tamisage a montré que le rendement obtenu le plus important est remarqué à la tranche granulométrique (>4 mm) et (-4+2 mm), le plus bas rendement obtenu dans la tranche granulométrique (-0,125+0,063mm), donc on distingue que la répartition des grains de minerai de fer Sidi Maarouf n'est pas homogène.

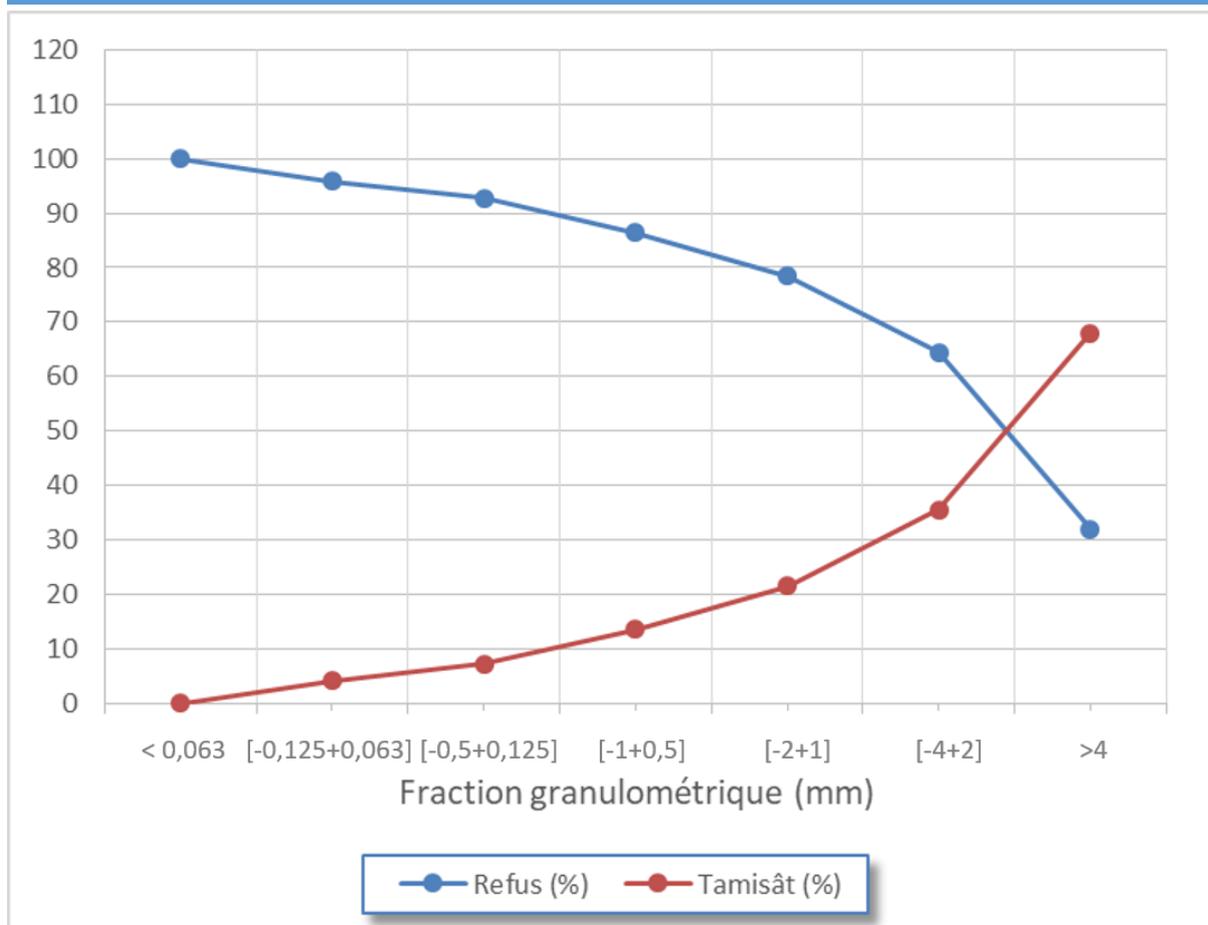


Figure 12. Courbe de la distribution granulométrique du minerai de fer de Sidi Maarouf.

III.6.2. Analyses diffractométrique à rayons X (DRX)

Le minerai de fer de Sidi Maarouf présente une texture massive, compacte et il est formé d'un nombre de constituants minéralogiques limités. Les minéraux constituants nos échantillons sont essentiellement de l'hématite associée principalement à une gangue. On retrouve également mais a proportions moindre d'autres minéraux tel que : les hydroxydes de fer tel que la goethite.

