

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département de génie minier

Laboratoire de génie minier



Thèse de Doctorat

En Génie Minier

Présentée par :

TIOUR Fahem

**Caractérisation et choix d'un procédé de valorisation
du minerai de fer du gisement de Khanguet – Tébessa par
séparation magnétique.**

Soutenu le 21 Mars 2023 devant le jury composé de :

Présidente	Mme. Faroudja MOHELLEBI	Professeur	ENP
Promoteur	M. Abdelaziz IDRES	Professeur	Université d'Annaba
Co-Promoteur	M. Malek OULD HAMOU	Professeur	ENP
Examinatrice	Mme. Nedjima BOUZIDI	Professeur	Université de Bejaia
Examineur	M. Abdelhak BOUTALEB	Professeur	USTHB
Examineur	M. Hamid YOUSFI	Professeur	ENP

ENP 2023

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département de génie minier

Laboratoire de génie minier



Thèse de Doctorat

En Génie Minier

Présentée par :

TIOUR Fahem

**Caractérisation et choix d'un procédé de valorisation
du minerai de fer du gisement de Khanguet – Tébessa par
séparation magnétique.**

Soutenu le 21 Mars 2023 devant le jury composé de :

Présidente	Mme. Faroudja MOHELLEBI	Professeur	ENP
Promoteur	M. Abdelaziz IDRES	Professeur	Université d'Annaba
Co-Promoteur	M. Malek OULD HAMOU	Professeur	ENP
Examinatrice	Mme. Nedjima BOUZIDI	Professeur	Université de Bejaia
Examineur	M. Abdelhak BOUTALEB	Professeur	USTHB
Examineur	M. Hamid YOUSFI	Professeur	ENP

ENP 2023

أصبح خام الحديد بشكل متزايد مادة خام مهمة لتطوير العديد من القطاعات الاقتصادية ، فهو يسمح لنا بتطوير البنية التحتية وتحسين نوعية حياة السكان ، ولا يزال استهلاكه الهائل لإنتاج الفولاذ عالي الجودة يتزايد عالمياً ، كما سجلت الجزائر زيادة كبيرة في السنوات الأخيرة. تولد أعمال الاستغلال في منجم خانجيت ، من ناحية ، استنزاف الاحتياطيات الغنية بالحديد ، ومن ناحية أخرى ، نفايات الصخور التي لا تمثل مشكلة بيئية فحسب ، بل إنها خسارة اقتصادية أيضاً. تحقيقاً لهذه الغاية ، أصبح من الضروري توفير حلول بتقنية جديدة لمعالجة خام الحديد الضعيف من هذا المنجم من أجل تلبية هذا الطلب الكبير.

هناك العديد من تقنيات المعالجة المتقدمة ، ومع ذلك ، يتطلب اختيار العملية معرفة جيدة بالتركيب المعدني والكيميائي لتوقع الصعوبات التي قد تنشأ في عملية تثمين الموارد المعدنية. تم إجراء دراسة توصيف ، تلتها تجارب علاجية باستخدام عمليتين مختلفتين (مغناطيسية وكهروستاتيكية). لذلك فإن الغرض من هذه الدراسة ذو شقين ، من ناحية ، لإزالة النفايات الصخرية المخزنة بالقرب من المنجم والتي تضر بالبيئة. من ناحية أخرى ، فإن استعادة خام الحديد الضعيف لاستخدامات مختلفة. أخيراً ، اختر طريقة العلاج التي تعطي أفضل النتائج.

تظهر اختبارات التخصيب باستخدام عملية الفصل المغناطيسي عالي الكثافة جدوى وكفاءة العملية ، حيث بلغ محتوى الهيماتيت في المركز 66%. أظهرت نتائج التقييم أيضاً فعالية العملية الكهروستاتيكية ، حيث تم الحصول على أفضل النتائج مع سرعة دوران أسطوانة 50 دورة في الدقيقة وبجهد كهربائي 20 كيلو فولت ، وقد أتاحت لنا هذه التقنية زيادة محتوى الهيماتيت من 41 إلى 59%. تظهر نتائج هذه الدراسة أن الفصل المغناطيسي عالي الكثافة قد أثبت أنه الحل الأكثر فعالية وفائدة عندما يتعلق الأمر بمعالجة ضعف خام الحديد والمخلفات من منجم خانجيت

الكلمات الدالة: منجم خانجيت ؛ خام الحديد؛ التوصيف المعدني والكيميائي ؛ الفصل المغناطيسي والكهرباء الساكنة

ABSTRACT

Iron ore has become more and more an important raw material for the development of several economic sectors, it allows us to develop infrastructures and to improve the quality of life of the population, its prodigious consumption for the production of high quality steel is always increasing at the world level, for its part, Algeria has recorded a considerable increase in recent years. The exploitation works of the Khanguet mine generate on the one hand, the depletion of the iron-rich reserves, on the other hand, the waste rock which is not only an environmental problem, but also an economic loss. To this end, it has become an obligation to provide solutions with a new technology for processing the poor iron ore of this mine in order to meet this important demand.

There are several advanced treatment technologies; however, the choice of the process requires a good knowledge of the mineralogical and chemical composition to anticipate the difficulties that could appear in the process of the mineral resources valorization. A characterization study was carried out (XRD, XRF and SEM), followed by treatment tests using two different processes (magnetic and electrostatic). The purpose of this study is twofold: on the one hand, to eliminate the waste rock stored near the mine which is harmful to the environment. On the other hand, to valorize the poor iron ore for various uses. Finally, to choose the treatment process that gives better results.

The beneficiation tests by the process of high intensity magnetic separation show the feasibility and efficiency of the process, the content of hematite (Fe_2O_3) in the concentrate reached 66 %. The results of the recovery also revealed the efficiency of the electrostatic process, the best results are obtained with a drum rotation speed of 50 rpm and an electric voltage of 20 kV, this technology allowed us to increase the hematite (Fe_2O_3) content from 41 to 59 %. The results of this study show that the high intensity magnetic separation proved to be the most effective and advantageous solution when it comes to the treatment of poor iron ore and waste rock of Khanguet mine.

KEY WORDS: Khanguet mine; Iron ore, Mineralogical and chemical characterization, Magnetic and electrostatic separation.

RESUME

Le minerai de fer est devenu de plus en plus une matière première importante au développement de plusieurs secteurs économiques, il nous permet le développement des infrastructures et d'améliorer la qualité de vie de la population, sa consommation prodigieuse pour la production de l'acier de haute qualité est toujours croissante au niveau mondial, pour sa part, l'Algérie a enregistré une augmentation considérable ces dernières années. Les travaux d'exploitation de la mine de Khanguet génèrent d'une part, l'épuisement des réserves riches en fer, d'autre part, des stériles qui ne sont pas seulement un problème environnemental, mais aussi une perte économique. A cet effet, il est devenu une obligation d'apporter des solutions avec une nouvelle technologie de traitement du minerai de fer pauvre de cette mine afin de répondre à cette demande importante.

Ils existent plusieurs technologies avancées de traitement, par contre, le choix du procédé nécessite une bonne connaissance de la composition minéralogique et chimique pour anticiper les difficultés qui pourraient apparaître dans le processus de la valorisation des ressources minérales. Une étude de caractérisation a été réalisée (DRX, FRX et MEB), suivi d'essais de traitement en utilisant deux procédés différents (magnétique et électrostatique). Le but de cette étude est donc double, d'une part, d'éliminer les stériles stockés à proximité de la mine qui nuisent l'environnement. Et d'autre part, valoriser le minerai de fer pauvre pour une utilisation diverse. Enfin, il s'agira de choisir le procédé de traitement qui donne de meilleurs résultats.

Les tests d'enrichissement par le procédé de la séparation magnétique à haute intensité montrent la faisabilité et de l'efficacité du procédé, la teneur en hématite (Fe_2O_3) dans le concentré a atteint 66 %. Et les résultats de la valorisation ont révélés aussi l'efficacité du procédé électrostatique, les meilleurs résultats sont obtenus avec une vitesse de rotation du tambour ayant atteint 50 rpm et une tension électrique de 20 kV. Cette technologie nous a permis d'augmenter la teneur en hématite (Fe_2O_3) de 41 à 59 %. Les résultats de cette étude montrent que la séparation magnétique à haute intensité s'est avéré la solution la plus efficace et avantageuse lorsqu'il s'agit du traitement du minerai de fer pauvre et les stériles de la mine de Khanguet.

MOTS CLES : Mine de Khanguet, Minerai de fer, Caractérisation minéralogique et chimique, Séparation magnétique et électrostatique.

REMERCIEMENTS

L'achèvement de ce travail mené sur plusieurs années procure une grande satisfaction. 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. Il est l'occasion de se remémorer les différentes embûches qu'il a fallu surmonter mais surtout les personnes qui m'ont permis d'en arriver là.

Je tiens en premier lieu à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu tout au long de mes études. À commencer bien sûr par mes parents qui ont toujours été à mes côtés lors des étapes clés.

Je rends un majestueux hommage au travail d'encadrement et aux qualités humaines et scientifiques de mes directeurs de thèse Pr. IDRES Abdelaziz et Pr. OULD HAMOU Malek, dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne m'ont jamais fait défaut. Mes remerciements s'adressent également aux Pr. MOHELLEBI Faroudja, Pr. BOUZIDI Nedjima, Pr. YOUSFI Hamid et Pr. BOUTALEB Abdelhak pour avoir accepté d'examiner la thèse.

Pratiquement, j'ai travaillé dans plusieurs laboratoires de recherches, je remercie très chaleureusement Messieurs, Pr. BOUNOUALA Mohamed, Pr BOUTALEB Abdelhak, Pr. TILEMATINE Amar, et Madame Pr HADJ ZOBIR Soraya, ainsi que tous les laborantins pour leurs collaborations.

Enfin, j'ai également une grande reconnaissance envers Monsieur, le directeur de l'entreprise SOMIFER, pour sa direction, ses conseils, tout au long de mon stage pratique dans la mine de Khanguet.

Ces quelques lignes ne suffiront jamais à remercier toutes les personnes auxquelles je pense et qui ont leur part dans cette réussite de doctorat.

TIOUR Fahem

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE14

PREMIERE PARTIE : Recherche bibliographique

CHAPITRE 1 : Importance et production mondiale des minerais de fer

1.1. Introduction	18
1.2. Généralités sur les minerais de fer	18
1.2.1. Principaux types de minerais de fer.....	18
1.2.1.1. Magnétite.....	18
1.2.1.2. Martite.....	18
1.2.1.3. Hématite.....	19
1.2.1.4. Goethite.....	19
1.2.1.4. Goethite.....	19
1.2.1.5. Ilménite.....	19
1.2.1.6. Sidérite.....	19
1.2.1.7. Chamosite.....	20
1.2.1.8. Pyrite.....	20
1.2.2. Différents types de gangue dans les minerais de fer.....	20
1.3. Domaine d'utilisation des minerais de fer.....	21
1.4. Importance et production du minerai de fer.....	21
1.4.1. Réserves et production mondiales des minerais de fer.....	22
1.4.2. Production du minerai de fer en Algérie.....	23

CHAPITRE 2 : Analyse des conditions géologiques et minières de la mine de Khanguet

2.1. Introduction.....	26
2.2. Aperçu général sur la mine de fer de Khanguet	26
2.2.1. Situation géographique de la mine.....	26
2.2.2. Historique des travaux de prospection et d'exploitation de la mine.....	27
2.2.3. Description et localisation des gites de la mine.....	28
2.2.4. Climat de la région de Bekkaria	31
2.3. Stratigraphie de la région de Tébessa	31
2.3.1. Géologie régionale de la wilaya de Tébessa.....	32
2.3.2. Géologie du massif de Djebissa.....	37
2.4. Formation et tectonique du Djebel Djebissa.....	40
2.5. Substances utiles et minerais du Djebel Djebissa.....	40
2.6. Formation géologique du gisement.....	42
2.7. Caractères essentiels de la localisation de la minéralisation.....	42
2.8. Travaux d'exploitation de la mine de Khanguet.....	43
2.9. Conclusion.....	45

CHAPITRE 3 : Recherche bibliographique sur le traitement des minerais de fer oxydés

3.1. Introduction.....	48
3.2. Différentes méthodes de la valorisation des ressources minérales.....	48
3.2.1. Méthodes de séparation magnétique.....	48
3.2.1.1. Bases théoriques de la séparation magnétique.....	48
3.2.1.2. Relation entre l'induction et l'intensité du champ magnétique.....	49
3.2.1.3. Attraction magnétique relative.....	51
3.2.1.4. Types de séparateur magnétique.....	52
3.2.1.4.1. Séparateurs magnétique à base intensité (SMBI).....	52
3.2.1.4.2. Séparateurs magnétique à haute intensité (SMHI).....	53
3.2.2. Méthode de séparation électrostatique.....	54
3.2.2.1. Principe du procédé de la séparation électrostatique.....	55
3.2.3. Méthode de séparation physico-chimique	55
3.2.3.1. Principe de la flottation.....	56
3.2.3.2 Conditionnement d'opération de flottation.....	56
3.2.3.3. Réactifs de la flottation.....	57
3.2.4. Méthode de séparation gravimétrique.....	58
3.2.4.1. Principes de fonctionnement de la table à secousse.....	59
3.3. Synthèse des travaux de recherche sur le traitement du minerai de fer.....	60
3.3.1. Études de séparation magnétique pour un échantillon de minerai de fer siliceux à faible teneur.....	60
3.3.2. Séparation de l'hématite rubanée du jaspe par revêtement magnétique	61
3.3.3. Séparation magnétique des fines d'hématite et de limonite sous forme de floes hydrophobes des minerais.....	61
3.3.4. Nouvelle méthode de séparation électrostatique du minerai de fer oxydé.....	62
3.3.5. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer de l'Ouenza par radiométrie.....	62
3.3.6. Flottation par mousse des minerais de fer en Chine.....	62
3.3.7. Rôle de la teneur en silice et alumine dans la flottation des minerais de fer en Inde.....	63
3.3.8. Effet et mécanisme de la sidérite sur la flottation inverse de l'hématite.....	63
3.3.9. Recherche expérimentale sur la flottation inverse anionique de l'hématite avec une colonne de flottation.....	64
3.3.10. Flocculation par cisaillement et flottation de l'hématite.....	64
3.3.11. Dépression d'ensemencement magnétique dans la flottation de boues de minerai d'hématite.....	64
3.3.12. Effet de la température sur la flottation en émulsion de l'hématite.....	65
3.3.13. Un aperçu de la valorisation des minerais de fer par flottation cationique inverse.....	65
3.3.14. Appliquer la chimie de surface à la flottation des minéraux et à la valorisation des ressources énergétique.....	65
3.4. Conclusion.....	66

DEUXIEME PARTIE : Expérimentale

CHAPITRE 4 : Caractérisation physico-chimique et minéralogique du minerai de fer de Khanguet

4.1. Introduction.....	69
4.2. Prélèvement et préparation des échantillons.....	69
4.2.1. Prélèvement des échantillons sur terrain.....	70
4.2.2. Préparation mécanique des échantillons.....	71
4.3. Caractérisation du minerai de fer de la mine de Khanguet.....	74
4.3.1. Caractérisation physique par analyse granulométrique à sec	74
4.3.1.1. Principe et description de l'analyse granulométrique par tamisage à sec.....	75
4.3.2. Caractérisation chimique et minéralogique du minerai de fer de Khanguet.....	78
4.3.2.1. Caractérisation chimique par fluorescence des rayons X.....	78
4.3.2.1.1. Principe de la fluorescence des rayons X.....	78
4.3.2.1.2. Présentation et interprétation des résultats d'analyses par FRX.....	79
4.3.2.1.3. Indice de basicité.....	80
4.3.3. Caractérisation minéralogique du minerai de fer la mine de Khanguet.....	80
4.3.3.1. Observation au microscope optique.....	81
4.3.3.1.1. Description du microscope optique	81
4.3.3.1.2. Observation au microscope optique à lumière naturelle et polarisée.....	81
4.3.3.1.3. Observation des sections polies au microscope optique à lumière réfléchie..	83
4.3.3.1.4. Observation des lames minces au microscope optique à lumière transmise..	84
4.3.3.2. Observation au microscope électronique à balayage.....	85
4.3.3.2.1. Principe de la microscopie électronique à balayage.....	86
4.3.3.2.2. Résultats et traitement des images issues des observations au MEB.....	88
4.3.3.2.3. Interprétation des résultats d'observation au MEB.....	90
4.3.3.3. Caractérisation minéralogique par diffraction aux rayons X.....	90
4.3.3.3.1. Principe de la diffraction des rayons X.....	90
4.3.3.3.2. Loi de Bragg.....	91
4.3.3.3.3. Résultats de l'analyse par le DRX.....	91
4.4. Conclusion.....	92

CHAPITRE 5 : Essais de valorisation des minerais de fer de Khanguet

5.1. Introduction.....	94
5.2. Méthodes d'enrichissement du minerai de fer et les stériles de la mine de Khanguet.....	94
5.2.1. Enrichissement par le procédé de la séparation magnétique.....	94
5.2.1.1. Conditions d'application et paramètres variables des essais réalisés par le procédé de la SMHI en voie sèche.	95
5.2.1.2. Schéma proposé de traitement par le procédé magnétique.....	97
5.2.2. Enrichissement par le procédé de la séparation électrostatique à effet corona.....	97
5.2.2.1. Principe de fonctionnement du procédé électrostatique à effet corona	98
5.2.2.2. Effet couronne du séparateur électrostatique.....	99
5.2.2.3. Forces agissant sur les particules conductrices et non conductrices.....	101

5.2.2.4. Essais de traitement du minerai de fer et les stériles de la mine de Khanguet par le procédé électrostatique.....	102
5.2.2.4.1. Conditions des essais de traitement par le séparateur électrostatique à tambour	102
5.2.2.4.2. Schéma proposé de traitement par le procédé électrostatique.....	105
5.3. Conclusion.....	106
CONCLUSION GENERALE.....	107
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	page
Tableau 1.1	Différents types du minerai de fer.....	19
Tableau 1.2	Différents types de gangue dans les minerais de fer.....	20
Tableau 1.3	Réserves mondiales de minerai de fer brut, par pays, en 2020.....	22
Tableau 1.4	Production mondiale du minerai de fer (2000, 2011, 2017).....	22
Tableau 1.5	Production mondiale du minerai de fer 2020.....	23
Tableau 2.1	Cordonnées UTM du périmètre de la mine de Khanguet.....	26
Tableau 3.1	Susceptibilité magnétique de quelques minéraux.....	50
Tableau 3.2	Minéraux pouvant être séparés par le procédé physico-chimique.....	58
Tableau 4.1	Coordonnées UTM des points de prélèvement des échantillons.....	71
Tableau 4.2	Résultats d'analyse granulométrique de l'échantillon « C ».....	76
Tableau 4.3	Résultats d'analyse granulométrique de l'échantillon « S ».....	77
Tableau 4.4	Résultats d'analyse par la fluorescence des rayons X.....	79
Tableau 4.5	Résultats d'analyse granulo-chimique de l'échantillon du gîte (C).....	79
Tableau 4.6	Résultats d'analyse granulo-chimique de l'échantillon (S).....	80
Tableau 5.1	Récapitulation des résultats des essais de traitement par SMHI.....	96
Tableau 5.2	Minéraux conducteurs et non-conducteurs.....	98
Tableau 5.3	Résultats des essais de traitement par l'électrostatique.....	103
Tableau 5.4	Rendement, récupération du concentré et du rejet.....	104