Les figures qui suivent montrent les résultats de la diffractométrie à rayons X, pour les différentes granulométries de l'échantillon de fer de Sidi Maarouf.

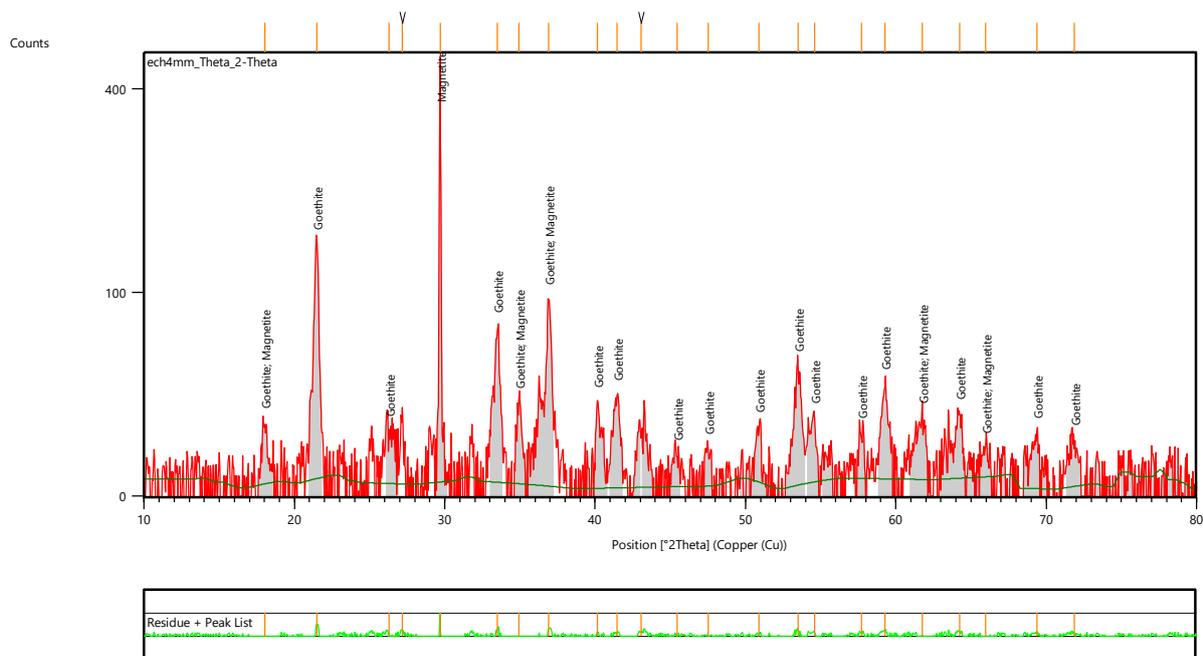


Figure 13. Analyse par DRX de la fraction (4 mm).

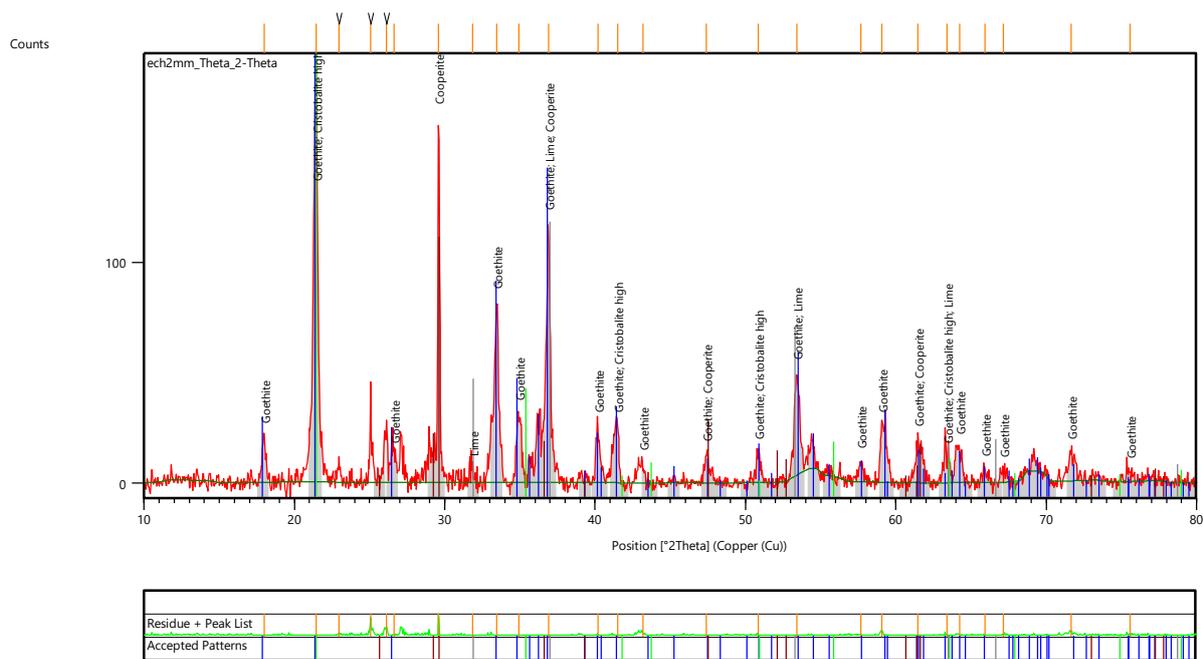


Figure 14. Analyse par DRX de la fraction (2 mm).

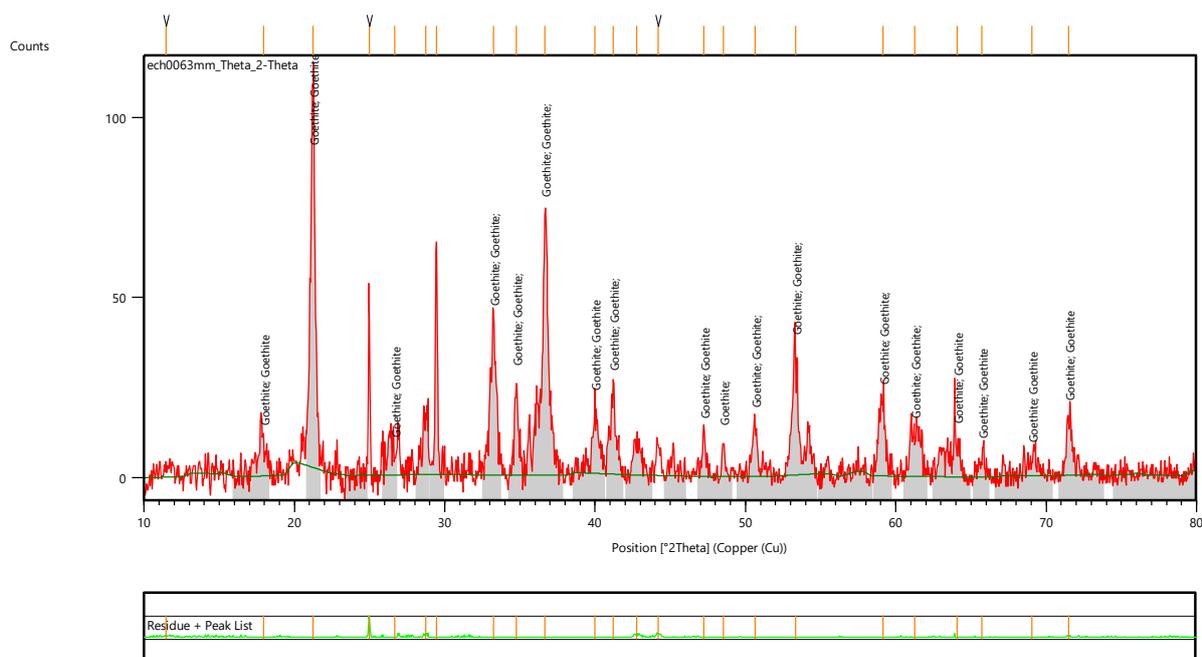


Figure 17. Analyse par DRX de la fraction (0.063 mm).

La caractérisation minéralogique des autres échantillons a montré une grande convergence dans l'ensemble des phases détectées pour différentes granulométries. Les principales phases identifiées sont présentés dans le (Tableau 6) suivant :

Tableau 6 : principaux éléments détectés après l'analyse DRX.

La fraction (mm)	Nom de la phase
4	Magnetite, Goethite
2	Goethite, cristbalite, cooperate, lime
1	Goethite, hematite, syn, lime
0.125	Goethite
0.063	Goethite

III.6.3. Analyse par fluorescence à rayon X (FX)

Cette analyse a été effectuée sur le minerai de fer de Sidi Maarouf. Les résultats obtenus sont présentés sur les tableaux suivants :

L'analyse chimique des échantillons a montré que le bilan matière du minerai de fer dans l'échantillon initial à une teneur de 54,98% de Fe_2O_3 . Ainsi, on remarque la présence excessive en pourcentage de quartz et phosphore respectivement 4,03 % et 0,11%.