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Figure 1.1	Principales entreprises productrices du minerai de fer en Algérie.....	24
Figure 2.1	Situation géographique de la mine de Khanguet.....	27
Figure 2.2	Carte de localisation des gites de la mine de Khanguet.....	28
Figure 2.3	Vue générale du gite A ₁	29
Figure 2.4	Vue générale du gite A ₂	29
Figure 2.5	Vue générale du gite B.....	30
Figure 2.6	Vue générale du gite C.....	30
Figure 2.7	Carte géologique de la wilaya de Tébessa.....	32
Figure 2.8	Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa.....	33
Figure 2.9	Coupe stratigraphique de la région de Djebel Djebissa et Khanguet.....	38
Figure 2.10	Conglomérats du quaternaire à disposition verticale.....	39
Figure 2.11	Carte géologique simplifiée du Djebel Djébissa.....	41
Figure 2.12	Schéma technologique d'extraction et de préparation mécanique du minerai de Khanguet.....	43
Figure 2.13	Station de concassage de la mine de Khanguet.....	44
Figure 2.14	Représentation schématique du positionnement des gites et le plan de circulation.....	45
Figure 3.1	Séparation magnétique entre billes de fer et de céramique.....	49
Figure 3.2	Séparateur magnétique à base intensité en voie sèche à tambour et séparateur magnétique croisé.....	52
Figure 3.3	Séparateurs magnétiques à tambour humide.....	
Figure 3.4	Séparateurs magnétiques à haute intensité en voie sèche à rotor induit...	54
Figure 3.5	Séparateur électrostatique à effet corona.....	55
Figure 3.6	Cellule de flottation.....	59
Figure 3.7	Mécanismes de la séparation gravimétrique.....	59
Figure 3.8	Table à secousse.....	60
Figure 4.1	Schéma synoptique des étapes de la caractérisation faites sur les échantillons représentatifs prélevés sur terrain.....	69
Figure 4.2	Zones de prélèvement des échantillons sur terrain.....	70
Figure 4.3	Aspect physique du minerai de fer brut de la mine de Khanguet.....	70
Figure 4.4	Protocole de prélèvement et de préparation du minerai.....	71
Figure 4.5	Concasseur à machoire à double effect.....	72
Figure 4.6	Etapes d'échantillonnage par quartage.....	72
Figure 4.7	Vue intérieur et extérieur du broyeur planétaire Retsch PM 100.....	73
Figure 4.8	Différents types d'impact mécanique mis en jeu pendant le broyage.....	73
Figure 4.9	Méthodologie de caractérisation du minerai de fer de Khanguet après préparation mécanique.....	74
Figure 4.10	Tamiseuse électro-vibrante de marque RETSCH.....	75
Figure 4.11	Courbe granulométrique de l'échantillon gite « C » du minerai de fer concassé.....	76
Figure 4.12	Courbe granulométrique de l'échantillon stérile « S ».....	77
Figure 4.13	Microscope optique.....	82

Figure 4.14	Résultats d'observation sous microscope optique à lumière naturel.....	82
Figure 4.15	Résultats d'observation au microscope polarisant.....	83
Figure 4.16	Scie avec lame diamantée et Polisseuse.....	84
Figure 4.17	Résultats d'observation au microscope à lumière réfléchie.....	84
Figure 4.18	À gauche rectifieuse. À droite, collage de l'échantillon sur plaque de verre.....	85
Figure 4.19	Microphotographies en LPA (G.X 20) des lames minces.....	85
Figure 4.20	Microscope électronique à balayage QUANTA 250.....	86
Figure 4.21	Principe de fonctionnement général du MEB.....	87
Figure 4.22	Schéma simplifié des interactions faisceau primaire-échantillon.....	88
Figure 4.23	Microphotographie prise sur l'échantillon du gite C.....	88
Figure 4.24	Microphotographie prise sur l'échantillon du stériles S.....	89
Figure 4.25	Microphotographies des lames minces a. échantillon C.....	89
Figure 4.26	DRX de type D2 PHASER, marque BRUKER.....	90
Figure 4.27	Loi de Bragg, diffraction des rayons X incidents d'une longueur d'onde λ . donnée selon un angle θ	91
Figure 4.28	Spectre DRX du gite C	92
Figure 4.29	Spectre DRX du stériles S.....	92
Figure 5.1	Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI) voie sèche.....	95
Figure 5.2	Schéma proposé de traitement par le procédé magnétique	97
Figure 5.3	Variable d'un procédé de séparation électrostatique à effet couronne et séparateur électrostatique à tambour (effet couronne)	99
Figure 5.4	Différentes configurations d'électrodes couronnes.....	99
Figure 5.5	Représentation schématique de l'effet couronne.....	100
Figure 5.6	Séparateur électrostatique à tambour et Représentation schématique des forces électrostatiques et mécaniques.....	102
Figure 5.7	Schéma proposé de traitement par le procédé électrostatique.....	105

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
ENP	Ecole Nationale Polytechnique
SOMIFER	Société des Mines de Fer d'Algérie
CRAPC	Centre de Recherche des Analyses Physico-Chimiques
LAVAMINE	Laboratoire de Valorisation des Ressources Minières et Environnement
SONAREM	Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières
ORGM	Office Nationale de la Recherche Géologiques et Minières
Fe	Fer
Q	Quartz
Ca	Calcium
Si	Silicium
Al	Aluminium
Mg	Magnésium
PAF	Perte Au Feu
LPA	Lumière Polarisée Analyisée
A	Ampère
FRX	Fluorescence des Rayons X
MEB	Microscope Electronique à Balayage
DRX	Diffraction des Rayons X
γ	Rendement
ε	Taux d'extraction
I_p	Indice de basicité Partiel
SMBI	Séparateur Magnétique à Basse Intensité
SMHI	Séparateur Magnétique à Haute Intensité

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie minière en Algérie est un secteur économique important et les potentialités minières sont très diversifiées. Pour l'économie Algérienne, la prochaine décennie sera sans doute celle des produits miniers. Cette industrie regroupe les activités d'exploitation des mines et le traitement des minerais. Parmi les minerais exploités à grande échelle on trouve le minerai de fer qu'est devenue une matière première importante au développement de plusieurs secteurs économique, tel que, l'industrie automobile, la construction navale, ferroviaire, les bâtiments, les ponts et aussi, l'industrie aéronautique et spatiale. D'une manière générale, cette industrie minière, nous permet le développement des infrastructures et d'améliorer la qualité de vie de la population.

La mine de fer de Khanguet est située dans la partie Nord-Est de l'Algérie, à 16 km Est de la ville de Tébessa, elle englobe une superficie de 360 ha, elle est caractérisée par cinq gites minéralisés (A, B, C, D et E), en plus le stock des stériles (S). La méthode d'exploitation adaptée d'après les conditions géologiques et minière de la mine est la méthode d'exploitation sélective sans avoir recouru plus souvent à l'extraction aux explosifs à fin de diminuer le salissage du minerai de fer.

Les travaux d'exploitation de la mine de Khanguet génèrent d'une part, l'épuisement des réserves riche en fer, d'autre part, génèrent des stériles qui ne sont pas seulement un problème environnemental, mais aussi une perte économique pour l'entreprise. L'objectif de cette étude est : la caractérisation et la valorisation du minerai de fer pauvre et les stériles de la mine de Khanguet pour diversifier leurs utilisations et d'éliminer les stériles stockés à proximité de la mine qui nuisent l'environnement.

Les procédés de traitement des minerais mis en œuvre dépendent de la nature du minerai, de sa gangue. C'est pour cela on a effectué la première partie de notre travail de recherche, celle de la caractérisation physico-chimique et minéralogique, il est donc nécessaire afin de bien connaître la composition chimique et les interactions entre les différents composants minéraux. Le choix du procédé de traitement du minerai de fer de Khanguet est basé sur les différences des propriétés des différents minéraux à séparer, car ceci nous permet d'obtenir un concentré de haute qualité.

Cependant, des analyses par diffractions des rayons X, fluorescence X, microscope électronique à balayage, infrarouge, lames minces, sections polies et analyse pétrographique sont réalisées sur le minerai de fer de Khanguet. Suivi par le traitement en utilisant deux méthodes (électrostatique et magnétique). En ce qui concerne la séparation électrostatique, deux paramètres ont été caractérisés, tel que, la tension électrique et la vitesse de rotation du tambour. Par contre la séparation magnétique, les deux paramètres variables sont : la granulométrie et l'intensité du courant électrique.

Cette thèse synthétise l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de la formation doctorale. Les travaux de recherche menés dans le cadre de la préparation de la thèse de doctorat comportent cinq chapitres, dont une introduction et une conclusion générale. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la réduction de la teneur des impuretés (CaO, MgO, SiO₂ et

Al₂O₃) qui pénalisent actuellement son exploitation et le développement de la région, afin d'être utilisé dans l'industrie sidérurgique. Pour atteindre cet objectif, une étude scientifique portant sur la caractérisation physico-chimique et minéralogique, suivi par le traitement du minerai et les stériles de fer du gisement de Khanguet – Tébessa. Il comporte les chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à l'étude d'appréciation, et l'importance des minerais de fer dans les industries, les types, les besoins en la matière, la production des minerais de fer, ainsi que la situation actuelle et perspective sur les minerais de fer en Algérie.

Le deuxième chapitre porte sur la situation géographique, la géologie de la région, un aperçu stratigraphique et la minéralisation du gisement de Khanguet –Tébessa.

Le troisième chapitre comporte la recherche bibliographique, dans ce chapitre, l'étude comporte sur la synthèse des travaux de recherche des méthodes récentes et classiques d'enrichissement du minerai de fer.

Le quatrième chapitre : Porte sur l'échantillonnage et la caractérisation du minerai de fer et les stériles de Khanguet tels que l'analyse granulométrique à sec par tamisage, l'analyse minéralogique par le microscope optique (MO) et le microscope électronique à balayage (MEB) pour la poudre, lames minces, section polie, ainsi que les analyses physico-chimiques par DRX et FX.

Le cinquième chapitre de cette thèse est consacré à l'étude expérimentale visant à réduire le taux des argiles se trouvant dans le minerai de fer de Khanguet et l'augmentation de la teneur en substance utile. Ce travail de recherche réside dans l'application du procédé de lavage comme une méthode d'enrichissement préliminaire suivi par la séparation magnétique à haute intensité sèche et la séparation électrostatique à effet couronne comme des méthodes de traitement. La discussion et l'interprétation des résultats obtenus par ces expérimentations nous ont permis de proposer un schéma de traitement du minerai de fer de Khanguet afin d'obtenir un concentré de haute qualité qui va répondre aux exigences industrielles sidérurgiques.

PREMIERE PARTIE

Recherche bibliographique

CHAPITRE 1

Importance et production mondiale des minerais de fer

1.1. Introduction

Le fer représente environ 32,07 % de la masse de la Terre et de son abondance élémentaire varie entre environ 5 % de la croûte terrestre et jusqu'à 80 % du noyau de la planète. Il n'est donc pas surprenant qu'il existe un certain nombre gisements de minerai de fer trouvés à la surface de la terre avec des compositions minéralogiques et chimiques différentes. Le terme minerai de fer est utilisé ici comme un terme économique pour désigner les gisements de fer et produits qui sont ou pourraient être exploités économiquement pour leur teneur en fer rentable. Toute accumulation de fer non économique est simplement appelée minéralisation du fer [1].

Au cours de la dernière décennie, il y a eu une croissance massive de la production de minerai de fer autour du monde alimenté par la forte demande de la Chine. Cette augmentation de la demande a encouragé les sociétés minières à augmenter leurs taux de production et ouvrir de nouveaux gisements. Les sociétés minières sont désormais confrontées au défi de caractériser des volumes croissants de minerai de fer [2].

1.2. Généralités sur les minerais de fer

La demande mondiale de l'acier augmente rapidement, il est vital pour l'économie mondiale, c'est un alliage de fer et de carbone. Il possède des caractéristiques importantes comme, une bonne résistance, une formabilité, une polyvalence, une recyclabilité et il est faible coût. Toutes ces propriétés en font un matériau idéal pour l'industrie de la construction des bâtiments, l'industrie lourde, la construction navale (bateaux), la fabrication de véhicules, la construction des chemins ferroviaire, la construction des ponts, la fabrication de machines, et les applications d'ingénierie. Selon des statistiques faites par World Steel Association, la production mondiale d'acier brut a presque doublé depuis 2000.

1.2.1. Principaux types de minerais de fer

Les minerais de fer sont très nombreux, avec des teneurs variant de 20 à 95 % en terme de substance utile, mais un nombre limité d'entre eux sont utilisés, vu leurs rentabilité. Les minerais de fer sont classés selon plusieurs facteurs, la granulométrie, la composition minéralogique et la composition chimique. Le tableau 1.1 présente les principaux types selon leurs compositions chimiques.

1.2.1.1. Magnétite (Fe_3O_4) est un minéral métallique, qui contient deux oxydes de fer (Fe II et Fe III) et Fe_2O_3 [3]. La magnétite de haute teneur contient plus de 70 % Fe, avec certaines impuretés telles que la silice, l'alumine et le phosphore. La magnétite peut être enrichie par concassage suivi par une séparation magnétique. Cette séparation est efficace pour la magnétite de faible teneur en comparaison avec l'hématite.

1.2.1.2. Martite α - Fe_2O_3 : Le terme martite est utilisé dans l'industrie du fer pour l'hématite secondaire formée en remplaçant la magnétite. Le remplacement s'effectue à partir des bords extérieurs vers le centre des grains de magnétite, généralement le long de plans cristallographiques [4].

1.2.1.3. Hématite (Fe₂O₃) : Est fréquemment trouvée dans les sols et les sédiments. Elle est à l'origine de la couleur rouge sang. L'hématite est de symétrie hexagonale dont le paramètre de maille est $a = 0,503$ nm et $c = 1,375$ nm. En milieu naturel, elle peut également présenter des substitutions aluminium et est souvent caractérisée par une morphologie en nid d'abeilles [5].

Tableau 1.1 : Différents types du minerai de fer [6]

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

1.2.1.4. Goethite (α -FeO(OH)) : C'est une phase minérale secondaire formée par l'oxydation de carbonates de fer, d'hématite, de martite et de magnétite. La goethite, α -FeOOH, qui confère la couleur jaune-brun aux sédiments, est l'oxyhydroxyde ferrique le plus stable thermodynamiquement dans l'environnement. La goethite est de symétrie orthorhombique dont le paramètre de maille est $a = 0,459$ nm, $b = 0,994$ nm et $c = 0,301$ nm. Dans les milieux naturels, le Fe (III) est très souvent substitué par des atomes d'aluminium (Al (III)), jusqu'à 0,33 mol mol⁻¹. De plus, la goethite a des cristaux de tailles de quelques nanomètres à quelques microns et de formes variables, aiguilles ou grains.

1.2.1.5. Ilménite (FeTiO₃) : C'est un oxyde de fer et de titane (FeTiO₃) 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 noire et elle n'est pas magnétique contrairement à l'hématite et la magnétite. On retrouve deux types principaux d'ilménite, celle contenant du manganèse porte le nom de pyrophanite et celle contenant du magnésium geikelite.

1.2.1.6. Sidérite (FeCO₃) : On la trouve dans les sédiments marins en zone anoxique, avec souvent de petites quantités de vivianite (Fe₃(PO₄)₂8(H₂O)) [7]. Cette espèce carbonate est rarement pure et contient généralement des traces de magnésium ou de manganèse. Elle a également été identifiée au sein de matériaux extraterrestres. La sidérite est de symétrie hexagonale dont le paramètre de maille est $a = 0,472$ nm et $c = 1,546$ nm. La sidérite, en fonction de sa vitesse d'oxydation et la présence d'eau, est oxydée et forme de la goethite, de

la lépidocrocite ou de l'hématite [8]. Elle peut être formée par voie biologique ou chimique [9].

1.2.1.7. Chamosite (Mg,Fe,Al)₆(Si,Al)₄O₁₄(OH)₈ : Il se produit avec l'ensemble de la sidérite et l'hématite dont la concentration relativement faible. Elle contient habituellement certains sulfures, phosphore et autres éléments tels que le quartz et la calcite [10].

1.2.1.8. Pyrite (FeS₂) : C'est un sulfure de fer 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 (54 % de soufre) et pour la production d'acide sulfurique. La Pyrite demande à être conservée dans un endroit sec. Car l'humidité favorise la désagrégation de la pyrite en acide sulfurique et en oxyde de fer. Attention! Cette pierre produit de l'anhydride sulfurique si elle est chauffée. (Ne jamais respirer la vapeur se dégageant de cette combustion).

1.2.2. Différents types de gangue dans les minerais de fer

Les impuretés contenues dans les minerais de fer sont connues comme gangues. La présence de certains éléments peut influencer négativement ou positivement sur les caractéristiques du minerai ou sur l'opération de la fusion au niveau du haut fourneau. Idéalement, le minerai de fer contient seulement le fer et l'oxygène, mais typiquement, il contient des éléments indésirables pour les différentes industries [11]. Il y a plusieurs éléments principaux qui incluent les argiles (kaolinite, alumine, gibbsite...etc.), les oxydes (l'oxyde de silice, l'oxyde de calcium, l'oxyde de magnésium...etc.) et autres. La plupart des minerais de fer contiennent CaO, Al₂O₃, MgO et SiO₂. Le tableau 1.2 présente les différents minéraux de gangue dans les minerais de fer.

Tableau 1.2 : Différents types de gangue dans les minerais de fer [12].

Minéral	Formule Chimique
Calcite	CaCO ₃
Quartz	SiO ₂
Gibbsite	Al(OH) ₃
Kaolinite	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈
Minnesotaite	(Mg,Fe) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Chlorite	(Fe,Al,Mg) ₃ (Si,Al) ₂ O ₅ (OH) ₄
Ankerite	Ca(Fe, Mg, Mn)(CO ₃) ₂
Pyrolusite	MnO ₂

1.3. Domaines d'utilisation des minerais de fer

Le fer possède des caractéristiques importantes, c'est pour cela qu'il est utilisé dans plusieurs industries. Historiquement, l'homme n'utilisait que les cailloux comme outil principal pour ses différentes tâches de son quotidien, ce qu'on appelle, l'âge de la pierre. Ensuite il découvrit l'argile, un matériau malléable qui était transformé après cuisson en matériau indéformable et imperméable. Ensuite, vient l'âge du fer et du bronze, c'est l'âge des métaux. L'utilisation des métaux purs présente beaucoup d'inconvénients tels que de faibles propriétés mécaniques, électriques, coûts très élevés etc... Au 15^{me} siècle on préparait empiriquement des alliages binaires qui sont faciles à travailler et plus résistants que les métaux purs. C'est au 20^{ème} siècle que les chercheurs ont pu établir les bases essentielles et les techniques fondamentales qui ont permis de progresser efficacement dans l'élaboration de nouveaux matériaux. Le dernier siècle est caractérisé par l'apparition des matériaux de construction, des alliages, matériaux réfractaires et surtout les composés organiques.

Le minerai de fer est la matière première de la fonte, qui est elle-même la matière première principale de l'acier. Presque 98 % de tout le minerai de fer expédié dans le monde est utilisé pour produire du fer ou de l'acier, qui est l'un des métaux les plus utiles au monde [13].

1.4. Importance et production du minerai de fer

L'industrie minière est le secteur économique qui regroupe les activités de prospection et d'exploitation des mines. Elle est à la source de la production de nombreux biens d'équipements et de consommation. En cela, les entreprises qui contrôlent cette activité jouent un rôle de poids dans l'économie mondiale. Elle est une source importante de revenus directe et indirecte pour l'économie nationale et internationale. Cette industrie regroupe les activités d'extraction des minéraux, des terres rares et des métaux dont le fer qu'est devenue une matière première importante au développement de plusieurs secteurs économique, tel que, l'industrie automobile, la construction navale, ferroviaire, les bâtiments, les ponts et aussi, l'industrie aéronautique et spatiale. D'une manière générale, cette industrie minière, nous permet le développement des infrastructures et d'améliorer la qualité de vie de la population.

Avant d'extraire le minerai de fer, les gisements doivent être évalués pour connaître leur distribution en termes de teneur, afin d'optimiser l'exploitation de la mine. Les exploitants des mines de fer peuvent définir la teneur du minerai, assurer une exploitation précise de la mine et prévoir la possibilité d'enrichissement du minerai de fer. Pour traiter efficacement le minerai de fer en vue d'une production d'acier de haute qualité, une surveillance fréquente de la teneur du minerai est indispensable à toutes les étapes du traitement en aval. Après avoir épuisé les gisements les plus facilement accessibles, et alors que la pression de la demande croît sur le minerai de fer, l'industrie minière doit souvent consommer plus d'énergie et parfois prendre plus de risques, tout en produisant souvent plus de déchets, et des déchets parfois plus sales pour extraire les ressources minérales du sol. Ou il faut aller les chercher plus loin, plus haut ou plus profondément sous la mer ou dans le sous-sol. L'industrie minière est donc confrontée à de nouveaux enjeux de rentabilité et de soutenabilité, qui dépassent le seul champ de l'environnement [14].

1.4.1. Réserves et production mondiales des minerais de fer

Les réserves mondiales en minerais de fer sont estimées en 2020 à 175 500 Millions de tonnes, des quantités très intéressantes pour le développement de plusieurs industries. Ces réserves de plus en plus diminuées. Le tableau 1.3 représente les réserves mondiales de minerai de fer brut par pays en 2020 [15].

Tableau 1.3 : Réserves mondiales de minerai de fer brut par pays en 2020.

Classement	Pays	Millions de tonnes	Pourcentage du total, %
1	Australie	50 000	28,5
2	Brésil	34 000	19,4
3	Russie	25 000	14,2
4	Chine	20 000	11,4
5	Ukraine	6 500	3,7
6	Canada	6 000	3,4
7	Inde	5 500	3,1
8	États-Unis	3 000	1,7
9	Iran	2 700	1,5
10	Kazakhstan	2 500	1,5
-	Autres pays	20 300	11,6
Total		175 500	100

Tableau 1.4 : Production mondiale du minerai de fer (2000, 2010, 2017)

Classement	Pays	Production du minerai de fer (Tonnes)		
		2000	2010	2017
1	Chine	223 947 124	1 077 705 524	1 229 373 548
2	Australie	171 508 542	432 675 584	885 356 548
3	Brésil	210 000 625	372 300 589	435 000 147
4	Inde	80 762 698	207 157 124	200 955 145
5	Russie	87 100 580	95 500 052	95 000 215
6	Afrique du Sud	33 707 540	58 709 009	74 643 147
7	Iran	12 208 080	35 548 580	74 000 958
8	Ukraine	55 883 250	78 541 410	60 574 004
9	Canada	36 740 040	37 001 050	49 009 060
10	Etat Unis	63 089 800	49 500 009	46 300 040
30	Algérie	1 646 600	1 474 040	830 562

Tableau 1.5 : Production mondiale du minerai de fer 2020.

Classement	Pays	Millions de tonnes	Pourcentage du total, %
1	Australie	900	37,6
2	Brésil	400	16,7
3	Chine	340	14,2
4	Inde	230	9,6
5	Russie	95	4
6	Afrique du Sud	71	3
7	Ukraine	62	2,6
8	Canada	52	2,2
9	États-Unis	37	1,5
10	Suède	35	1,5
-	Autres pays	172	7,1
Total		2394	100

1.4.2. Production du minerai de fer en Algérie

En Algérie, on trouve plusieurs gisements de minerai de fer, ils représentent une très grande part de la richesse minière. Leurs exploitations ont toujours une place prépondérante dans l'industrie extractive du pays.

Les ressources nationales du minerai de fer sont localisées et réparties sur huit gisements dont ceux de l'Ouenza et Boukhadra situés à l'Est du pays, à Tébessa. Ils sont exploités par le groupe mines de fer d'Algérie (Figure 1.1). Les réserves géologiques sont estimées à 87 millions de tonnes avec une teneur de 49 % Fe. D'une production de deux millions de tonnes/an, la minéralisation de ce minerai est encaissée dans les calcaires récifaux Aptiens. Actuellement, dans la même région. La réserve géologique est d'environ dix millions de tonnes avec une teneur de 53 % Fe. C'est le gisement de Chaabet-El-Ballout, sa minéralisation ferrifère est localisée au contact Calcaires-formations gréso-marneuses du Crétacé.

On trouve d'autres mines de fer exploitées par l'entreprise SOMIFER : la mine de Sidi Maarouf (W. Jijel), Djebel Anini : cette mine est localisée au niveau de la wilaya de Sétif avec une réserve géologique de 6.75 millions de tonnes avec une teneur de 55 % en Fe, sa minéralisation hématitique est encaissée dans les calcaires du lias sous forme de filons et de poches. Le gisement de Rouina est localisé au niveau de la wilaya d'Ain Defla, enfin la mine de Khanguet (W. Tébessa), le minerai de fer de ces deux derniers est destinée essentiellement pour la fabrication du ciment [16]

D'autres gisements de fer de réserves plus réduites sont dans les prospectives d'une exploitation, notamment le plus grand gisement d'Algérie, savoir celui de Gara-Djebilet : les réserves géologiques sont 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. Un autre gisement important est celui de Mecheri-Abdelaziz, ces réserves géologiques sont estimées à 1,350 milliards de tonnes avec une teneur de 52 % en fer, une minéralisation ferrifère oolithique localisée sous forme de lentilles dans les grès du

Dévonien supérieur. D'autres gisements sont puiss ou en voie d'épuisement dans la wilaya de Béni-Saf.

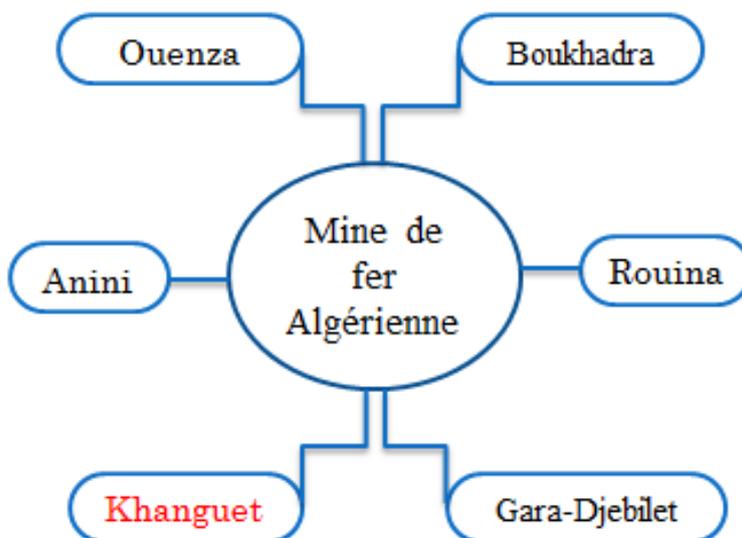


Figure 1.1 : Principales entreprises productrices du minerai de fer en Algérie

CHAPITRE 2

**Analyse des conditions géologiques et minières de la mine
de Khanguet**

2.1. Introduction

La wilaya de Tébessa est caractérisée par une plaine, suivie par le haut cours de l'Oued Mellègue qui correspond à un grand fossé d'effondrement qui recoupe orthogonalement des plis d'axe Sud-Ouest, Nord-Est. La plaine de la wilaya de Tébessa est vaste, l'altitude moyenne de 805 m. Elle est entourée de part et d'autre de masse calcaire assez élevée séparées par des dépressions creusées dans les marnes de la série Crétacée [17].

Au point de rencontre du principal axe de plissement et du fossé d'effondrement, point faible à l'intersection de lignes de rupture de la couverture sédimentaire, le Trias affleure largement [17]. La ligne qui partage les eaux entre le versant méditerranéen et le versant saharien est l'arête rocheuse franchit les cols de Bekkaria et de Tenoukla au Sud-Ouest de la falaise du Doukkane.

2.2. Aperçu général sur la mine de fer de Khanguet

Actuellement dans le Nord-Est Algérien, Trois gisements de fer font l'objet d'exploitation, ceux de l'Ouenza et de Boukhadra fournissent des minerais bruts au complexe sidérurgique d'EL Hadjar – Annaba et le troisième est celui de Khanguet qui fournit les cimenteries de l'Est Algérien.

2.2.1. Situation géographique de la mine

La mine de Fer de Khanguet est située dans la partie Nord-Est de l'Algérie, à environ 20 km dans la partie Est de la wilaya de Tébessa, à 15 km au Sud d'El Kouif et à proximité de la frontière Tunisienne (figure 2.1). Sur le plan régional, elle se situe à l'extrémité Nord-Est de l'atlas Saharien [18]. Elle englobe une superficie de 360 ha. Le permis minier est enregistré sous le numéro 2729 PXM, est du 17/07/2014 d'une validité de 10 ans ; Vocation du terrain : forestier ; Statut juridique du terrain : domanial. Le tableau 2.1 représente les cordonnées UTM qui délimitent le périmètre de la mine.

Tableau 2.1 : Cordonnées UTM du périmètre de la mine de Khanguet

Bornes	X	Y	Bornes	X	Y
B1	437000	3918700	B10	435700	3916300
B2	438200	3918700	B11	435700	3917000
B3	438200	3917700	B12	435800	3917000
B4	437800	3917700	B13	435800	391710
B5	437800	3916300	B14	436000	3917100
B6	436900	3916300	B15	436000	3917200
B7	436900	3916200	B16	436400	3917200
B8	436000	3916200	B17	436400	3917300
B9	436000	3916300	B18	437000	3917300

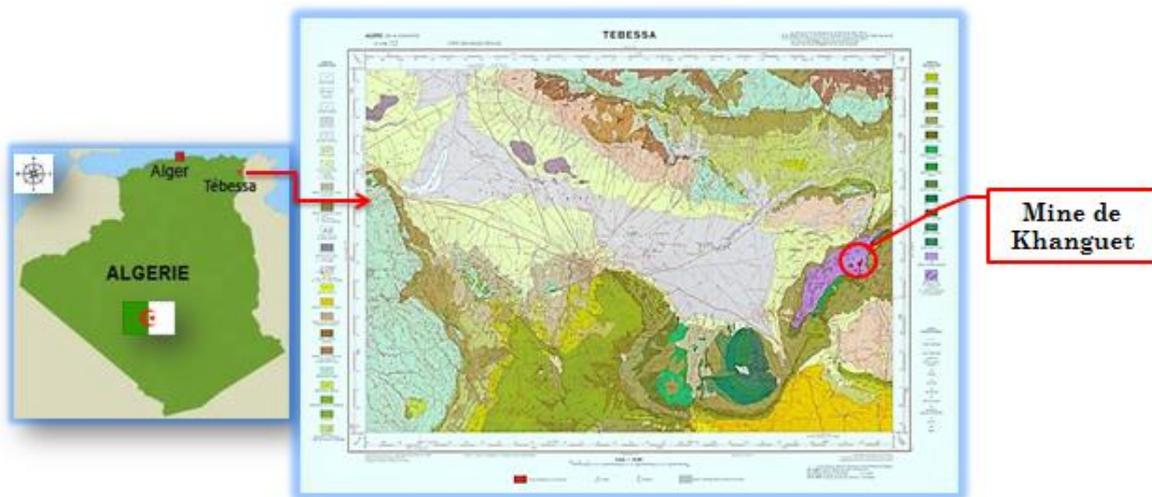


Figure 2.1 : Situation géographique de la mine de Khanguet.

2.2.2. Historique des travaux de recherche et d'exploitation

Les premiers renseignements portant sur le gisement de fer de Khanguet El Mouhad datent de 1904 – 1911 et les premiers travaux d'exploitations ont commencé en 1917 [18]. À partir de 1920 à 1925, des travaux d'évaluation sur le gîte « A » ont été entrepris vraisemblablement par la firme Borg du Mokta laquelle d'ailleurs activait sur la concession du vaste territoire comprenant le Nord Est Algérien et Tunisien. Les réserves étaient estimées, après leur évaluation ; à environ 6 million de Tonnes sans aucune précision sur les différents paramètres pris en considération.

De 1926 à 1929, des travaux miniers par puits, sondages, probablement tranchées et levés Topo-géologiques ont permis une évaluation qui s'élève à 150 000 tonnes uniquement le gîte « B ». Pour les autres corps à savoir « C », « D » et « E » aucune évaluation de tonnage n'a été fournie en plus d'une absence totale de documents de cartographie géologique avec les précisions des localisations des différents ouvrages miniers.

Vers la fin des années cinquante et aux débuts des années soixante, une nouvelle phase de prospection à maille serrée par sondage et fouilles de 25 x 25 m a été menée sur le gîte « A » lequel avait sans doute connu une exploitation intense par téléferique. La phase finale de l'étude du gisement a été entreprise en 1977 – 1979. Des travaux d'évaluation ont été réalisés par les moyens de la mine de l'Ouenza. Un volume de 1204 m³ (31 sondages) pour une prospection évaluation par sondages verticaux et inclinés à maille de 30 X 50 m ont été effectués sur le gîte « D », ainsi qu'une étude géophysique par la méthode magnétométrique à 1/2000 réalisée par les services de la division recherches suivant une maille de 100 X 20 m. le service géologique de la mine de l'Ouenza a dressé une carte géologique à 1/1000 du gîte.

En 1979, des travaux ont été effectués par la division recherche de la SONAREM (Litvinenko) pour la mise en évidence des zones minéralisées perspectives sur le gisement de fer de Khanguet par la méthode combinée des travaux géologiques et géophysique, arrêt des travaux d'exploitations. En 2005, reprise des travaux d'exploitations par SOMIFER. Et en 2008, une campagne de recherche effectuée avec l'office national de recherche géologie et minière ORGM, sur les gîtes : A, B et C. les réserves évalué de 1 143 757,85 Tonnes en

minéral de fer. 2014, une campagne de recherche effectuée avec l'ORGM, sur le gîte « D », la réserve évaluée de 435 279,09 Tonnes en minéral de fer.

2018, une visite de prospection sommaire pour la délimitation des affleurements en minéral de fer non évalués dans la partie orientale du gîte « A₁ » a été entreprise par la direction technique au mois de Mars 2018. Les réserves estimées à 43 646 Tonnes en minéral de fer.

2.2.3. Description et localisation des gîtes de la mine

Le gisement de fer de Khanguet est caractérisé par cinq gîtes minéralisés qui sont : « A », « B », « C », « D » et « E ». Quatre d'entre eux sont rapprochés l'un de l'autre (A, B, C et E) et se trouvent à la distance de 300 à 500 m, le cinquième amas « D » se localise au Nord de ce groupe à 1,5 km environ, dont tous les amas minéralisés du gisement se présentent sous forme de lentilles et de bancs, sont en concordance avec les roches encaissantes [18]. La localisation des gîtes « A », « B », « C » et le stérile franc sont représentés dans la figure 2.2.



Figure 2.2 : Carte de localisation des gîtes de la mine de Khanguet

II.2.3.1. Gîte « A » se divise en deux corps :

- **Corps A₁** : C'est le gîte le plus important, il occupe la partie centrale proprement dite du gisement de Khanguet, il a une forme ovale et s'allonge en direction subméridienne sur 850 m, la largeur étant de 400 m environ (figure 2.3). Cet amas presque horizontal consiste une alternance de lentilles et de couches de minerais à sidérite – hématite riche, de minerais pauvres à sidérite dominante, de sidérite et de marnes.



Figure 2.3 : Vue générale du gîte A₁

- **Corps « A₂ »** : Constitue en réalité la continuité du gîte « A₁ » vers le Sud. La partie la plus riche du corps de minerai se trouve vraisemblablement intercalée entre un corps tantôt très pauvre à teneur en fer total variant de 17 à 27 %, mais plus carbonaté et un autre corps à teneur moyenne en fer total dépassant à peine 40 % (Figure 2.3).



Figure 2.4 : Vue générale du gîte A₂

II.2.3.2. Gîte « B » : Il est constitué d'un amas qui s'étend en direction sub-méridionale sur environ 230 m et une largeur de 120 m. le gîte « B » est analogue au gîte précédent « A » (figure 2.5).



Figure 2.5 : Vue générale du gîte B

2.2.3.3. Gîte « C »

Il est en plan de configuration complexe, situé à 200-300 m à l'Ouest du gîte « B ». Il s'étend sur 430 m de longueur et 280 m de largeur. Il est presque horizontal dans son périmètre, l'amas minéralisé est stratiforme et se localise au sein des marnes de l'assise encaissante (figure 2.6).



Figure 2.6 : Vue générale du gîte C

2.2.3.4. Gîte « D »

Une campagne de recherches a été lancée avec l'ORGM en 2014 pour l'évaluation des réserves du gîte « D », il se présente sous forme d'un corps stratoïde qui s'étend en direction NE sur 420 m de longueur et 205 à 80 m de largeur et repose de façon subhorizontale au contact de l'assise gypsifère avec les sidérites sus-jacentes rapportées à l'Aptien, l'épaisseur du minerai varie de 1,2 à 10 m. Les travaux d'exploration établis par ORGM sur le gîte « D » en 2014, nous ont permis de dégager trois blocs distincts, en se basant sur les coupes combinées géologique-géophysiques :

- **Bloc « DI »**, concerne la masse du minerai la plus importante de notre secteur d'études, qui occupe l'Ouest et le centre de notre gîte qui s'étale sur une longueur de 244,4 m avec une largeur qui varie de 12- 40 m caractérisé par des puissances irrégulières, ce qui nous a amené procéder à la subdivision du bloc principal en trois sous blocs DI₁, DI₂, DI₃ pour faciliter l'estimation des ressources.
- **Bloc « DII »**, il s'agit d'une géométrie lenticulaire composée essentiellement de stades subhorizontales, d'une longueur de 49 m et d'une largeur moyenne de 12 m.
- **Bloc « DIII »**, il s'agit d'un corps de forme lenticulaire situé au nord du secteur étudié composé de stades inclinées à 45°, allongé en direction Est-Ouest, qui s'étale sur 16 m de longueur et de 3.4 de largeur.

Les réserves du gîte (D) sont de l'ordre de 435 279,09 tonnes de minerai de fer avec une teneur moyenne pondérée de 40,48 % de fer total et d'une épaisseur verticale moyenne de 6 m. Ces réserves sont estimées selon les paramètres de surface (tranchées) et de profondeur par 13 sondages.

2.2.3.5. Gîte « E »

Représente dans son ensemble un monoclinale avec un pendage de 45-50° vers le Sud. Il s'allonge en direction Est-Ouest environ sur 680 m, la largeur étant de 40 à 200 m. Cette structure se compose de marnes à sidérite. Dans la partie sub-affleurant de corps, la teneur en fer total en moyenne de 27,3 % et baisse en profondeur à 120-130 m de la surface jusqu'à une valeur de fond 3-4 %.

2.2.4. Climat

Le climat de la zone d'étude est rigoureusement continental, semi-désertique, hiver froid, la neige est rare et fond rapidement, un été chaud, sur l'année la température moyenne à Bekkaria est de 18° C, le minimum absolu enregistré est de - 5° C et le maximum + 48° C. Les précipitations atmosphériques moyennes annuelles sont d'environ 360 mm, des précipitations moyennes de 17.4 mm, le mois de juillet est le plus sec. En septembre, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 46.1 mm. La pluviométrie faible ce qu'explique la pauvreté de la végétation. Sur les versants des collines poussent une rare forêt et le monde animal est rare.

2.3. Stratigraphie de la région de Tébessa

La région de Tébessa fait partie de la structure autochtone Nord-aurésienne de l'atlas saharien [19, 20]. Elle est constituée essentiellement de deux formations :

1. Une formation triasique diapirique disloquant des formations subjacentes au niveau du Djebel Djebissa ;
2. Des formations carbonatées représentées par d'importantes couches calcaires marneuses et de marnes d'âge Crétacé à Tertiaire.

Un important dépôt alluvionnaire Mio-Plio-quadernaire qui repose en discordance avec les formations précédentes et forme ainsi le remplissage de la dépression, actuellement la plaine. Cette formation est observable surtout au piedmont des reliefs accidentés.

2.3.1. Géologie régionale de la wilaya de Tébessa

Une synthèse sur les travaux lithostratigraphiques dans la région de Tébessa a été faite par Salmi-Laouar [21]. Les descriptions essentielles sont présentées comme suit : (figure 2.7 et 2.8).