Tableau 7 : Résultats d'analyse chimique du minerai de fer de Sidi Maarouf par FX
Echantillon brut

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	PAF
Teneur (%)	04,03	2,70	54,98	04,39	0,51	0,36	0,77	0,1	0,11	6,4	4,29

Tableau 8.Résultats d'analyse chimique du minerai de fer de Sidi Maarouf par FX.

Fraction (mm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	PAF
-2+1	04,43	2,56	54,85	05,64	0,46	0,39	0,92	0,18	0,17	08,11	3,14
-1+0,5	5,22	3,98	55,24	06,71	0,62	0,40	0,93	0,19	0,15	7,71	3,27
-0,5+0,125	6,07	3,72	59,43	06,49	0,83	0,31	0,82	0,22	0,18	6,7	4,06

III.6.4. Analyse Infrarouge a transformé de Fourier (FTIR)

D'après le spectre de la FTIR du minerai de fer de Sidi Maarouf obtenus, et représenté dans la (figure 17) une identification des pics a été faite à partir d'une table de correspondance en spectroscopie infrarouge [37].



Figure 18.Spectre de la FTIR du fer de Sidi Maarouf.

Le pic 611 correspond à des Chloroalcanes, de la famille des halogénoalcanes. Les pics 792 et 885 correspondent à des Composé aromatique, Benzène méta-disub plus précisément, qui

Chapitre III

un composé de la famille des hydrocarbures. Le pic 1380 correspond à un Alkyle (Méthyle).

Le pic 1450 correspond au composé C=C aromatique, les pics 1560, 1570 et 1732 correspondent à Acide carboxylique/dérivés, le premier est de type Carboxylates (sels), le deuxième est de type Zwitterions d'acide aminé, et le troisième de type Esters et lactones.

Le pic 1650 correspond au composé C-C conjugué de type diène. Tandis que le pic 1685 correspond au composé Aldéhyde/cétone, de type α , β instauré.

Le (Tableau 9) ci-dessous représente une identification des pics faite à partir d'une table de correspondance en spectroscopie infrarouge. Il montre le type de liaison de chaque pic ainsi que le type spécifique de liaison et même leurs apparences.

Tableau 9: Identification des pics de la FTIR.

Absorption (cm ⁻¹)	Liaison	Type de liaison	Type spécifique de liaison	Apparence
611	C-X	Chloroalcanes	/	Faible à moyenne
792	C-H	Composé aromatique	Benzène méta-disub	Forte
885	C-H	Composé aromatique	Benzène méta-disub	Forte
1380	C-H	Alkyle	Méthyle	Faible
1450	C-C	C=C aromatique	/	Faible à forte (typiquement 3 ou 4)
1560	C=O	Acide carboxylique/dérivés	Carboxylates (sels)	/
1570	C=O	Acide carboxylique/dérivés	Zwitter ions d'acide aminé	/
1650	C-C	C-C conjugué	Diènes	Forte
1685	C=O	Aldéhyde/cétone	α , β instauré	/
1732	C=O	Acide carboxylique/dérivés	Esters et lactones	Influencé par conjugaison (avec les cétones) et la taille du cycle.

III.7. Séparation magnétique

Le minerai de fer de Sidi Maarouf a été testé sur différentes intensités du courant de différentes tranches granulométriques, représenté dans les tableaux.

Tableau 10 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=6A).

Intensité (A) fraction (mm)	I=6 A		
	FM (g)	Rendement %	FNM (g)
-2+1	66,78	92,17	5,60
-1+0,5	40,52	97,96	0,79
-0,5+0,125	34,55	99,08	0,29

Tableau 11 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=8A).

Intensité (A) fraction (mm)	I=8 A		
	FM (g)	Rendement %	FNM (g)
-2+1	66,45	91,71	5,9
-1+0,5	40,73	98,47	0,60
-0,5+0,125	32,18	92,28	2,65

Tableau 12 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=10A).

Intensité (A) fraction (mm)	I=10 A		
	FM (g)	Rendement %	FNM (g)
-2+1	69,72	96,23	2,68
-1+0,5	40,12	97,00	1,19
-0,5+0,125	34,67	99,42	0,1

Tableau 13 : Les résultats de séparation magnétique à haute intensité (I=12A).