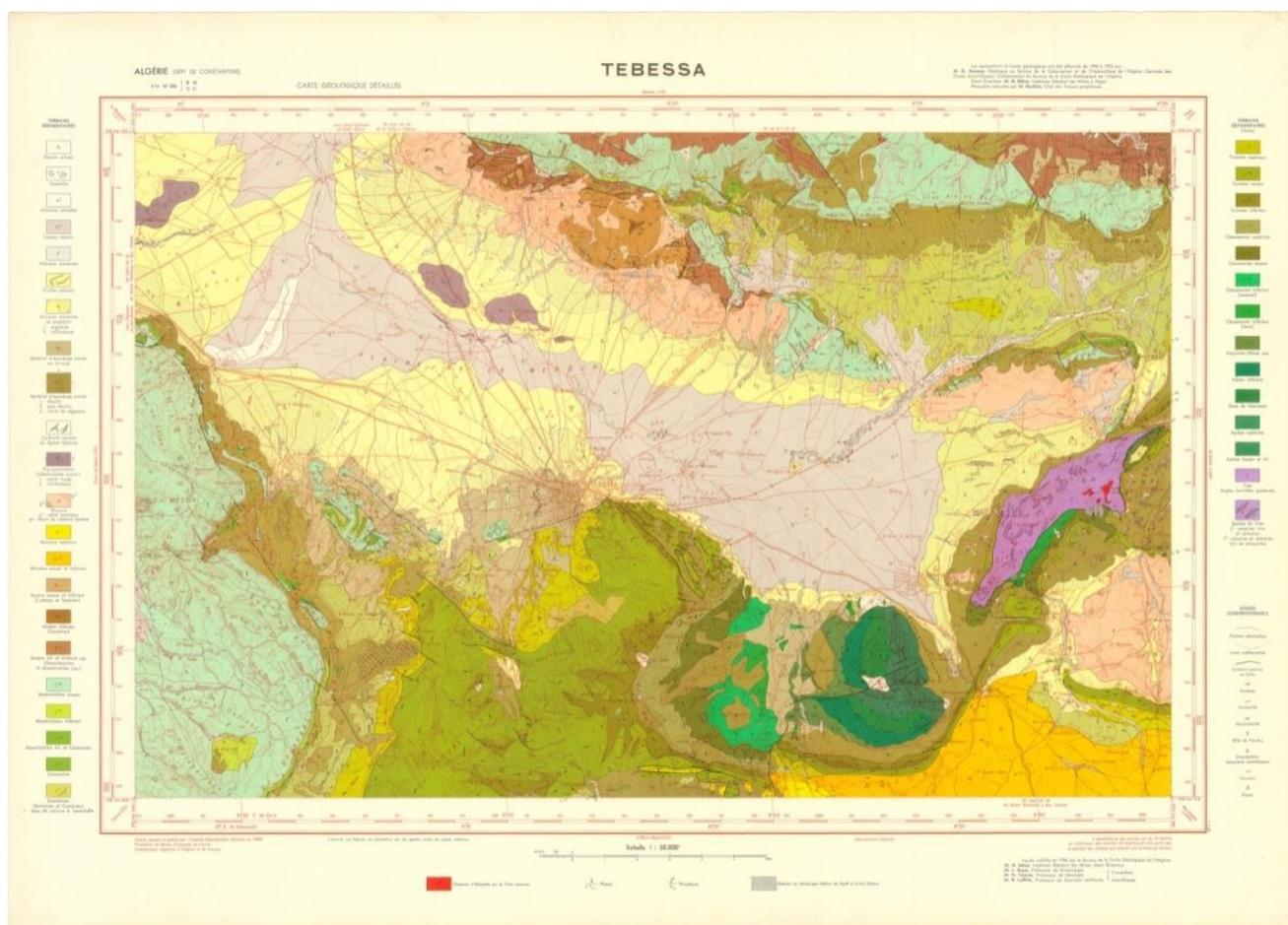


Figure 2.7 : Carte géologique de la wilaya de Tébessa [20].

		Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique		
CENOZOIQUE	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.		
	Néogène	Miocène		⑤ 10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.	
		Eocène		200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.	
	PALÉOZOIQUE	ÉURASIEN	Maest.		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
			Campan.		500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
		MÉSOZOIQUE	Turo Con-Sant.		④ 500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
			Céroman		180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
		CÉNOZOÏQUE	Vracon.		③ 900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
			Albien		② 500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
			Clans		480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
Aptien				100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.	
Barrém.				① 300-600	1- Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2- Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et intercalastes.	
Jurassique				? < 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloula).	
Trias		? < 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.			

Figure 2.8 : Colonne stratigraphique synthétique de la région de Tébessa [23, 24]

2.3.1.1. Trias

La zone de diapirs est le terrain le plus ancien connu de la région de Tébessa appartient au Trias. Celui-ci a été daté par analogie à Djebel Chettaba. Les pointements triasiques qui affleurent dans cette région ont depuis toujours fait l'objet d'une attention particulière, en raison de leur importance pour l'exploration des champs miniers et pétroliers. En Algérie nord orientale et en Tunisie, les nombreux diapirs sont à trias évaporitique sans sel affleurant; toutefois la présence du sel est souvent confirmée en profondeur [25].

La succession lithologique complète du Trias dans la zone des diapirs n'est pas connue avec précision. Cependant, ce dernier garde une composition lithologique assez constante, du moins dans toute la région de Tébessa. Son épaisseur demeure également inconnue mais elle est évaluée à plus de 1000 mètres [26]. Au cours de la période triasique s'est déposée une puissante série de dépôts évaporitique et argilo-gypsifères dans des bassins lagunaires et lacustres [27]. Il s'agit des marnes bariolées à gypse, des dolomies, des calcaires dolomitiques, des grès. Dans la région de Tébessa le Trias affleure sous forme d'extrusions et occupe généralement le cœur des structures anticlinales, avec des récifs à son apex à l'Aptien et à l'Albien [28]. Ces corps triasiques présentent des dimensions variables sous forme de sections elliptiques parfois très étirées, sur une bande orientée Nord-Est – Sud-Ouest sur environ 80

Km. Les affleurements les plus importants sont ceux de l'Ouenza, Djebissa, Mesloula, Boujaber, Boukhadra, Hameimat Sud, Hameimat Nord et bien d'autres massifs.

2.3.1.2. Jurassique

Les dépôts jurassiques sont absents dans la région en question mais ils ont été recoupés par des sondages pétroliers en dehors des zones diapiriques [29].

2.3.1.3. Barrémien

Les seules formations qui se rapportent au Barrémien, affleurent au petit anticlinal de Sidi Embarka au NE de Dj. Ouenza, sur le flanc SW de l'anticlinal de Mesloula et le long de l'oued Batma et au NW de Dehar Mesloula. Ailleurs des mouvements d'effondrements (Boukhadra-Hameimat) et la poussée triasique, empêchent d'observer les sédiments antérieurs à l'Aptien [23].

Les formations barrémiennes sont représentées essentiellement par des marnes grises ou jaunes assez argileuses, à ammonites pyriteuses. Vers le sommet, ces marnes sont intercalées par de minces passées de calcaires noduleux gris clair à patine ocre. Ces formations ne dépassent pas les 250 mètres d'épaisseur. Elles se sont déposées sur un haut fond assez proche de la surface et témoignent des conditions de sédimentation en mer peu profonde. Ces conditions de sédimentation se sont poursuivies jusqu'au début de l'Aptien [29].

2.3.1.4. Aptien

Sur de vastes surfaces, l'Aptien prend dans "la zone des diapirs" de la région de Tébessa une grande importance par la nature de ses dépôts et leur développement substantiel (300 à 600 m d'épaisseur). Il est formé de roches carbonatées néritiques qui se sont déposées dans des eaux chaudes peu profondes. Ces conditions ont favorisé l'essor des processus organogènes de la sédimentation qui a mené à la formation de différentes constructions. À l'Aptien, la mer était plus étendue qu'au Barrémien. Le fait le plus marquant de cette période est la formation des récifs sur des rides allongées [23].

Durant l'Aptien supérieur, la région de Tébessa a connu le développement de nombreuses plates-formes isolées dont l'architecture est contrôlée par des remontées diapiriques. Ce complexe fait partie du domaine des hauts-fonds qui sépare, durant l'Aptien un domaine profond (sillon de Sellaoua) d'un autre très subsident (sillon atlasique oriental). Ces faciès aptiens annoncent une régression fini- aptienne.

La formation aptienne débute par un Aptien essentiellement marneux composé par une alternance de marnes, d'argile, des grés et du calcaire à Gastéropodes, Mollusques et Echinoïdes. Cet Aptien marneux est surmonté par un Aptien calcaire, formé de puissants blocs calcaires à ciment dolomitique, bioclastiques à orbitolines, rudistes et qualifiés de récifaux. Le Clansayésien est composé quant à lui par des marnes grises à jaunes avec des intercalations gréseuses et calcaires [23].

2.3.1.4.1. Aptien marneux

Il est présenté par des gros bancs massifs et épais de calcaires bréchiques à ciment dolomitique, de calcaires graveleux et bioclastiques à Orbitolines et de Mollusques. Parfois, on rencontre des intercalations de quelques niveaux de marnes feuilletées de couleur rouge violacée ou verte. On note la présence de quelques Lamelli branches, de moules internes de Gastéropodes au niveau de Djebel Bouroumane. Cette formation peut atteindre 450 m d'épaisseur [20].

2.3.1.4.2. Aptien calcaire

Il surmonte l'Aptien marneux et renferme le plus souvent des miliolles, des rudistes et des lamellibranches et une abondance de quartz automorphe [30]. L'épaisseur de cette formation varie entre 100 et 170 mètres. Ces calcaires sont considérés comme un métallotecte lithologique puisqu'ils encaissent l'essentiel de la minéralisation ferrifère et/ou polymétallique.

2.3.1.4.3. Clansayésien

Il affleure dans divers anticlinaux de la région, il s'agit des marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux [23]. La formation aptienne présente une épaisseur totale de l'ordre de 700m en moyenne.

2.3.1.5. Albien

Généralement, la formation albiennaise débute par un faciès carbonaté qualifié de «récifal» dans sa partie inférieure et marneux et marno-calcaire dans sa partie moyenne à supérieure. Dans la région de Tébessa, il est marqué par une faune benthique dans des zones peu profondes. À l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évasés, plis en champignon, etc.) Généralement scellées par le Vraconien [25, 31, 32]. Une série monotone de marnes à argiles d'un gris foncé avec passage de calcaires à marnes noires. Sa puissance varie de 20 à 150 mètres.

2.3.1.6. Vraconien

Il est composé généralement par des marnes à intercalation de calcaires argileux et argilites de 500 à 600 mètres d'épaisseur. Il est généralement transgressif dans quelques régions sur le Trias [33] et sur l'Aptien. Avec sa sédimentation marno-argileuse, le Vraconien forme un écran immédiat et un contrôle principal à la minéralisation polymétallique.

2.3.1.7. Cénomaniens : Dans la Région de Tébessa, une série monotone de marnes argileuses verdâtres s'installe au Cénomaniens inférieur. Au Cénomaniens moyen, ces marnes admettent diverses intercalations calcaires peu développées avec une faune plus au moins abondante et de veinules de calcite fibreuse. Au Cénomaniens supérieur, la sédimentation devient carbonatée. L'épaisseur totale de la formation cénomaniennaise est estimée entre 750 et 1100 mètres [23].

La sédimentation cénomanienne s'est déposée dans des conditions abyssales (profondes). Cette époque est caractérisée par des décrochements traduisant un raccourcissement Nord-Est Sud-Ouest [30]. Á l'approche du Turonien, la sédimentation change rapidement en même temps que disparaissent les fossiles. Les marnes argileuses sont remplacées par des couches chargées en carbonate de chaux [23]. La limite supérieure du Céno-manien est difficilement distinguable.

2.3.1.8. Turonien

Il se fait remarquer par son changement rapide de sédimentation vers des calcaires compacts donnant lieu à des reliefs accusés. Le Turonien constitue les flancs des grands anticlinaux et synclinaux et ses formations affleurent également en dehors des zones diapiriques. L'analyse lithologique faite par Salmi-Laouar [24] montre que la partie inférieure du Turonien dans le massif d'Essouabaa, épaisse de 200 mètres environ, est formée d'une série d'alternance stratocroissante de marnes, de calcaire marneux et de calcaires. Les marnes sont parfois argileuses de couleur grisâtre, d'ordre métrique à plurimétrique. L'épaisseur des bancs de calcaires marneux et des calcaires fins micritiques sont aussi d'ordre métrique à plurimétrique. L'étude de la microfaune a livré des sections du genre *Weithenella* et du genre *Hedbergella*. Sachant que ces genres sont très abondants à la limite Céno-manien-Turonien ainsi que dans le Turonien inférieur, l'âge turonien inférieur pour ces niveaux est admis et confirmé.

Á partir du Turonien inférieur, les conditions abyssales qui régnaient, commence à changer vers des conditions de mer chaude moins profonde. Au Turonien supérieur, une mer relativement profonde s'installe avec une accumulation d'une assise marneuse [24]. Ce régime continue jusqu'au Campanien.

2.3.1.9. Campanien-Santonien

Ils ne sont pas subdivisés à cause du manque d'éléments de datation. Ils sont représentés par des marnes argileuses gris verdâtre et jaune gris à plaquettes de calcite fibreuse et intercalation de marnes à lumachelles. Leur puissance varie de 200 à 600 mètres [27].

2.3.1.10. Maestrichtien

Il est marqué par des calcaires blancs bien lités, d'environ 60 mètres d'épaisseur, recouverts par une très forte accumulation de marnes argileuses grises à noires (150 m). Ces dernières admettent à leur base quelques intercalations de calcaires [23].

Le régime sédimentaire au Campanien supérieur et au Maestrichtien, indique toujours la continuité des mêmes conditions de dépôts dans un milieu peu profond et de mer chaude [27] avec une prédominance de calcaires crayeux rarement récifaux.

2.3.1.11. Paléocène

Sa base présente des marnes analogues à celles du Maestrichtien supérieur qui s'intercalent à des couches phosphatées vers les niveaux supérieurs [20].

2.3.1.12. Éocène

Des calcaires à silex et d'autres à Nummulites caractérisent l'Éocène inférieur et moyen, près des périmètres de la région de Tébessa. Leur puissance est de 200 mètres [24].

2.3.1.13. Miocène

Les dépôts du Miocène inférieur et moyen reposent transgressive sur les formations anciennes (Albien-Sénonien et même sur le Trias). Il s'agit d'une puissante accumulation de marnes et de grés dont l'épaisseur peut atteindre dans le bassin de Oulad Soukiès à 1000 m [23, 34]. À leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique [25].

Le remaniement de silex, réputé d'âge Yprésien à la base du Miocène témoigne de l'existence d'une mer éocène où se dépose une sédimentation marine durant l'Éocène et le Miocène inférieur à moyen. La sédimentation à la fin du Miocène indique le début d'une phase de régression. La puissance moyenne du Miocène dans la région d'étude est de 150 m [23].

2.3.1.14. Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont d'origine continentale et sont distribués dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes (plaines et vallées actuelles). Ils sont formés de croûtes calcaires, limons éboulis, cailloutis et poudingues. La puissance du Quaternaire varie entre 10 et 30 m [23]. Les formations lithologiques qui peuvent être distinguées sont les formations actuelles, les formations anciennes et le Plio-Quaternaire.

2.3.2. Géologie du massif de Djebissa

L'ensemble du Djebel Djebissa forme une structure anticlinale orientée Nord-Est, Sud-Ouest. Le cœur de la structure est occupé par des terrains d'âge triasique, d'une largeur variant entre 500-1500 m. cette lame constitue une dépression composée d'une masse argilo-gypseuses avec quelques lambeaux de dolomie. Sur ses flancs la structure est couronnée par des formations du Crétacé Supérieur (Cénomaniens et Turoniens) recouverts parfois par les dépôts Quaternaires [35].

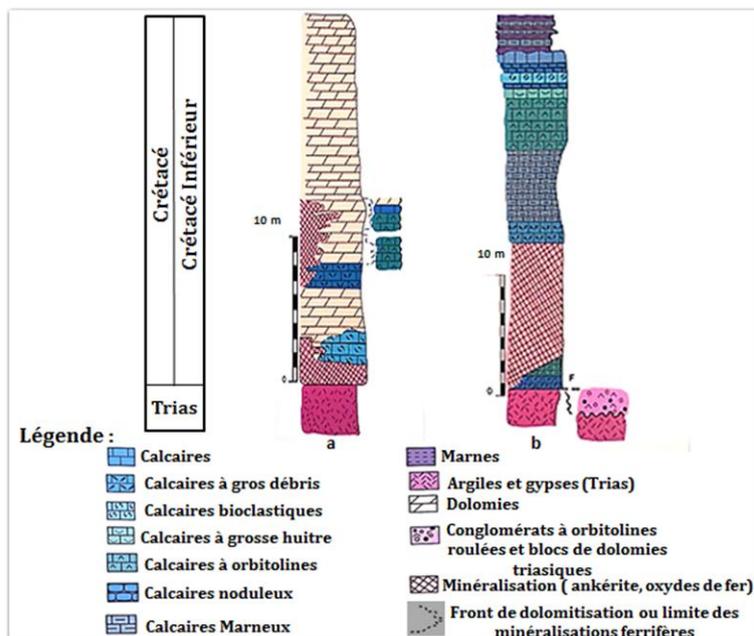


Figure 2.9 : Coupe stratigraphique [36].
a- Djebel Djebissa ; b- Nord Est de Khanguet

2.3.2.1. Trias

Ce sont les plus vieilles roches reconnues et constituées essentiellement par des faciès évaporitiques gypseux et d'argile rougeâtres et barjolés auquel s'ajoutent des îlots de calcaire dolomitiques et dolomies rougeâtres. Le trias occupe le cœur de l'anticlinal (Figure 2.9) [35].

2.3.2.2. Crétacé

2.3.2.2.1. Crétacé inférieur

Les terrains du crétacé inférieur sont représentés par une assise gypsifère, forment les 4/5 de la superficie de la mine, on peut distinguer trois groupe de roches assez individualisés des terrains argilo-gypseux, Carbonatés et terrigènes. La première formation se rapporte à des gypses. Gypse argileux et argiles gypsifère qui se forment essentiellement dans la partie SW de la mine. La deuxième formation se compose de calcaires, marnes, dolomies et sidéroses qui se rencontrent en quantité variable dans les gypses, disposé en concordance avec la direction de l'anticlinal du Djebissa. Dans l'ensemble, les terrains de ce groupe constituent 15 à 20 % du volume de l'assise gypsifère.

2.3.2.2.1.1 Aptien clansayes, Albien Vraconien non séparés

Ce sont les terrains qui encaissent la minéralisation, ils ne sont rencontrés que sur les gites : « A », « C », « E », « D » et à l'extrémité NE du gisement. Sur les gites « A » et « C » l'assise encaissante peut être subdivisée en trois paquets supra-minéralisé, minéralisé et infra-minéralisé. Le paquet infra-minéralisé est essentiellement formé des marnes. Alors que le paquet supra-minéralisé du gite « A » est constitué de sidérose, sur le gite « C » de marne à sidérose. Sur le gite « E », cette assise ne se subdivise pas en paquets et dans l'ensemble, elle représente des marnes à sidéroses (calcaire minéralisé).

A l'extrémité NE du gisement, le paquet constituer de sidérite reposant sur l'assise gypsifère et contenant une petite lentille de minerai à hématite.

2.3.2.2.2. Crétacé supérieur

2.3.2.2.1.1. Cénomanién

Il est présenté par des intercalations de marnes gris-verdâtre et de calcaire organogènes dolomités, dolomies. Ce faciès est caractérisé par un faune abondante.

2.3.2.2.2.2 Turonien

Il est représenté par des calcaires gris clair, compacts en bancs minces et des marno-calcaire en plaquettes, avec une prédominance de calcaires dolomitiques très durs à son sommet.

2.3.2.2.2.3 Pliocène

Les formations du pliocène sont représentées des couche redressées à la verticale et sont constituées par des argiles ocre, rouge et des conglomérats grossiers rougeâtres couonnant la structure anticlinale [20].

2.3.2.3. Quaternaire

Il est constitué par des cailloux anciens, le plus souvent perchés sur les argiles à gypse ou sur les marnes Cénomaniennes, les alluvions et les conglomérats disposées horizontalement sont attribués au quaternaire [20].



Figure 2.10 : Conglomérats du quaternaire à disposition verticale

2.4. Formation et tectonique du Djebel Djebissa

La structure anticlinale du massif de Djebissa est affectée par des accidents cassants et sa stratification normale et simple permet la subdivision lithostratigraphique des roches formant l'anticlinal [20]. Le contact entre les roches gypsifères du Trias et les terrains sus-jacents est de nature tectonique [33]. Le flanc Nord-Ouest est fortement réduit et les couches sont redressées ou verticales sous l'effet des poussées halocinétiques. Les différents types d'accidents sont:

2. 4. 1. Déformations souples

La principale déformation souple est le plissement de la région, ce qui explique la structure anticlinal du Djebel Djebissa, cet anticlinal se raccorde au Nord au synclinal d'Oglet El Rbaib, son axe passe par les crêtes de Djebel Bouroumane avec une direction N40°. Le noyau de l'anticlinal est formé par des dépôts gypsifères du Trias rangés dans les formations du Crétacé inférieur. Les parties Sud-Ouest et Nord-Est sont constituées par des dépôts carbonatés et argilo-carbonatés du Crétacé [20].