Intensité (A) fraction (mm)	I=12 A		
	FM (g)	Rendement %	FNM (g)
-2+1	70,44g	97,22	1,98
-1+0,5	39,70g	95,98	1,62
-0,5+0,125	34,80g	99,79	0,05

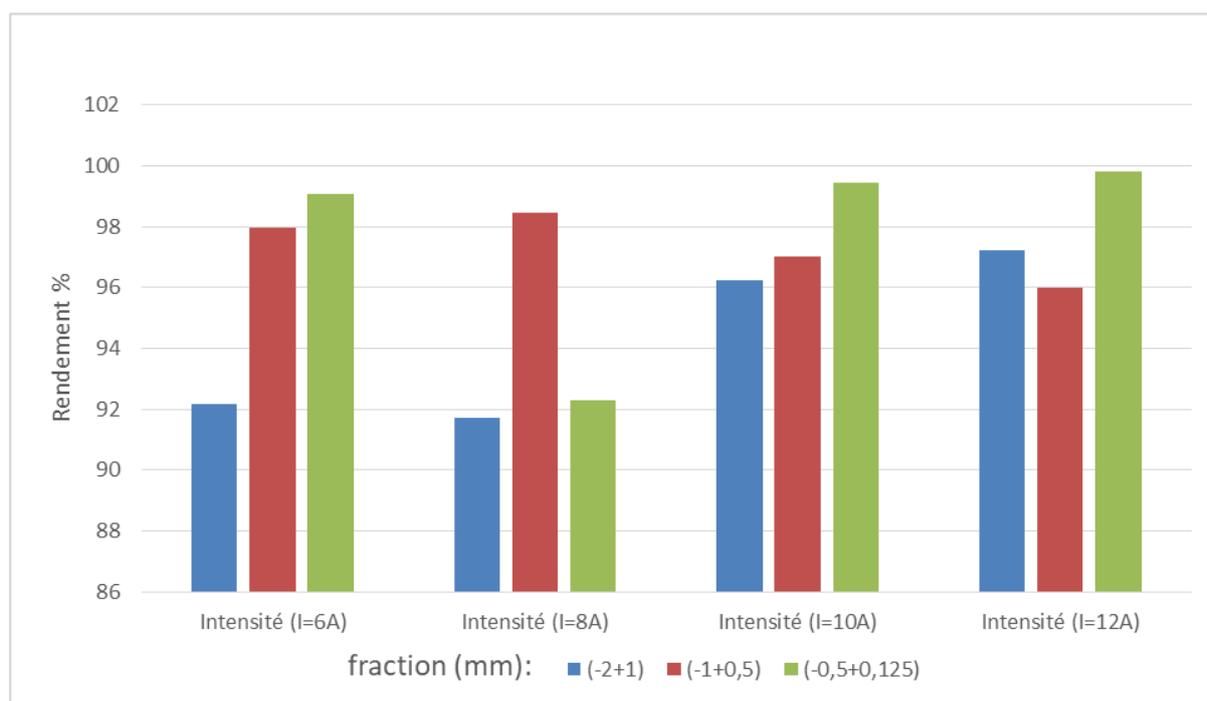


Figure 19. Variation des rendements en fonction de l'intensité du champ magnétique.

La séparation magnétique à haute intensité (SMHI), appliquée sur le minerai de fer de sidi Maarouf à différentes intensités de courants de courant électrique à donner les résultats suivants :

- La récupération de la fraction magnétique (FM) dans la tranche (-2+1 mm) et (-0,5+0,125mm) est relativement le même, pour toutes les intensités appliquées.

► On remarque aussi que lorsqu'on augmente l'intensité de courant le rendement de la fraction magnétique est augmenté. Contrairement à la fraction (-1+0,5mm).

► On remarque aussi que lorsqu'on augmente l'intensité de courant le rendement de la fraction magnétique est augmenté. Contrairement à la fraction (-1+0,5mm).

III.8. Résultats de l'analyse chimique après séparation

Tableau 14 : Résultats FX de la granulométrie (1 mm) de la fraction magnétique.

Intensité (A) Eléments	I=6	I=8	I=10	I=12
Na ₂ O	0,0877	0,0457	0,0262	0,0577
MgO	0,446	0,387	0,381	0,373
Al ₂ O ₃	0,457	0,425	0,385	0,355
SiO ₂	3,35	3,26	3,21	3,17
P ₂ O ₅	0,141	0,149	0,154	0,150
SO ₃	0,516	0,371	0,424	0,379
Cl	/	0,0139	/	/
K ₂ O	0,0991	0,109	0,0923	0,0914
CaO	2,38	2,37	2,39	2,31
MnO	8,08	8	7,27	7,74
Fe ₂ O ₃	83	83,8	84,5	84,2
CuO	0,0575	0,0700	0,0699	0,0654
ZnO	0,0219	0,0253	0,0238	0,0177
As ₂ O ₃	0,0239	0,0201	0,0259	0,0210
SrO	0,0670	0,0649	0,0635	0,0643
Sb ₂ O ₃	0,0332	/	/	/
Rb ₂ O	/	0,0049	/	/
BaO	1,22	0,898	0,969	1,05

Tableau 15 : Résultats FX de la granulométrie (0,5 mm) de la fraction magnétique.