2.4.2. Accidents cassants

Les accidents cassants sont peu développés dans cette zone, ceci peut être expliqué partiellement par le large développement de terrains mio-quadernaire qui empêche l'étude directe des terrains anciens. On note tout de même la présence de deux systèmes de failles de direction Nord-Est Sud-Ouest (contrôlant le percement des roches triasiques) et Est-Ouest sur les versants Nord et Sud de Djebel Djebissa. Le fait le plus marquant reste l'existence du fossé d'effondrement de Tébéssa qui influe sur l'aspect tectonique de cette structure (Figure 2.11). Le système d'accident de moindre importance est mis en évidence sur le flanc Nord du pli. Ce sont en général des failles normales à rejet vertical de quelques dizaines de mètres et qui s'allongent en plan sur 200 à 800 m avec un pendage subvertical.

Certains auteurs considèrent le rôle des effondrements par rapport au contrôle de la localisation de la minéralisation comme très important. Durozoy [17] pense que la surrection du Horst de Djebel Bouroumane avait probablement commencé lors des premiers plissements et rejoué tardivement car les grandes failles E-W qui le disloquent recoupent les accidents à la bordure du fossé de Tébéssa.

2.5. Substances utiles et minerais du Djebel Djebissa

Outre le gisement de fer de Khanguet, le Djebel Djebissa, également connu pour ces anciennes mines de Phosphate, de Zinc, du gypse et de plomb (figure 2.11).

2.5.1. Fer : Au sommet du Djebel Djebissa des amas d'hématite ont été un moment exploités. Ils résultent de l'oxydation des carbonates (sidérose) provenant eux-mêmes de la métasomatose des calcaires aptien par des venues minéralisées [17].

2.5.2. Plomb : dans la même région, à Khanguet, une mine de plomb a été également exploitée (filons de galène dans des assises calcaires turoniennes redressées au contact du Trias). Des indices ont donné lieu à des recherches au col de Bekkaria dans les calcaires turoniens. Tous les gisements de plomb sont à présent épuisés. De peu d'importance, ils se situent dans le périmètre de l'anticlinal du Djebissa sur ses plans NE et SE. Les corps de

minéral des gisements sont représentés par des filons rapprochés remplissant de petits accidents tectoniques aux quel se raccordent des fractures également minéralisées dans les calcaire de l'Aptien et de Turonien moyen. L'épaisseur des filons ne dépasse généralement pas 3 m, l'extension en direction varie de plusieurs dizaines à 200 m. Leur direction est d'habitude NE, c'est-à-dire qu'elle est analogue à celle de l'anticlinal. Ils ont un pendage de 70°-90° au SE et NW [34].

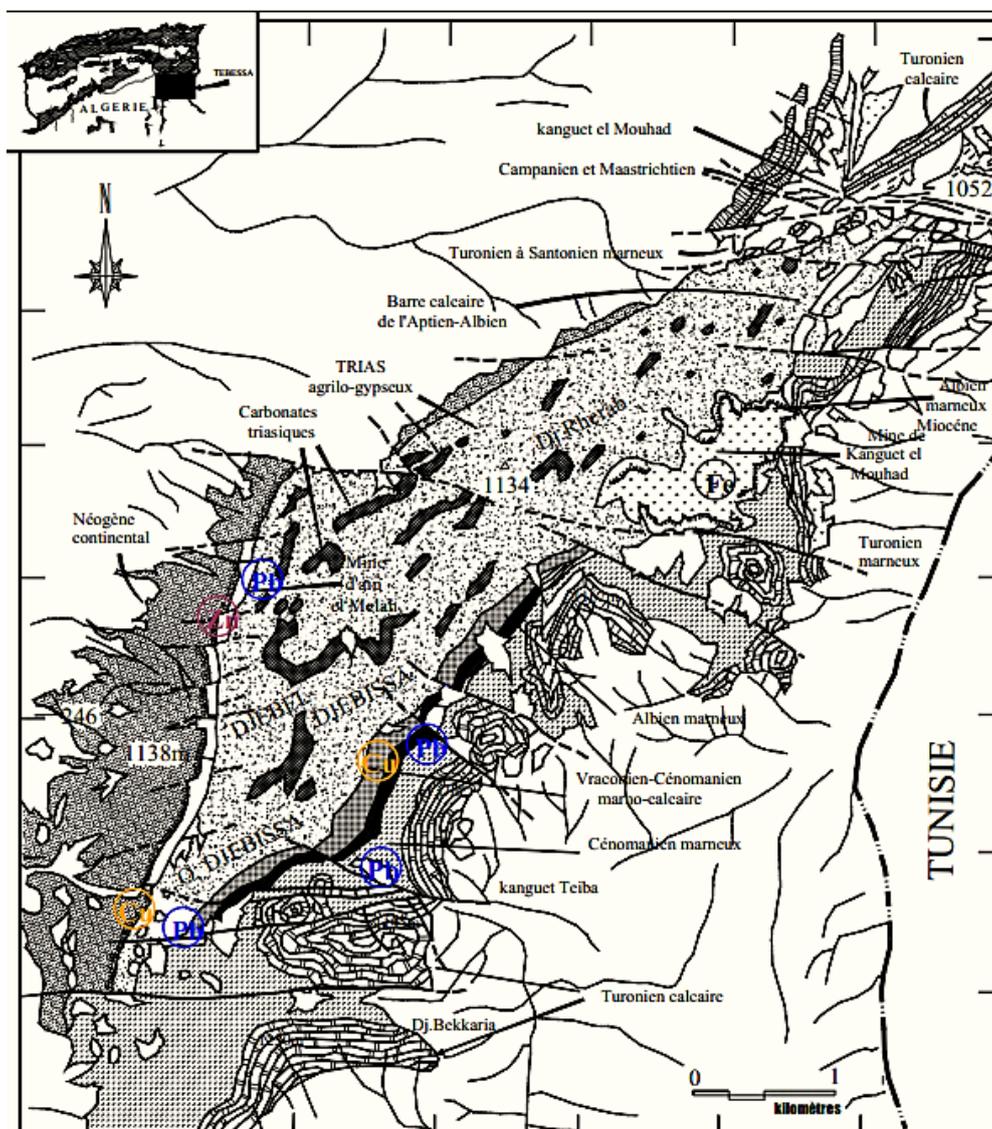


Figure 2. 11: Carte géologique simplifiée du Djebel Djébissa [17, 20]

2.5.3. Gypse : Les gites du gypse relativement pur se rencontrent par endroits au milieu des roches gypsifères du Crétacé inférieur dans le noyau de l'anticlinal du Djébissa, à proximité du gisement de Khanguet. Ici le gypse n'a jamais fait l'objet d'exploitation en outre, les lentilles de gypse font partie des limons récents de la plaine de Tébessa. Auparavant de tels gites ont fait l'objet d'exploitation au NE de Tébessa [35].

2.5.4. Phosphate : Les gisements de phosphates se situent au Nord immédiat de la région de Bekkaria. Auparavant, ils ont fait l'objet d'exploitation locale par carrière. A El-Kouif, le gisement de phosphate est exploité souterrainement. Dans l'ensemble, ils se localisent dans les marnes et les marnes calcaireuses de l'Eocène inférieur, supérieur et constituent un faisceau de

couches rapprochées de phosphates épaisses de 0.6 à 1.7 m à teneur de 48 à 70 % de phosphate [35].

2.5.5. Carrières : Les calcaires turoniens et maestrichtiens ont fourni les matériaux de construction des beaux édifices de l'antique Theveste. Les calcaires turoniens et aptiens sont exploités pour le ballast de chemin de fer et l'empierrement des routes (carrières de Djebel Djoua et du Bou Roumane) [17].

2.6. Formation des gisements

Le long de la frontière Algéro-Tunisienne, un certain nombre de dépôts sont localisés près de diapirs évaporitiques du Trias. Les carbonates de fer (ankérite-sidérite), oxydés partiellement en hématite près de la surface, sont associés généralement à des concentrations de Pb, Zn, Cu, Ba et F. Certains gisements de fer, importants, contiennent de la galène, sphalérite, barytine et fluorine (Ouenza, Boukhadra, Djébessa), alors que certains gisements de Pb-Zn contiennent de faibles concentrations de sidérite (Slata, Bou Jabeur, Mesloula). Les roches les plus réactives aux fluides minéralisateurs sont les dolomies ou les calcaires et les corps minéralisés sont stratiformes, massif ou dans les veines. Les sulfures, la barytine et rarement la fluorine sont associés aux carbonates de fer. L'origine de ces gisements a été attribuée à des fluides magmatiques hydrothermaux ou à des formations sédimentaires syngénétiques (Madre, 1969). Récemment, il a été suggéré que ces gisements ont été formés par la circulation en profondeur des formations en eaux métamorphiques [26, 37].

2.7. Caractères essentiels de la localisation de la minéralisation

Le gisement de Khanguet contient deux gros horizons de la localisation de la minéralisation, cette minéralisation est focalisée au niveau de deux horizons [20] :

- L'horizon inférieur : Il renferme la partie supérieure de l'assise gypsifère du crétacé inférieur, renferme essentiellement des sidéroses ; des minerais à sidérose-hématite sont rare et en quantités réduites.
- L'horizon supérieur (Aptien-Vraconien) : Il encaisse tous les corps minéralisés connus du gisement.

L'association spatiale étroite des minerais et des roches à teneur élevée en fer (sidérose et marnes) observée sur le gisement ne semble pas être accidentelle. Elle est due aux particularités et conditions de formation communes des minerais et des roches. Le gisement se trouve localisé dans la zone d'une grande faille Nord-Est qui passe dans la partie centrale de l'anticlinal de Djebissa. Tous les amas minéralisés sont encaissés dans le même horizon stratigraphique, dans la même assise minéralisée rapportée à l'Aptien-Vraconien non séparés. Dans l'ensemble, les roches de l'assise encaissant la minéralisation ont une composition argilo-carbonatée et dans les limites du gisement, on observe une variation régulière de la concentration du fer dans l'assise minéralisée et en tenant compte aussi bien du minerai que des roches encaissantes. Cette concentration est plus élevée sur le gîte « A ».

Vers le Sud-Ouest des gites « C » et « E » et le Nord gîte « D » la concentration du fer baisse graduellement. Il est important de souligner qu'aux niveaux profonds du gîte « E », la concentration du fer descend pratiquement jusqu'à la valeur de fond diminue de 8 fois environ par rapport à la surface, mais la composition des roches ne change pas. Le gîte est constitué de marnes. Ceci est la preuve que la formation des roches à haute teneur en fer et des minerais

de fer a été déterminée par d'autres facteurs indépendants des conditions de la sédimentation. Les zones minéralisées de tous les amas (excepté l'amas E) représentent les niveaux d'alternance fréquente des bancs et des lentilles de minerai de fer, de sidéroses et de marnes. Parfois les sidéroses passent en direction à des minerais et inversent. Ce sont des minerais de composition mixte, à hématite et sidérite. Toutes les variétés se rencontrent, à partir des minerais à sidérite jusqu'aux minerais constitués d'hématite presque pure.

Dans les terrains gypsifères du crétacé inférieur qui supportent l'assise encaissant la minéralisation, les sidérites sont des roches banales ; parfois, des minerais à hématite se rencontrent également sous forme de corps très petits [38].

2.8. Travaux d'exploitation de la mine de Khanguet

2.8.1. Méthode d'exploitation

La méthode d'exploitation adaptée d'après les conditions géologiques et minière des gites est la méthode d'exploitation sélective à pelle mécanique sans recourir plus souvent à l'extraction aux explosifs à fin de diminuer le salissage du minerai de fer. La figure 2.12 représente les étapes essentielles de l'exploitation du minerai de fer de Khanguet à ciel ouvert.

2.8.1.1. Cycle d'exploitation est comme suit

- Décapage de la couche stérile à aide des bulls ;
- Fraction sera effectuée par marteau perforation ;
- Extraction du minerai par pelles mécanique ;
- Chargement de la masse rocheuse à l'aide des pelles et chargeuses sur pneus ;
- Transport du minerai à la plateforme de stockage et le stérile jusqu'au terril, il est effectué à l'aide des camions à bennes ;

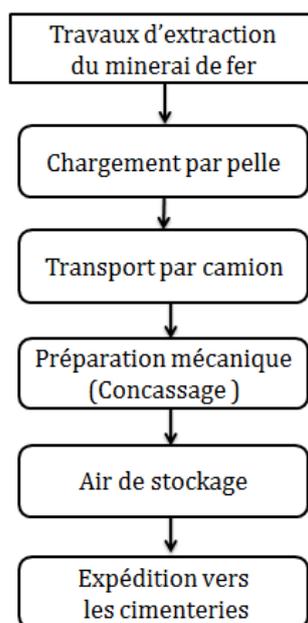


Figure 2.12: Schéma technologique d'extraction et de préparation mécanique du minerai de Khanguet.

2.8.1. 2. Paramètres principaux de l'exploitation sont

- Hauteur moyenne du gradin : 3 - 6 m ;
- Angle de talus est de 30° à 40° ;
- Largeur moyenne de la plateforme de travail est de 20 m.



Figure 2.13: Station de concassage mobile de la mine de Khanguet

2.8.2. Positionnement des gites de la mine par rapport aux différentes décharges

Cette mine inclut cinq gites minéralisés : Quatre d'entre eux sont rapprochés l'une de l'autre (A, B, C et E), le cinquième gite « D » se localise au Nord de ce groupe à 1,5 km environ. Actuellement, seuls les gites A et C font l'objet des travaux d'exploitation. Les distances qui séparent les gites et les zones de stockage sont représentées dans la figure 2.14.

- Distance entre la mine et la zone de stockage : 9 Km ;
- Distance moyenne entre le gite « A » et la zone de décharge 2 : 350 m ;
- Distance moyenne entre le gite « A » et la zone de décharge 3 : 400 m ;
- Distance moyenne entre le gite « A » et la zone de décharge 4 : 460 m ;
- Distance moyenne entre le gite « B » et la zone de décharge 2 : 400 m ;
- Distance moyenne entre le gite « B » et la zone de décharge 3 : 300 m ;
- Distance moyenne entre le gite « B » et la zone de décharge 4 : 450 m ;
- Distance moyenne entre le gite « A » et le gite « B » : 550 m ;
- Distance moyenne entre le gite « A » et le gite « C » : 700 m ;
- Distance moyenne entre le gite « B » et le gite « C » : 250 m ;
- Distance moyenne entre le gite « C » et le gite « E » : 640 m ;
- Distance moyenne entre le gite « D » et les gites « A », « B », « C » et « E » : 1500 m.

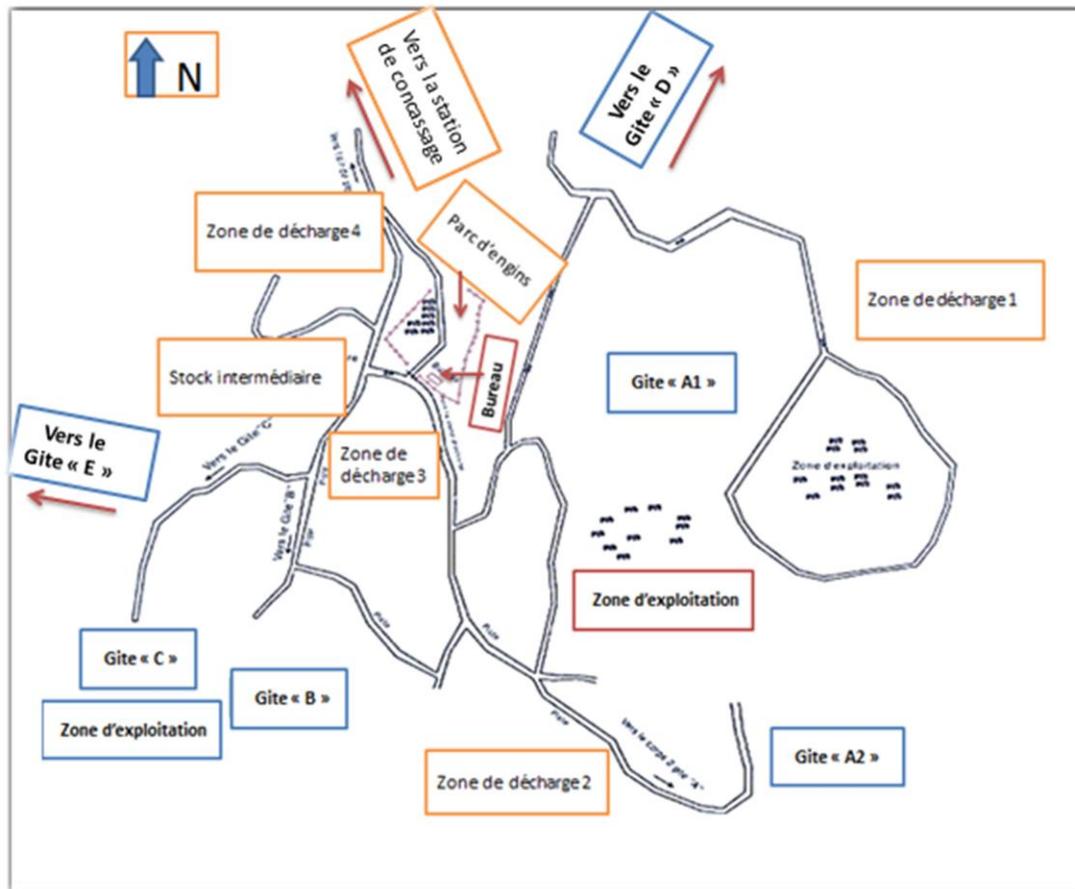


Figure 2.14 : Représentation schématique du positionnement des gites et le plan de circulation.

2.9. Conclusion

La mine de Khanguet est l'une des plus anciennes mines en Algérie, son minerai est pauvre en substance utile, il est utilisé jusqu'à aujourd'hui comme adjuvant dans les cimenteries de l'Est Algérien. Tous les gites minéralisés du gisement se présentent sous forme de lentilles et de bancs, sont en concordance avec les roches encaissantes, la minéralisation est dans une assise argilo-carbonatée d'Aptien-Vraconien indifférenciée qui recouvre en concordance les dépôts gypsifères du crétacé inférieur.

On connaît sur la mine cinq gites minéralisés : Quatre d'entre eux sont rapprochés l'un de l'autre (A, B, C et E) et se trouvent à la distance de 300- 500 m, le cinquième gite « D » se localise au Nord de ce groupe à 1,5 km environ, actuellement, seuls les gites A et C font l'objet des travaux d'exploitation.

Gite « A » : C'est le plus important du gisement, en plan il a une forme ovale, s'allonge en direction subméridienne sur 850 m, la largeur étant de 400 m. L'assise encaissant la minéralisation peut être subdivisée en 3 termes : paquet infra-minéralisé, paquet minéralisé et paquet supra-minéralisé.

Gite « B » : Situé au Sud-Ouest du gite « A », à une distance de 200 m seulement, étant le plus petit par rapport aux autres. De configuration ovale dans le plan, il s'allonge en direction NE sur 210 m avec une largeur de 120 m. Il est constitué de minerai à sidérose-

hématite. Le recouvrement n'existe pas car il a été complètement détruit par l'érosion. L'épaisseur du gîte constitue assez souvent 4 à 6 m.

Gîte « C » : S'étend sur 430 m de long et 280 m de large et agit presque horizontalement, il est stratiforme et se localise au sein des marnes de l'assise encaissante, la puissance moyenne de l'amas minéralisé varie de 3.1 à 5.1 m.

Gîte « E » : Représente dans son ensemble un monoclinale avec un pendage de 45 – 50° vers le Sud. Il s'allonge en direction Est-Ouest environ sur 680 m, la largeur étant 40 à 200 m. Cette structure se compose de marnes à sidérite et une fine imprégnation d'hématite de peu d'intérêt.