Intensité (A) Eléments	I=6	I=8	I=10	I=12
Na₂O	0,160 %	0,0391	/	0,0270
MgO	0,459	0,436	0,526	0,421
Al ₂ O ₃	0,720	0,480	0,471	0,447
SiO ₂	3,34	3,32	3,64	3,09
P ₂ O ₅	0,133	0,161	0,134	0,133
SO ₃	0,816	0,262	0,264	0,226
Cl	0,0233	/	/	/
K ₂ O	0,138	0,114	0,103	0,119
CaO	1,77	1,88	2,16	1,68
MnO	7,03	8,26	7,85	7,20
Fe ₂ O ₃	84,5	84,1	84,0	85,7
CuO	0,0548	0,0538	/	0,0578
ZnO	0,0963	0,0248	/	0,0161
As ₂ O ₃	0,0237	0,0211	/	0,0226
SrO	0,0565	0,0642	0,0728	0,0613
BaO	0,673	0,757	0,827	0,803

Tableau 16 : Résultats FX de la granulométrie (0,125mm) de la fraction magnétique.

Intensité (A) Eléments	I=6	I=8	I=10	I=12
F	/	0,156	/	/

Chapitre III

Na ₂ O	0,0560	0,0418	0,0699	0,0530
MgO	0,456	0,667	0,504	0,466
Al ₂ O ₃	0,888	0,837	0,842	0,724
SiO ₂	3,57	4,05	4,03	3,73
P ₂ O ₅	0,141	0,170	0,168	0,157
SO ₃	0,271	0,257	0,289	0,325
Cl	0,0131	/	/	0,0121
K ₂ O	0,158	0,163	0,162	0,170
CaO	1,27	2,22	1,91	1,89
TiO ₂	/	/	/	0,0318
MnO	5,98	8,17	8,14	7,94
Fe ₂ O ₃	86,4	82,3	82,9	83,4
CO ₂ O ₃	0	/	/	0,0299
CuO	0,0561	0,0801	0,0794	0,0729
ZnO	0,0171	0,0194	0,0214	0,0235
As ₂ O ₃	0,0123	0,0304	0,0219	0,0227
SrO	0,0578	0,0579	0,0642	0,0717
BaO	0,610	0,793	0,753	0,875

D'après les résultats de FX obtenus après séparation magnétique à haute intensité (SMHI), on a constaté ce qui suit :

Le minerai de Sidi Maarouf testé sur diverses fractions granulométriques donne les résultats ci-dessus :

- Pour la tranche granulométrique (- 2 + 1) mm, le rendement maximal est 84.5%, alors qu'il était à 54.85% avant séparation magnétique à haute intensité (SMHI).
- Pour la tranche granulométrique (- 1 + 0,5) mm, le rendement maximal est 85.7%, alors qu'il était à 55.24% avant séparation magnétique à haute intensité (SMHI).
- Pour la tranche granulométrique (- 0,5 + 0,25), le rendement maximal est 86.4% pour, alors qu'il était à 59.43% avant séparation magnétique à haute intensité (SMHI).

Donc on peut dire que les résultats sont très satisfaisants.

Conclusion générale

Les échantillons prélevés sont soumis à une préparation mécanique adéquate pour leur préparation aux différentes techniques de caractérisation (minéralogique, chimique) un autre échantillon est utilisé dans des essais de séparation magnétique.