Gîte « D » : Se présente également sous forme d'un corps stratoïde qui s'étend en direction Nord-Est sur 420 m de long et 25 à 80 m de large et repose de façon subhorizontale au contact de l'assise gypsifère avec les sidérites sus-jacentes rapportées à Aptien. L'épaisseur du corps minéralisé varie de 1 à 10 m.

CHAPITRE 3

**Recherche bibliographique sur le traitement du minerai
de fer oxydé**

3.1. Introduction

Les minerais sont des formations minérales naturelles de la croûte terrestre d'origine inorganique et organique de propriétés physiques et chimiques qui permettent leur utilisation dans plusieurs industries (lourde et légère). Selon leurs propriétés physiques on distingue les minéraux gazeux (combustibles naturels et gaz inertes), liquides (eau minéralisée et le pétrole) solides (minerai, métallique et non métallique...etc.).

La composition minéralogique et chimique du minerai caractérise la teneur en composants minéraux utiles, ainsi qu'en gangue. Les données relatives à la composition chimique d'un minerai servent de base pour déterminer le procédé de son traitement. La composition minéralogique du minerai a un impact significatif sur le choix des méthodes et des indicateurs technologiques d'enrichissement. Pour déterminer la composition minéralogique du minerai, on utilise des méthodes d'analyse macroscopiques (MO, MEB) et la diffraction des rayons X.

D'une manière générale, les minerais extraits des mines ne peuvent pas être utilisés directement dans l'industrie, ils ne répondent pas aux exigences de qualité. Leur traitement est nécessaire afin d'améliorer la teneur en substance utile.

3.2. Différentes méthodes de la valorisation des ressources minérales

La minéralurgie est définie comme l'ensemble des procédés par lesquels un minerai brut extrait d'une mine est traité. La séparation en question peut être réalisée en utilisant des méthodes différentes, tel que la séparation gravimétrique, physico-chimique, (flottation), magnétique et électrostatique [39]. Les principaux processus d'enrichissement comprennent les processus physiques et physico-chimiques de séparation des minéraux, dans lesquels les minéraux utiles sont libérés dans des concentrés et les stériles dans des résidus.

3.2.1. Méthodes de séparation magnétique : C'est une méthode de séparation des minéraux dans un champ magnétique basée sur la différence des propriétés magnétiques des particules à séparer, la susceptibilité magnétique est une valeur qui caractérise les propriétés magnétiques des minéraux et la propriété qui détermine son comportement dans un champ magnétique.

3.2.1.1. Bases théoriques de la séparation magnétique

La séparation magnétique est l'une des principales techniques de séparation physique utilisées dans la valorisation des minéraux. Cette technique vise généralement à séparer fortement les minéraux magnétiques (ferromagnétiques) des moins magnétiques (paramagnétiques) et non magnétiques (diamagnétiques) en appliquant différentes intensités de champ magnétique. Généralement, adopté pour les minerais de fer, manganèse, phosphate, titane, chrome, tungstène, molybdène, nickel, bauxite et niobium-tantale [40]. La technique repose sur le comportement différent des particules minérales individuelles sous l'influence d'un champ magnétique. Le principe de fonctionnement de cette méthode est simple, lorsqu'un flux de particules de minerai traverse un champ de force magnétique, les particules magnétiques sont attirées vers la source de la force magnétique tandis que les particules non magnétiques ne sont pas attirées [41].

Les machines utilisées pour la séparation magnétique sont appelées séparateurs magnétiques. Le principe de fonctionnement d'un séparateur magnétique est schématisé par la figure 3.1. Lorsqu'un flux de particules de minerai traverse en continu un champ magnétique force, les particules magnétiques sont attirées vers la source de force magnétique tandis que les éléments non magnétiques ne sont pas attirés [42]. La séparateur magnétique utilise la force d'un champ magnétique pour produire un différentiel mouvement de particules minérales à travers un champ magnétique; cela et le fondamental les différences de sensibilité magnétique des minéraux constituent la base de la séparation pour obtenir efficacement la purification ou la concentration de produits minéraux. Dans de plus, les séparateurs magnétiques sont largement utilisés comme dispositifs pour protéger le traitement équipements tels que broyeurs, mélangeurs, convoyeurs et cribles, par l'élimination des déchets fer qui a pénétré par inadvertance dans la matière première et pourrait être dommageable si pas supprimé [43].

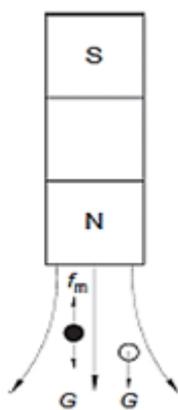


Figure 3.1 : Séparation magnétique entre billes de fer et de céramique. ● : boule de fer, ○ : boule en céramique, S : pôle sud de l'aimant, N : pôle nord de l'aimant, f_m : force magnétique, G : force de gravité [44].

3.2.1.2. Relation entre l'induction et l'intensité du champ magnétique

Induction du champ magnétique est une valeur vectorielle, qui est une force caractéristique du champ magnétique (son effet sur les particules chargées ou sur les corps à moment magnétique). L'induction du champ magnétique est marquée par la lettre B et est mesurée en Tesla (T) dans les systèmes SI.

L'intensité du champ magnétique (H) est une valeur vectorielle supplémentaire, qui est une caractéristique quantitative du champ magnétique. L'intensité du champ magnétique ne dépend pas des propriétés magnétiques du milieu. Par conséquent, dans le vide et dans d'autres milieux sans propriétés magnétiques, la tension est directement proportionnelle à la valeur de l'induction du champ magnétique. Dans le vide et les autres milieux non magnétiques, l'intensité et l'induction du champ magnétique peuvent être utilisées pour quantifier la puissance du champ magnétique. L'intensité du champ magnétique est désignée par la lettre H et elle est mesurée dans les systèmes SI en A/m.

La susceptibilité magnétique (volumétrique) du milieu ou de la substance indique de quelle valeur la perméabilité magnétique du milieu ou de la substance change par rapport au

vide. Le traitement magnétique des minéraux s'effectue dans l'air et dans l'eau. Les propriétés magnétiques de ces supports sont donc intéressantes :

- La susceptibilité magnétique volumétrique de l'air et de l'eau est égale à $0,37 \cdot 10^{-6}$ et $- 9 \cdot 10^{-6}$ respectivement ;
- La perméabilité magnétique peut être calculée par la formule suivante :

$$\mu = 1 + \chi \dots \dots \dots (1)$$

Où : χ - susceptibilité magnétique (volumétrique), fraction d'unité. La perméabilité magnétique de l'air et de l'eau est égale à 1,00000037 et 0,999991 respectivement.

On distingue plusieurs types de magnétismes, selon la valeur de la susceptibilité magnétique on peut distinguer quatre cas:

- **Négative**, on dit que le corps dans lequel apparaît l'aimantation est diamagnétique ;
- **Nul**, on a du vide ($0 < \mu < 1$) ;
- **Positive**, le corps est dit paramagnétique ($\mu > 1$) ;
- **Positive et très élevé**, le corps paramagnétique est dit ferromagnétique ;
- ✓ (χ_m) : Susceptibilité magnétique (sans unité).
- ✓ μ : Perméabilité du matériau (N/A²).

Tableau 3.1: Susceptibilité magnétique de quelques minéraux [41].
(a) Susceptibilité volumétrique ; (b) Susceptibilité spécifique.

Minéral	Susceptibilité magnétique (χ_m)	Minéral	Susceptibilité magnétique (χ_m)
Magnétite	0.12 – 3.07 (a)	Quartz	$1.75 - 4.38 \times 10^{-4}$ (a)
Sidérite	8.4×10^{-4}	Ilménite	1.5×10^{-3} (a)
Hématite	$0.11 - 1.1 \times 10^{-3}$ (a)	Mica, transparent	$0.8 - 1.2 \times 10^{-5}$ (a)
Limonite	$7 - 8 \times 10^{-4}$ (a)	Saphire	5.7×10^{-6} (a)
Pyrite	$0.2 - 1.5 \times 10^{-4}$ (a)	Topaze	4.2×10^{-7} (b)
Pyrolusite	$6.2 - 7 \times 10^{-4}$ (a)	Corindon	3.4×10^{-7} (b)
Cobaltite	5.8×10^{-6} (a)	Galène	$- 3.5 \times 10^{-7}$ (b)
Augite	2.66×10^{-5}	Blende	-2.64×10^{-7} (b)
Dolomite	1×10^{-6} (b)	Fluorite	-2.85×10^{-7} (b)
Chalcopyrite	8.5×10^{-7} (b)	Aragonite	-3.92×10^{-7}
Apatite	2.64×10^{-6} (b)	Calcite	-3.63×10^{-7}
Spinel	0.2×10^{-7} (b)	Zircon	-1.7×10^{-7}

L'induction du champ magnétique est liée à l'intensité du champ magnétique par le rapport :

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H} \dots \dots \dots (2)$$

Où :

- **B** et **H** : induction et tension du champ magnétique, Tl et A/m respectivement ;
- μ : perméabilité magnétique du milieu (relative) ;
- μ_0 : perméabilité magnétique du vide ou constante magnétique, H/m.

- Dans l'air et l'eau (en prenant $\mu=1$), l'induction et l'intensité du champ magnétique seront liées par le rapport :

$$\mathbf{B}=\mu_0\mathbf{H} \dots\dots\dots(3)$$

La valeur de μ_0 est une constante et sert à passer des unités d'intensité de champ magnétique aux unités d'induction de champ magnétique dans le vide, l'air, l'eau et d'autres milieux à partir de $\mu\sim 1$.

L'induction ou l'intensité magnétique des séparateurs magnétiques est une caractéristique d'identification des séparateurs magnétiques, à l'aide de laquelle il est possible d'estimer l'intensité du champ magnétique et l'applicabilité du séparateur pour l'enrichissement du minerai (séparation minérale) avec des propriétés magnétiques spécifiques. Le champ magnétique peut être fourni par un aimant permanent ou par l'excitation d'une ou plusieurs bobines. La force magnétique agissante sur une particule peut être calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\mathbf{F}_m= m. \chi_0 .\mu_0. \mathbf{H} \text{ grad } (\mathbf{H}) \dots\dots\dots(4)$$

Où :

- \mathbf{F}_m : Force magnétique agissant sur une particule (Newton) ;
- m : Masse de la particule (kg) ;
- χ_0 : Susceptibilité magnétique de la particule (m^3/kg) ;
- μ_0 : Perméabilité d'un vide, $\mu_0 = 4.10^{-7}$ (H / m) ;
- $\text{grad } (\mathbf{H})$: Gradient de champ magnétique, $\text{grad } (\mathbf{H}) = (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) / \Delta L, \Delta L \rightarrow 0$ (A/m^2) ;
- ΔL : Distance entre deux points quelconques du champ magnétique ;
- \mathbf{H} : Intensité du champ magnétique (A / m).

3.2.1.3. Attraction magnétique relative : L'attraction magnétique est classée en trois groupes, respectivement :

- Matériaux fortement magnétiques identifiés comme ferromagnétiques;
- Matériau faiblement magnétique comme paramagnétique;
- Matériaux non magnétiques comme diamagnétiques ;

Alors que l'attraction magnétique des particules minérales est la principale considération dans la séparation magnétique, il y a aussi des aspects pratiques à prendre en compte ainsi, afin d'obtenir la séparation souhaitée. Ce sont la taille et la gravité spécifique des particules, qui nécessiteront un champ magnétique relativement plus fort pour éliminer une grosse particule lourde que ce ne serait nécessaire pour une petite particule légère. La pureté des grains minéraux est également importante, et une particule qui est essentiellement exempte de gangue diamagnétique peut être collectée avec un champ de faible intensité, tandis qu'une particule minéralisée diluée avec une forte non magnétique gangue aurait besoin d'un champ beaucoup plus fort

3.2.1.4. Types de séparateur magnétique

La séparation magnétique des minerais est effectuée en mode sec et humide, chaque mode est classé en séparateurs à faible et haute intensité, chaque mode à ces avantages et inconvénients. La sélection des techniques de séparation magnétique dépend de nombreux facteurs, tels que la texture des minéraux, la taille des particules libérées et leur susceptibilité magnétique correspondante, en plus de la production, le marketing et les questions écologiques.

3.2.1.4.1. Séparateurs magnétique à basse intensité (SMBI)

Ils sont utilisés pour traiter certains minéraux hautement paramagnétiques et les minéraux ferromagnétiques (figure 3.2). La séparation magnétique à sec est appliquée sur la base d'un certain nombre de raisons telles que : la disponibilité locale d'eau, le coût du séchage, les demandes des clients et des problèmes environnementaux en constante évolution. Avec les méthodes secs doivent également être prises pour assurer le contrôle du risque de poussière, une précaution coûteuse tant en capital qu'en coûts d'exploitation. De plus, les séparateurs à sec ont des débits considérablement inférieurs que les machines humides. Les séparateurs à sec donnent souvent une excellente séparation de matériaux plus gros que 75 μm . D'autre part, sur un matériau non dimensionné contenant de grandes portions de fines, le procédé humide est la seule acceptable [45]. Séparateur à sec est plus utilisé pour matériau grossier et fortement magnétique et pour protéger les équipements de traitement élimination de ferraille. Donc, le même équipement, qui peut être utilisé pour le brut la concentration de magnétite grossière de la roche gangue de silice non magnétique, peut également être utilisé pour protéger un concasseur d'une dent de godet de pelle mécanique en acier non écrasable qui s'est rompu et s'est mélangé au minerai.

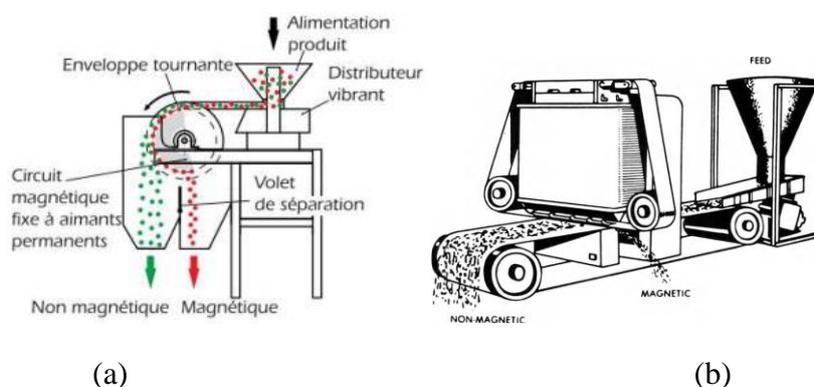


Figure 3.2: a. Séparateur magnétique à base intensité en voie sèche à tambour, b. Séparateur magnétique croisé [46].

Les séparateurs humides sont utilisés pour séparer les matériaux fortement magnétiques finement broyés, le milieu plus dense contenant les petites particules sont actionnées individuellement par le champ magnétique. Comme la plupart des valeurs minérales sont aussi des fins cristaux granuleux qui nécessitent un broyage important et un broyage fin pour être libérés, les séparateurs humides sont généralement la dernière étape de la séparation magnétique pour avoir un concentré magnétique final et un résidu non magnétique. Les séparateurs magnétiques humides à tambour sont utilisés pour concentrer des matériaux magnétiques et il existe trois types de base. Ils sont représentés dans la figure 3.3.

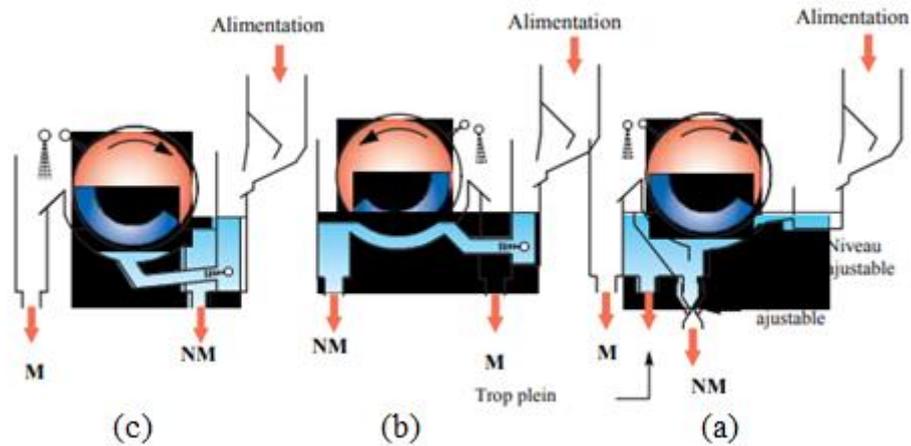


Figure 3.3 : Séparateurs magnétiques à tambour humide. **(a)** : séparateurs à courant parallèle, la pulpe circule dans le même sens que la rotation du tambour ; **(b)** : séparateurs à contre-rotation, la pulpe circule dans le sens contraire de la rotation du tambour ; **(c)** : séparateurs à contre-courant, Ce système est un mixage des deux précédents.

Le principe général de fonctionnement pour les trois types est essentiellement le même, qu'une pulpe d'alimentation de solides et d'eau est introduite dans un réservoir relativement étanche dans lequel se trouve un tambour métallique non magnétique rotatif, à permanence stationnaire ou électroaimant à l'intérieur. Les particules magnétiques sont attirées par l'aimant et maintenues contre le tambour en rotation, tandis que les non magnétiques ne sont pas attirés et passent avec le débordement de la pulpe. Lorsque le tambour sort du réservoir et s'éloigne des aimants et leur champ magnétique, les particules magnétiques ne sont plus tenues par le tambour et sont éliminées par un grattoir ou de l'eau de lavage comme produit concentré [47].

3.2.1.4.2. Séparateurs magnétique à haute intensité (SMHI)

La technologie de la séparation magnétique à haute intensité en voie sèche (rotor induit) existe depuis le début du XXe siècle et les perfectionnements ont essentiellement porté sur la forme des pièces polaires, la conception du rotor (denture et rigidité), afin de diminuer la flèche du rotor due aux forces magnétiques importantes mises en jeu. Dans les séparateurs magnétiques à haute intensité, le champ magnétique est généré par :

- un électroaimant ou circuit magnétique conventionnel, qui est composé d'une ou de plusieurs bobines en cuivre résistif entourant un noyau de fer doux. Ces systèmes magnétiques conventionnels sont capables de créer un champ magnétique d'environ 1600 kA/m pour une consommation énergétique comprise entre 0,5 et 2,5 kWh par tonne traitée.
- un aimant permanent à forte énergie spécifique (BH) et à grande résistance à la démagnétisation [48].

Les séparateurs magnétiques à haute intensité en voie sèche par extraction sont principalement les séparateurs à bandes transversales et à disques (figure 3.4). Ils sont équipés d'une bande convoyeuse passant entre les deux pôles d'un électroaimant (entrefer) et soit d'une bande se déplaçant sur la pièce polaire supérieure et transversalement à la bande principale, soit d'un disque denté tournant au-dessus. L'alimentation du minerai se fait en couche mince (1 à 1,5 mm) sur la bande convoyeuse. Les éléments magnétiques passant dans le système sont attirés par la pièce polaire supérieure et évacués sur le côté par la bande

transversale ou le disque. Ces appareils sont utilisés pour traiter des substances telles que la chromite, l'ilménite, la monazite, le wolframite, les produits pharmaceutiques ou chimiques, les céramiques, etc.

Par contre, les séparateurs magnétiques à haute intensité en voie sèche travaillant par déviation comportent un rotor denté tournant entre les pièces polaires d'un circuit magnétique. Celui-ci comprend, dans sa conception de base, une culasse magnétique avec un noyau magnétique et une ou deux bobines d'électroaimant entourant ce dernier. Les pôles magnétiques ou pièces polaires, entre lesquelles tourne le rotor soumis à une induction magnétique, peuvent avoir diverses formes (plan incliné ou vertical). La séparation a lieu dans l'intervalle (entrefer) réglable situé entre les pièces polaires avant et le rotor formant un contre-pôle. Le rotor est constitué d'un assemblage de minces tôles en métal allié, isolées les unes des autres de manière à former des arêtes rectangulaires, triangulaires ou trapézoïdales, donc des nervures, des dents ou des filets.