Les travaux de recherches effectués sur ce gisement, dans le cadre de la préparation de ces travaux, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'analyse granulométrique montre un produit présentant deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de : (-1 +0,063) mm et (+1) mm donc la distribution des particules dans les tranches granulométriques est de manière irrégulière.
- ✓ L'analyse par DRX des échantillons montre que la majorité des pics sont prédominés par l'agoethite et l'hématite ; bien que le quartz et la calcite ne représentent des composants minéralogiques mineurs.
- ✓ Les analyses chimiques effectuées sur l'échantillon représentatif prélevé dans la zone étudiée montrent la forte présence d'hématite. Cependant, les teneurs d'impuretés de Quartz et de phosphore sont également remarquables, cela affecte négativement la qualité des produits sidérurgiques.
- ✓ Les résultats obtenus par séparation magnétique à haute intensité sont très significatifs en récupération et en teneur de fer (Fe_2O_3). De même une baisse significative de pourcentages de silice, par contre la teneur en phosphore reste peut élever.
- ✓ Le traitement du minerai de fer de Sidi Maarouf par le procédé de séparation magnétique à haute intensité en voie sèche, révèle des résultats acceptables suite à l'augmentation de la teneur en fer et la diminution remarquable des impuretés de quartz et de phosphore.

Références bibliographiques

- [1] DURON R, (1968). Géologie de l'Afrique.
- [2] SZABO P, BILKEI G., 2002, Iron deficiency in outdoor pig production.
- [3] [7] OUTOTEC, 2012. Copyright © 2012 OutotecOyj. Tous droits réservés. Solutions de traitement des minerais d'Outotec, p12.
- [4] AHMED A, SEIFELNASSR S, ELTAHIR M, MOSLIM, ABDEL-ZAHER M, ABOUZEID, (2012). Effective processing of low-grade iron ore through gravity and magnetic separation techniques. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 48 (2), 2012, 567–578.
- [5] BURT R., (1999). The role of gravity concentration in modern processing plants, *Minerals Engineering*, vol. 12, pp.1291-1300.
- [6] ELISAVETA P, (2009), Studies on the Adsorption of Flotation Collectors on Iron Oxides. Luleå, University of Technology Department of Chemical Engineering and Geosciences Division of Chemical Engineering, p94.
- [7] DWARI R K, RAO D S, REDDY P S, 2013, Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample. *International Journal of Mining Science and Technology* 23 (2013) 1–5 Contents.
- [8] Kentish S Veetil SP, Mercier G, Blais JF, Cecchi E, 2014, *International Journal of Environmental Pollution and Remediation (IJEPR)*, Volume 2, Pages 52-58.
- [9] WILLS B A, NAPIER-MUNN T J, 2006, *Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral.* Elsevier Science & Technology Books, p450.
- [10] GILLET G, 1988, La séparation magnétique sous champs intenses en minéralurgie : les systèmes cryoélectriques”, Thèse de doctorat de l'INP de Lorraine, Nancy.
- [11] MEHASNI R, 2007, élaboration de modèles de calcul de dispositifs à induction électromagnétique : application à un système de séparation magnétique dans les milieux particulaire”, thèse de doctorat, Université de Constantine.
- [12] OUILI M, 2013, Modélisation du comportement d'une distribution aléatoire des particules métallique dans un séparateur magnétique en voie humide”, thèse de magister, Université constantine1.
- [13] MESSAI A, 2019. Contribution à l'étude d'une valorisation des minerais de fer pauvres, cas de la mine de Rouina – Ain Defla, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [14] DEL VILLAR R., 2010, Compléments de minéralurgie (GMN-7008), Québec : Université Laval.

Références bibliographiques

- [15] FUERSTENAU M C, HAN KN, 2003, Principles of mineral processing, the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc, Littleton Colorado.
- [16] ROY S, 2009, Recovery Improvement of Fine Iron Ore Particles by Multi Gravity Separation. The Open Mineral Processing Journal, 2009, 2, 17-30.
- [17] BOUABDELLAH S, 2019, Séparation magnétique et électrostatique, Master 1 VRM.
- [18] BLAZY P et JDID E-A, Flottation : aspects pratiques. Techniques de l'ingénieur Traité Génie des procédés, [J 3 360], 10-09-2000.
- [19] GAUDIN A M, flottation, McGraw-Hill Book Inc. Co. New-York. 1957.
- [20] BADJOU DJ S, 2011, Etude des Propriétés Magnétiques du Minerai de fer de Sidi Maârouf-Jijel en vue d'un Enrichissement Par Séparation Magnétique, Magister en mines.
- [21] GHITULESCU T.P et al, (1971), Economie geologică minieră. Editura Tehnică. București.
- [22] INDUSTRIAL EXPORT – ROMANIE (1968). Mines de fer –Algerie –etude.
- [23] BRIVES A, (1918), Contribution a l'étude des gites métallifères de l'Algérie.
- [24] BOULOT, (1937), Rapport sur les gisements de Sidi Maarouf services des mines, Constantine.
- [25] LAROUSSE, Extrait définition du fer dictionnaire larousse.fr.
- [26] CHAABIAR, 2016. Caractérisation physico-chimique et enrichissement des minerais de fer : cas du gisement d'Anini, Sétif-Algérie, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- [27] ROD B., 2007. Globalization and consolidation in steel -The iron ore implications, AJM 10th anniversary Global Iron Ore & Steel Forecast Conference 1st March 2007, Perth, Australia.
- [28] KHELLAL S & MESSARA C ,2014 .Caractérisation et valorisation du rejet de marne issu d'exploitation du fer d'EL-OUENZA, mémoire de Master .Université A Mira Béjaia.
- [29] Ressources naturelles Canada, 2019. U.S. Geological Survey, Production minière mondiale de minerai de fer.
- [30] IDRES A et M. BOUNOUALA, . 2005. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer de l'Ouenza par radiométrie, Journal de Physique, éd. EDP sciences, France.
- [31] Index Mundi, Prix moyens mensuels du minerai de fer, de 2010 à 2019.