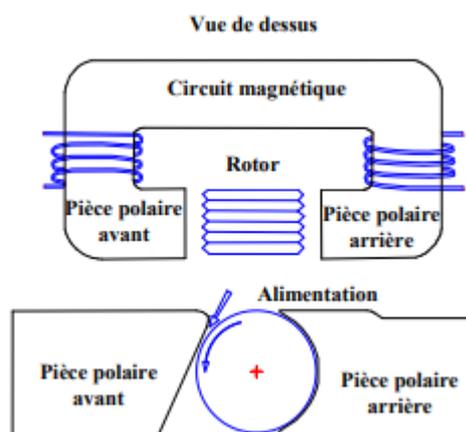


Figure 3.4 : Séparateur magnétique à haute intensité en voie sèche à rotor induit

3.2.2. Méthode de séparation électrostatique

Les séparateurs électrostatiques dépendent du principe que si deux corps sont chargés de la même façon ils se repoussent, s'ils sont chargés de façon opposée, ils s'attirent. Si un mélange de conducteurs et de non conducteurs est alimenté sur une surface conductrice très chargée, les bons conducteurs reçoivent immédiatement une charge similaire à celle de la surface et sont repoussés, tandis que les non conducteurs ne sont pas aussi prêts à recevoir une charge et continuent à adhérer. Ceci est généralement accompli avec un séparateur de type rotor, qui est mis à la terre et potentiel positif (+), dans le champ électrique d'un grand potentiel négatif unique (-) électrode, les particules d'alimentation se déversant sur le rouleau rotatif, se développant rapidement une charge de surface par induction. Les particules qui sont les meilleurs conducteurs acquièrent le même potentiel que le rotor (+) et sera ensuite éloigné de celui-ci vers l'électrode (-). Alors que les particules non conductrices, moins sujettes à prendre une charge, adhèrent à la surface du rotor jusqu'à ce que le rotor tourne suffisamment pour que la gravité rende les particules tombent [43].

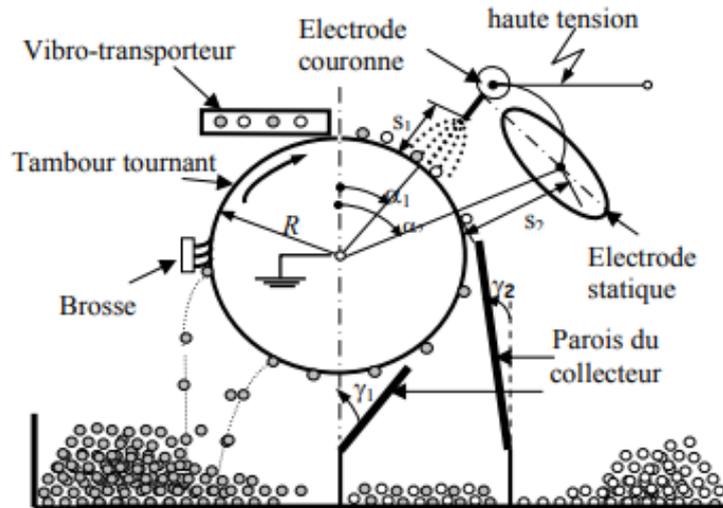


Figure 3.5 : Séparateur électrostatique à effet corona [49].

3.2.2.1 Principe du procédé de la séparation électrostatique

Le mélange particulaire à séparer est acheminé sur la surface du tambour et traverse le champ électrique, les particules sont chargées artificiellement à l'aide d'un courant électrique établi entre une électrode corona et le tambour en mouvement de rotation mise à la terre. L'électrode corona est disposée parallèlement à la largeur du tambour [50]. L'électrode corona émet des ions, généralement des électrons. À sa proximité, les gaz s'ionisent du même signe que les électrons, puis se dirigent vers le tambour. Les particules qui sont transportées par le tambour en rotation sont toutes chargées négativement par les gaz ionisés. Le comportement du mouvement des particules est différent en raison de leur extrême différence de conductivité électrique, qui fournit une excellente condition pour la mise en œuvre de la séparation électrostatique à effet corona [51]. Pour les particules conductrices, aussitôt acquise la charge est perdue au profit du tambour relié à la terre. Elles sont collectées dans la partie droite du collecteur. Pour les particules non conductrices, la charge acquise est retenue, restent collées à la surface du tambour, elles tombent dans la partie gauche du collecteur. Une brosse est nécessaire pour retirer certaines particules non conductrices du tambour en rotation. (Figure 3.5).

3.2.3. Méthode de séparation physico-chimique (Flottation)

La flottation est sans aucun doute la plus importante et la plus polyvalente technique de séparation des minéraux, ainsi que son utilisation et son application sont continuellement élargis pour traiter des tonnages plus importants et couvrir de nouveaux domaines [52]. Théoriquement, la flottation peut être appliquée à tout mélange de particules qui sont essentiellement libres les uns des autres, et sont suffisamment petits et légers pour être soulevés par la montée bulles d'air dans la cellule [44]. C'est un procédé minéralurgique basé sur la différence des propriétés superficielles des particules dans une solution aqueuse ainsi que dans l'air [53].

Les exigences du marché pour les concentrés de fer de haute qualité pour améliorer la productivité de l'industrie sidérurgique ont accru l'importance du processus de flottation par rapport à la pré-concentration conventionnelle du minerai par gravité ou séparation magnétique. La méthode de flottation la plus couramment appliquée est celle qui est basée sur la flottation cationique de la silice et des silicates (flottation inverse), et qui est précédée ou non d'une décoloration ou d'une floculation sélective [54].

3.2.3.1. Principe de la flottation

Le principe de la flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des solides. Ces propriétés peuvent être naturelle ou stimulées à l'aide d'un réactif approprié qui est ajouté dans l'eau où baignent les particules solides. Les particules minérales se fixent aux bulles d'air ascendant dans la cellule et sont transportés à la surface pour recueillir dans une mousse. Ce processus global comprend les étapes suivantes : Tout d'abord, le minerai est finement broyé assez pour libérer les cristaux minéraux qui doivent être concentrés. Ensuite, un flux croissant des bulles d'air sont envoyées à travers la pulpe de minerai dans la cellule, et les conditions chimiques sont disposés sur les surfaces des particules pour que les minéraux souhaités adhèrent sélectivement aux bulles et montent avec elles. Les bulles chargées une mousse minéralisée à la surface cellulaire, et celle-ci est recueillie sous forme de produit concentré (figure 3.6).



Figure 3.6 : Cellule de flottation

3.2.3.2 Conditionnement d'opération de flottation

Un délai suffisant doit être accordé pour le mélange des réactifs de flottation et pour les réactions avec ces composés chimiques qui doivent se produire avant la flottation. Pour ce faire, le conditionnement avant les cellules de flottation est considéré comme standard pratique et diminue le temps de flottation avec une augmentation associée du circuit de flottation capacité. S'il est possible de faire le conditionnement dans la cellule de flottation elle-même, il est généralement préférable de conditionner la pulpe avant de la passer dans la cellule, et cela se fait dans une petite cuve équipée d'un agitateur. Les pâtes sont conditionnées puis flottées à la même densité.

Il existe de nombreuses variables à considérer pour le conditionnement, telles que le pourcentage des solides dans la pulpe, le temps de traitement, le degré d'aération dans le réservoir, l'ordre d'addition des réactifs, l'intensité de l'agitation et la vitesse de réaction des réactifs avec les surfaces minérales. Le temps de conditionnement est important car un temps de traitement trop court peut ne donner pas des résultats souhaités, tandis qu'un temps plus long que nécessaire augmente inutilement du réactif utilisé ainsi que la consommation d'énergie utilisée pour l'agitation. Un autre point à être considéré est la température de la pulpe, avec des solutions chaudes nécessitant une plus petite quantité de réactifs et donnant des réactions chimiques plus rapides.

3.2.3.3. Réactifs de la flottation

Les réactifs de flottation les plus employés ont été classés [55] comme la suite :

a) Collecteurs sont des composants chimiques aux molécules complexes qui rendent la surface minérale hydrophobe. Ils sont constitués de deux parties, la première partie assure l'adsorption des collecteurs à la surface de la particule par réaction chimique ou bien par attraction électrostatique. La deuxième partie est une chaîne organique immergée dans l'eau en vue d'induire l'hydrophobicité à la particule.

b) Moussants sont des composants peu solubles dans l'eau, ils sont constitués d'une chaîne organique assez longue qui permet de réduire la tension de surface de l'eau. On ajoute les moussants pour créer les bulles d'air fines et assurer une forte stabilité de la mousse. Ils ont trois fonctions principales en flottation [56].

- Aide à la formation et à la préservation des petites bulles ;
- Réduit la vitesse de montée des bulles ;
- Aide à la formation de mousse ;

c) Activant et déprimants : Dans le cas où les collecteurs ne s'adhèrent pas à la surface minérale, la séparation est devenue irréalisable. Un activant permet alors de changer les caractéristiques chimiques des surfaces des particules en favorisant l'adsorption du collecteur. À l'inverse de l'activant, le déprimant entrave l'adsorption du collecteur avec la surface minérale afin de garder son propriété hydrophile.

d) Régulateurs du milieu : Ce sont des composants ajoutés afin de réagir sur les interactions minéral-collecteur. Le plus souvent, les régulateurs ajoutés s'attachent à la surface des particules en minimisant ou en favorisant la fixation des collecteurs, ils servent aussi à régler le pH du milieu, le potentiel redox.

Les minéraux pouvant être séparés par le procédé physico-chimique sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2: Minéraux pouvant être séparés par le procédé physico-chimique [57].

Sulfures		Carbonates	
Galène	PbS	Calcite	CaCO ₃
Blende	ZnS	Dolomite	(Mg,Ca)CO ₃
Marmatite	Zn _{1-x} Fe _x S	Magnésite	PbCO ₃
Molybdénite	MoS ₂	Malachite	ZnCO ₃
Pentlandite	Ni _{1-x} Fe _x S	Cérusite	PbCO ₃
Chalcocite	Cu ₂ S	Smithsonite	ZnCO ₃
Covellite	CuS	Calcite	CaCO ₃
Chalcopyrite	CuFeS ₂	Cérusite	PbCO ₃
Bornite	Cu ₅ FeS ₄	Magnésite	PbCO ₃
Enargite	Cu ₃ AsS ₄	Malachite	ZnCO ₃
Tennantite	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃		
Tétrahédrite	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	Fluorures	
Pyrite	FeS ₂	Fluorine	CaF ₂
Pyrrhotite	Fe _{1-x} S	Tungstates	CaWO ₄
Mispickel	FeAsS	Scheelite	CaWO ₄
Sulfates		Phosphates	
Barytine	BaSO ₄	Apatites	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F)
Anglésite	PbSO ₄	//	//
Célestine	SrSO ₄	//	//

3.2.4. Méthode de séparation gravimétrique

La valorisation des minerais par concentration gravitaire est pratiquée depuis des milliers d'années, et bien qu'il ne soit le seul pilier de la concentration qu'il était autrefois, et maintenant à partager avec les nouveaux processus développés, il est toujours l'un des principales méthodes largement utilisées [43]. Les équipements de concentration gravimétrique exploitent la différence de masse volumique entre les matériaux pour accomplir la séparation grâce à l'action combinée de la gravité et de différentes forces. En réalité, la séparation est aussi affectée par le volume et la forme des particules comme dans le cas de la classification. Les effets de ces deux facteurs sont contrés en limitant la gamme de tailles de particules qui composent l'alimentation de ces équipements par tamisage ou classification [58].

Sous l'action de la gravité et/ou d'une autre force, les particules baignant dans le fluide (l'eau) entrent en mouvement les unes par rapport aux autres afin de créer deux couches distinctes: celle rassemblant les particules de faible masse volumique et celle rassemblant les particules de masse volumique élevée. Les équipements de concentration gravimétrique sont divisés en quatre groupes selon les mécanismes de séparation impliqués. Ces mécanismes sont illustrés à la figure 3.7.

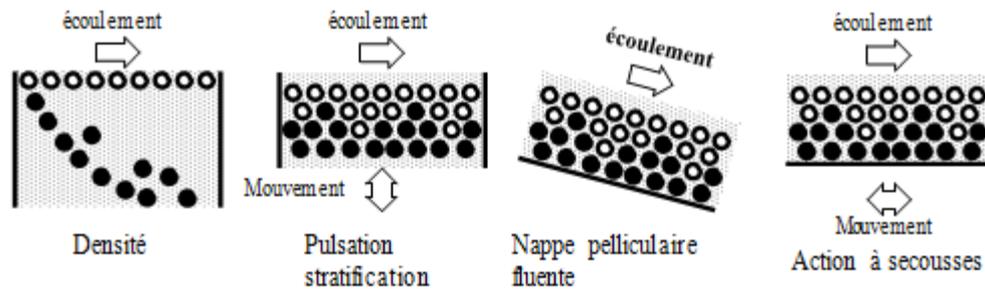


Figure 3.7: Mécanismes de la séparation gravimétrique

Groupe 1 : Le mécanisme impliquant la densité fait intervenir la masse volumique (densité) du fluide ou de la pulpe ainsi que la force gravitationnelle pour séparer les particules en deux produits, ceux qui flottent et ceux qui coulent. Le point de coupure (en termes de masse volumique) entre les deux produits peut être modifié en ajustant la densité de la pulpe par la quantité de solides présents. La séparation est alors effectuée par sédimentation entravée. Parmi les équipements de ce groupe, les équipements de séparation par milieu dense sont les plus utilisés.

Groupe 2 : Le mécanisme qui fait intervenir la pulsation et la stratification repose sur l'action de pulsations oscillatoires verticales d'un courant d'eau. Ce mécanisme engendre l'expansion du lit qui facilite le mouvement des particules les unes par rapport aux autres. Ce mouvement provoque la stratification des particules en fonction de leur masse volumique [59]. Les jigs constituent les principaux équipements de ce groupe.

Groupe 3 : Les séparateurs à nappe pelliculaire fluente sont basés sur l'action de percolation interstitielle à travers un lit de particules en écoulement sur un plan incliné. Les particules de masse volumique élevée ont tendance à traverser le lit pour former une couche de particules inférieure qui s'écoule lentement le long du plan incliné. La couche supérieure qui est composée des particules de faible masse volumique s'écoule plus rapidement puisque ces particules sont facilement entraînées par le courant liquide et ne subissent pas la friction occasionnée par la surface inclinée [60]. Parmi les équipements de ce groupe, les spirales se distinguent grâce à un effet additionnel de force centrifuge engendré par leur configuration spécifique.

Groupe 4 : L'action de secousses horizontales combinée à l'action de la nappe pelliculaire fluente contribue aussi à obtenir la stratification désirée. Grâce à la force de cisaillement qu'elles engendrent, les secousses contribuent principalement à produire le vide intergranulaire nécessaire au mouvement des particules. Les tables à secousses sont au nombre des équipements dont le fonctionnement repose sur un tel mécanisme.

3.2.4.1. Principes de fonctionnement de la table à secousse

La table à secousses (figure 3.8) est l'un des dispositifs de concentration par gravité les plus polyvalents et est que l'on trouve dans la plupart des types d'usines de séparation par gravité. Elle se compose d'une terrasse rectangulaire recouverte d'une surface convenablement lisse, matériau imperméable (linoléum, caoutchouc ou fibre de verre) qui présente une légère inclinaison réglable de 0° à 6° . Un mouvement alternatif est appliqué à la table le long de son axe horizontal, en utilisant une course avant lente et un retour rapide. L'alimentation de la

table se fait par une boîte de distribution placée dans un coin du haut bord, et est une suspension d'environ 25% de solides en poids. L'eau de lavage est distribuée le long du côté alimentation d'une blanchisserie positionnée ici, et lave les solides particules à angle droit sur la table.

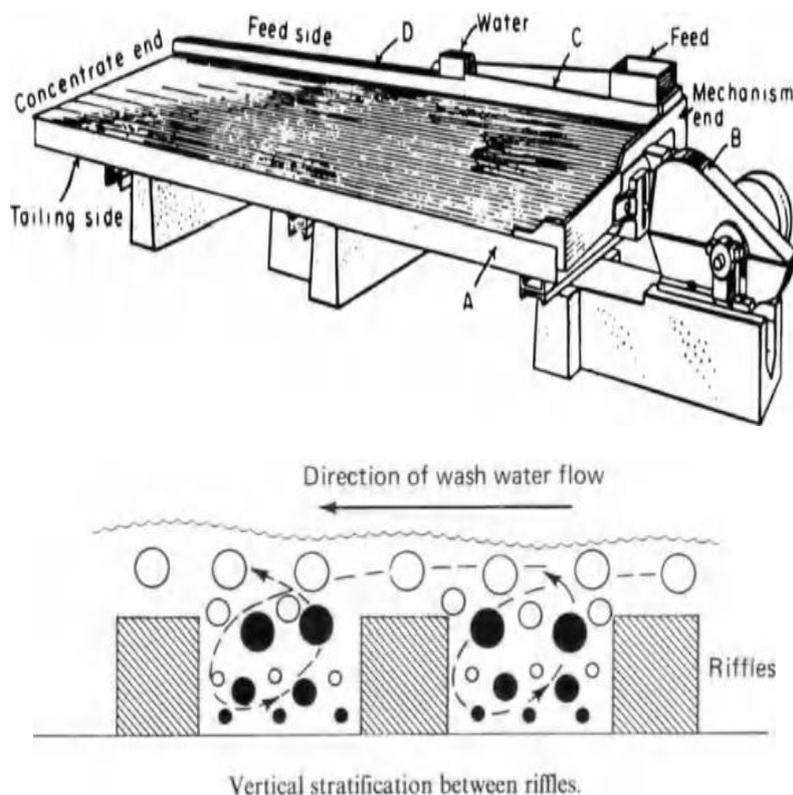


Figure 3. 8: Table à secousse

3.3. Synthèse des travaux de recherche sur le traitement du minerai de fer

3.3.1. Études de séparation magnétique pour un échantillon de minerai de fer siliceux à faible teneur.

Une étude a été menée sur un échantillon pour déterminer la possibilité de traitement du minerai de fer siliceux à faible teneur par séparation magnétique et de déterminer son aptitude à l'enrichissement physique. Les résultats d'analyses minéralogiques ont révélé que le minerai est composé de Trois phases minérales, il s'agit de la magnétite, d'hématite et de goethite en tant que principaux phase minérales d'oxyde opaque, et de deux phases minérales de gangue, des silicates ainsi que des carbonates qui forment les minéraux de gangue dans le minerai brut. Des procédés de prétraitement de classifications et de traitement par la méthode de séparation magnétique sèche et humide ont été effectués pour améliorer la teneur du minerai de fer siliceux de faible qualité pour qu'il soit commercialisable. Pour cela le minerai a été broyé, suivi d'une opération de classification par tamisage, chaque tranche granulométrique a été traiter en premier lieu par la méthode de la séparation magnétique sèche. Les résultats d'analyse minéralogique et chimique ont montrés une amélioration possible et limité. Le minerai a été broyé finement et traiter par la méthode de séparation magnétique humide à basse intensité. Les essais de traitement par la deuxième méthode a donnée des bons résultats, un concentré de 67 % en Fe avec une récupération de 90 % pour l'échantillon de d'une granulométrie inférieur à 200 μm . [61].

3.3.2. Séparation de l'hématite du jaspé hématite rubané par revêtement magnétique

Les résultats d'analyses chimiques montrent que le minerai de fer à faible teneur du jaspé est composé de 47,8 % de Fe et de 25,6 % en SiO₂, et les résultats minéralogiques indiquent qu'en plus de l'hématite et de la goéthite il procède une forme microcristalline de quartzite est la principale impureté associée à ce minerai de fer. L'enrichissement par la méthode de séparation magnétique conventionnelle a donné un concentré magnétique de plus de 60 % de Fe avec une récupération de 51 %. Pour augmenter la teneur du minerai de fer oxydé, de la magnétite fine, de la magnétite colloïdale et de la magnétite colloïdale oléate ont été utilisées comme matériau de revêtement. Après traitement par le procédé magnétique, le produit final a augmenté jusqu'à 60 % en Fe et une récupération de 56 %

Cette étude montre que la coagulation des particules d'hématite avec la magnétite colloïdale oléate donne de bons résultats et facilite la récupération des particules de fer à partir du minerai de fer à faible teneur qualité. [62]

3.3.3. Séparation magnétique des fines d'hématite et de limonite sous forme de floes hydrophobes des minerais

Le traitement du minerai de fer fin à faiblement magnétique sous forme de floes par la séparation magnétique, ce qu'on appelle le processus de séparation magnétique floe a été étudiée dans le présent travail afin de trouver une substitution pour les séparateurs magnétiques à haute intensité ou à gradient élevé pour traiter le minerai de fer faiblement magnétiques dans un éventail de taille fine.