Références bibliographiques

[32] CNUCED « Information de marché dans le secteur des produit de base, Minerai de fer»,2013.

[33] BOUAZIZ Al-E,2012. Contribution à l'étude géologique des argiles maestrichtiennes le long de la limite Nord Ouestdu Oued Bou Sellem, Sétif, Algérie, Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba.

[34] CHRISTOPHE C, (2011), « Préparation des poudres et céramiques(OXY) sulfurer pour application en optique passive et active », thèse doctorat, université de Renne.

[35] EL-HAJJI A et ZAYDOUN S, cour de spectroscopie infrarouge, master sciences analytique.

[36] ADJISSA M, 2019, Analyse et caractérisation de minerai de fer de Gara Djebilet (ouest Tindouf _ Algérie), Mémoire de fin d'étude, université de Béjaia.

[37] MARULYNE, JACOS, (2003), Vibrational and Electronic Energy Level sofPolyatomic Transient Molecules. Supplement B, Journal of Physical and Chemical ReferenceData, vol. 32, no 1, p.1.

Résumé

Ce travail est une contribution à l'amélioration de la teneur du minerai de fer de Sidi Maarouf par un procédé de séparation physique. L'objectif de cette étude consiste à caractériser et valoriser le minerai de fer de Sidi Maarouf par méthodes physiques pour obtenir des produits concentrés répondant aux exigences strictes des consommateurs. Cependant des échantillons représentatifs sont prélevés sur site pour connaître et identifier les différents composants constituant le minerai et leurs propriétés physico-chimiques. Cette étude présente une démarche visant à améliorer la qualité du minerai de fer tout en diminuant la teneur en quartz et en phosphore. Elle est basée sur une caractérisation physico-chimique de la composition du minerai de fer de Sidi Maarouf. Selon les objectifs visés pour le traitement de ce minerai, une analyse granulo-chimiques et minéralogique est nécessaire pour mieux cerner les caractéristiques naturelles du minerai de fer. Il en résulte que le minerai de fer de Sidi Maarouf ne répond pas aux exigences sidérurgiques pour être exploité et utilisé directement dans l'industrie. Les résultats obtenus par l'essai de séparation magnétique à haute intensité sont très encourageants et ils présentent une meilleure réduction du P_2O_5 et de SiO_2 pour une granulométrie ($- 1 + 0,5mm$) avec une intensité de courant de 12 A. le concentré final obtenu d'une teneur de 85,7% Fe_2O_3 .

Mots clés : Jijel, Sidi-Maarouf, fer, oxyde de fer, séparation physique, séparation magnétique.

Abstract

This work is a contribution to the improvement of the iron ore content of Sidi Maarouf by a physical separation process. The objective of this study is to characterize and valorize the iron ore of Sidi Maarouf by physical methods to obtain concentrated products that meet the strict requirements of consumers. However, representative samples are taken on site to know and identify the various components constituting the ore and their physicochemical properties. This study presents an approach aimed at improving the quality of iron ore while reducing the quartz and phosphorus content. It is based on a physicochemical characterization of the composition of iron ore from Sidi Maarouf. Depending on the objectives set for the processing of this ore, a granulochemical and mineralogical analysis is necessary to better identify the natural characteristics of the iron ore. As a result, the iron ore from Sidi Maarouf does not meet the steel requirements to be mined and used directly in industry. The results obtained by the high intensity magnetic separation test are very encouraging and they show a better reduction of P_2O_5 and SiO_2 for a particle size ($- 1 + 0.5 mm$) with a current intensity of 12 A. the final concentrate obtained with a content of 85.7% Fe_2O_3 .