Cette étude a été réalisée sur un minerai d'hématite et de limonite finement broyés à des dimensions de petite taille, de l'échelle de micron, grâce à la floculation hydrophobe induite par l'oléate de sodium et le kérosène pour fabriquer des floes. Les résultats expérimentaux ont montré que le procédé de la séparation magnétique floe (SMF) est efficace pour récupérer les fines d'hématite et de limonite à une intensité de champ magnétique moyenne, augmentant considérablement l'efficacité de séparation, par rapport à la séparation magnétique conventionnelle dans les mêmes conditions. En appliquant le procédé de la séparation magnétique floe au minerai d'hématite fin d'une teneur de 30,5 % de Fe, un concentré dosant 64 % de Fe avec 82 % de récupération a été produit. Il a été constaté que l'efficacité de séparation du procédé SMF est étroitement corrélée avec les principaux paramètres de la floculation hydrophobe tels que l'addition d'oléate de sodium, le temps de conditionnement et l'addition de kérosène. Cette constatation suggère que la haute efficacité obtenue par le procédé SMF pourrait être attribuée à l'augmentation considérable de la force magnétique sur les fines de minerai de fer sous forme de flocons hydrophobes dans un champ magnétique, ainsi les fines peuvent être retenues par les plaques de séparation dans un séparateur magnétique et ensuite être collectés sous forme de concentrés magnétiques [63].

3.3.4. Nouvelle méthode de séparation électrostatique du minerai de fer oxydé

La complexité de la composition minéralogique et chimique génère une faible efficacité de la séparation électrique du minerai de fer oxydé. Pour cela, il est devenu une obligation de trouver une méthode de séparation électrostatique, ensuite, sélectionner les réactifs chimiques afin d'augmenter le contraste du diélectrique séparant les minéraux dans le champ de décharge à effet corona. Le collecteur de réactifs utilisé à une relation avec la consommation spécifique qu'est de 0,3 kg/t. Tandis que le dépresseur de réactif est un mélange de carboxyméthyl cellulose avec une consommation spécifique de 0,25 kg/t. D'après les résultats des tests, le traitement électrique du minerai de fer oxydé par cette méthode électrostatique a donné des bons résultats. [64].

3.3.5. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer de l'Ouenza par radiométrie.

Le minerai de fer de l'Ouenza n'a jamais fait l'objet d'un traitement à l'échelle industrielle, vu ces caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques complexes et les effets néfastes des résidus miniers qui posent un problème économique et environnemental.

A cet effet, une étude de caractérisation minéralogique et physico-chimique du minerai de fer a été menée en utilisant des techniques d'analyses multiples (MO, MEB, DRX et FX). En tenant compte des caractéristiques minéralogiques et la composition chimique des résidus, des échantillons représentatifs ont été testés par séparation radiométrique. Trois paramètres ont été caractérisés tels que la vitesse de la bande transporteuse, le temps d'émission des rayons gamma et la granulométrie d'alimentation en matière première. Les résultats ainsi obtenus par cette méthode de séparation sont très significatifs en récupération et en teneur fer. Cependant, cette nouvelle technologie permet d'une part une meilleure valorisation des minerais de fer et d'autre part une réduction du tonnage stocké à proximité de la mine [65].

3.3.6. Flottation par mousse des minerais de fer en Chine

Ma, M. [66], a réalisé une étude scientifique portant sur un procédé de traitement par voie de flottation tel que, la flottation anionique directe à la flottation cationique inverse. Bien que la flottation anionique directe été la première voie de flottation utilisée dans l'industrie du minerai de fer, elle a ensuite été largement remplacée par la technique plus efficace du cationique inverse. L'application de la flottation anionique inverse en Chine au cours des dernières années remédie efficacement à certains défauts de la flottation cationique inverse telle que le coût élevé des réactifs et la perte de métal. Les réactifs utilisés dans ce procédé de traitement du minerai de fer, y compris l'amidon, les amines et les acides gras, ainsi que les mécanismes de leurs interactions avec les minéraux contenus dans le minerai de fer examiné. La présence de l'alumine, c'est-à-dire la kaolinite et la gibbsite, ainsi que le phosphore, posent un problème et entraînent des sanctions.

3.3.7. Rôle de la teneur en silice et alumine dans la flottation des minerais de fer en Inde

En Inde, la gibbsite, le quartz et de l'argile sont les impuretés principales des minerais de fer à faible teneur. Selon la composition du minerai, la récupérer de l'hématite et d'autres oxydes de fer des minerais broyés il faut souvent recourir à la flottation par moussage. Dans ce contexte, la différence de teneur en silice et en alumine dans les minerais de fer à faible teneur a un impact sur l'efficacité de flottation du minerai de fer à faible teneur. A cette fin, des minéraux purs comme l'hématite, le quartz, la gibbsite et l'argile ont été utilisés pour préparer des mélanges synthétiques et analysés pour déterminer la différence de flottabilité.

Les résultats sont comparés aux minerais de fer brut avec des variations de teneur en silice et en alumine. Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant l'acide oléique et la dodécylamine, une meilleure récupération des valeurs de fer dans le mélange d'hématite-quartz ainsi que dans le minerai brut riche en silice par rapport au mélange d'hématite-argile et de minerai à haute teneur en alumine. Des résultats similaires sur une variété de minerais de fer montrent qu'une teneur élevée en silice sous forme de quartz dans le minerai gêne moins la flottation du minerai de fer, alors que la présence de silice en tant qu'argile empêche la réaction de flottation du minerai de fer. Les études minéralogiques au MEB montrent que les particules d'argile recouvrent la surface de l'hématite, ce qui le rend moins sélectif pour l'interaction avec le collecteur. Les études de potentiel de surface de l'argile et du quartz suggèrent qu'il se produit une inversion de charge pour le quartz traité à la dodécylamine, mais que pour l'adsorption de dodécylamine sur de l'argile, des valeurs de potentiel négatives sont notées au-delà d'un pH de 4,6 [67].

3.3.8. Effet et mécanisme de la sidérite sur la flottation inverse de l'hématite

Dans cette étude, les effets de la sidérite sur la flottation inverse de l'hématite ont été étudiés à l'aide de la micro flottation, des tests d'adsorption et de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. Les résultats de traitement physico-chimique montrent que le problème réside sur le fait que la sidérite entre en interaction avec le quartz sont les principales raisons pour lesquelles la sidérite influence significativement sur la flottabilité. Les interactions sont attribuées aux espèces de sidérite dissoute et aux fines particules de sidérite. L'interaction due à l'espèce dissoute est cependant dominante.

Les calculs théoriques révèlent que l'adhésion sur le quartz augmente lorsque la taille des particules de sidérite diminue et que les particules fines influencent en partie la flottabilité du quartz. Les calculs de solution chimique indiquent que les espèces dissoutes de sidérite pourraient convertir la surface du quartz actif en précipités de CaCO_3 qui peuvent être déprimés par amidon. Les calculs théoriques de Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek (DLVO) sont en bon accord avec les résultats des tests d'adsorption et de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et expliquent les raisons pourquoi la sidérite influence de manière significative la flottation inverse de l'hématite [68].

3.3.9. Recherche expérimentale sur la flottation inverse anionique de l'hématite avec une colonne de flottation

Une étude expérimentale a été menée sur le concentré magnétique d'une hématite utilisant la technologie de flottation inverse anionique dans la colonne de flottation. Des études systématiques expérimentaux ont donné un plus pour cette recherche, Plusieurs paramètres ont été caractérisés tels que la pression de circulation de 0,055 MPa, la quantité d'alimentation de 160 g/min, le dosage collecteur de 800 g/t et le dosage d'amidon de 900 g/t.

Selon le schéma d'une ébauche et d'un balayage dans les conditions optimales, Les résultats des essais de traitement ont permis d'obtenir un concentré de fer avec une teneur de 67,37 % et reflète également les avantages d'une excellente sélectivité et d'une récupération élevée. L'application de la colonne de flottation cyclonique à microbulles statiques en flottation inverse d'hématite offre une nouvelle approche pour la flottation inverse d'hématite en Chine [69].

3.3.10. Flocculation par cisaillement et flottation de l'hématite

L'utilisation de l'alkylsulfonate de sodium comme collecteur pour faire flotter l'hématite par flocculation par cisaillement flottation. Plusieurs paramètres ont été caractérisés tels que la taille des particules, du pH de la pulpe, du dépresseur, de la résistance au cisaillement et du temps de cisaillement sur la flottation par flocculation par cisaillement de l'hématite. Et le principal mécanisme de cisaillement la flottation de flocculation de l'hématite a été analysée et étudiée au moyen d'une interface à double couche théorique, celle de la flocculation par cisaillement et principes de base de la collision théorique.

Selon les conditions d'utilisation du collecteur 4 kg/t, pH de la pulpe broyage finesse (-0,037 mm) 90%, temps de conditionnement 2min, résistance au cisaillement 2000 r/min et temps de cisaillement 7 min, la récupération de fer plus élevée de 92,4% est obtenue. Et l'hématite hydrophobe induite se forme au moyen d'alkylsulfonate de sodium, puis la probabilité de collision de l'hématite fine est augmentée à faire en sorte que les particules hydrophobes surmontent la barrière potentielle et former des floccs hydrophobes directement contact sous agitation intense [70].

3.3.11. Dépression d'ensemencement magnétique dans la flottation de boues de minerai d'hématite

Dans cette étude expérimentale, pour abaisser le minéral cible en flottation, la méthode de la dépression magnétique d'ensemencement (DME) est appliquée, c'est-à-dire l'ajout d'un dépresseur organique (comme l'amidon) et de graines magnétiques et l'application d'une pré-magnétisation à faible intensité de champ, a été étudiée dans la flottation inverse des boues de minerai d'hématite. La récupération du fer augmente avec l'ajout de graines magnétiques; la capacité déprimante de l'amidon en flottation a été encore renforcée par le DME.

L'augmentation de la densité d'adsorption de l'amidon sur l'hématite minérale cible et l'élargissement apparent de la taille des minéraux fins sont deux raisons de la TMS. Sur la base des mesures de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, VSM et AFM, il a été démontré que l'amidon agissait comme une adsorption de pont entre l'hématite et les graines magnétiques par liaison hydrogène et chimisorption, et la couverture résultante des graines magnétiques et de l'amidon sur l'hématite augmentait la sensibilité magnétique, étant

bénéfique pour le l'agglomération de fines d'hématite en réduisant l'intensité magnétique externe nécessaire à l'agglomération. Le modèle, dépression magnétique d'ensemencement a été proposé [71].

3.3.12. Effet de la température sur la flottation en émulsion de l'hématite

La commercialisation du minerai hématitique finement broyé, trop riche en silice est possible lorsqu'il est traité par flottation en émulsion. Un mélange d'émulsion à trois composants a été utilisé à des températures allant de la température ambiante 22 °C à 30 °C, 40 °C, 49 °C, 59 °C et 68 °C. Le dosage et la composition d'émulsion optimaux à température ambiante ont été utilisés pour déterminer ce dosage pour les tests de flottation à plus haute température. Le minerai concassé a subi une opération de prétraitement par lavage à plusieurs reprises avec de l'eau du robinet et le contenu ionique des filtrats a été analysé.

Les meilleurs de la séparation sélective et de la concentration d'hématite des minéraux de gangue ont démontré une dépendance à la température, avec des augmentations marquées à des températures supérieures à la température ambiante. L'efficacité de séparation optimale s'est produite dans la plage de 30 °C à 60 °C. L'efficacité de séparation améliorée à des températures dépassant la température ambiante s'explique par la dépression de la silice. Cette dépression est attribuée à: la précipitation de cations activateurs de la silice, principalement du calcium et du magnésium, à une température croissante; et l'effet de la température sur la solubilité et la fixation du collecteur à la surface aqueuse de l'hématite [72].

3.3.13. Un aperçu de la valorisation des minerais de fer par flottation cationique inverse

La méthode de séparation physico-chimique (flottation) est intégrée en première fois dans l'usine en 1954 (Humboldt Mien) et le second a commencé en 1956. La flottation est méthode importante de traitement des minerai à faible teneur, aussi, un moyen très efficace d'enrichissement des minerais de fer et compétitif avec d'autres procédé d'enrichissement tel que les procédé magnétique. Tant que les concentrés souhaités sont d'un niveau moyen et la minéralisation n'est pas trop fine et composée de magnétite ou hématite dans une gangue siliceuse propre, l'utilisation de la méthode de la séparation magnétique à faible ou à haute intensité peut extraire le fer. Economiquement parlant, cette méthode implique des coûts d'exploitation modérés, bien que l'investissement en capital soit clairement supérieur. Mais dès que la minéralisation est mélangée (magnétite + hématite) et/ou devient très fine, la flottation devient plus processus attractif [73].

3.3.14. Appliquer la chimie de surface à la flottation des minéraux et à la valorisation des ressources énergétique

La méthode de séparation physico-chimique (flottation) est l'une des méthodes de traitement des minéraux selon la différence d'hydrophobie de surface et hydrophilie des minéraux. En fonction de leur hydrophobicité naturelle, une partie des minerais puisse être traité sans réactifs chimiques, la plupart d'entre eux ont besoin de divers réactifs dans la pulpe du minerai pour contrôler sélectivement l'hydrophobicité et les comportements de flottation des minéraux et pour obtenir des résultats de séparation satisfaisants. Par conséquent, les réactifs de flottation sont importants pour l'application et le développement de la technologie de la méthode physico-chimique [74].

3. 4. Conclusion

Les minerais extraits des entrailles de la terre ne peuvent pas être utilisés naturellement dans l'économie, dans la plupart des cas ils ne répondent pas aux exigences du point de vue qualité. De ce fait, ils sont traités en utilisant des méthodes différentes.

Les compositions minéralogiques ont un impact significatif sur le choix des méthodes et des indicateurs technologiques d'enrichissement. Toutes les méthodes d'enrichissement exploitent la différence dans les propriétés chimiques ou physiques afin d'effectuer une séparation efficace des différentes substances minérales existantes dans le minerai.

L'enrichissement d'un minerai peut être réalisé en utilisant des méthodes différentes, tel que la séparation gravimétrique, physico-chimique, magnétique, radiométrique et électrostatique, elles sont effectuées en mode sec et humide, chaque mode à ces avantages et inconvénients. Ces procédés comprennent les processus physiques et physico-chimiques de séparation des minéraux, dans lesquels les minéraux utiles sont séparés et libérés dans des concentrés et les stériles dans des résidus.

DEUXIEME PARTIE

Expérimentale

CHAPITRE 4

**Caractérisation physico-chimique et minéralogique
du minerai de fer de Khanguet**

4.1. Introduction

Ce chapitre de l'étude expérimentale présente la méthode de prélèvement et de préparation mécanique des échantillons, ainsi que, l'ensemble des techniques de caractérisation minéralogiques et physico-chimiques du minerai de fer de Khanguet réalisées au cours de cette thèse.

L'objectif principal de la caractérisation est de déterminer les caractéristiques physico-chimiques, en même temps, d'identifier les phases minérales et d'en connaître davantage sur la texture du minerai. Ces caractéristiques permettront d'identifier ultérieurement des solutions de traitement. Sur le schéma suivant, figure 4.1, nous avons illustré les différentes étapes de la caractérisation réalisée sur les échantillons représentatifs prélevés sur le site.

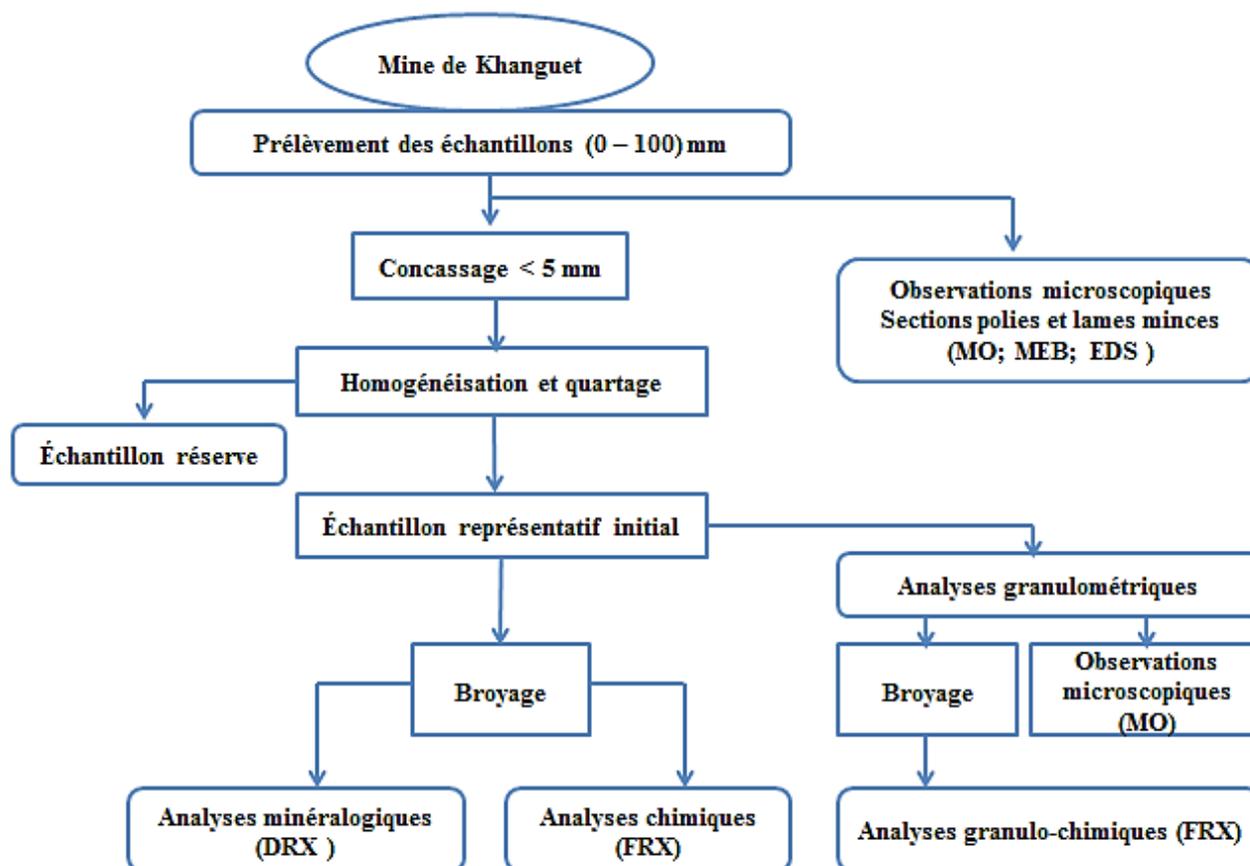


Figure 4.1 : Schéma synoptique des étapes de la caractérisation faites sur les échantillons représentatifs prélevés sur terrain.

4.2. Prélèvement et préparation des échantillons

Le but de l'échantillonnage est de prélever une partie représentative d'un ensemble de minerai pour déterminer les caractéristiques minéralogiques et la teneur moyenne des divers éléments chimiques de cet ensemble [75, 76].

4.2.1. Prélèvement des échantillons sur terrain

Les échantillons ont été prélevés sur terrain du périmètre de la mine de Khanguet, la période d'échantillonnage s'est déroulée le mois de Mars 2019 et le prélèvement a été effectué sur quatre zones différentes : gites « A », « B », « C » et le stock du stériles « S » avec une masse totale de 120 Kg (figure 4.2 et 4.3). Les lots d'échantillons sont étiquetés, stockés dans des sacs en plastiques puis envoyés vers le laboratoire LAVAMINE de l'université BADJI Mokhtar - Annaba pour leur préparation mécanique. Le tableau IV.1 représente les coordonnées UTM des points choisis pour le prélèvement des échantillons dans la mine de Khanguet.



Figure 4.2 : Zones de prélèvement des échantillons sur terrain.

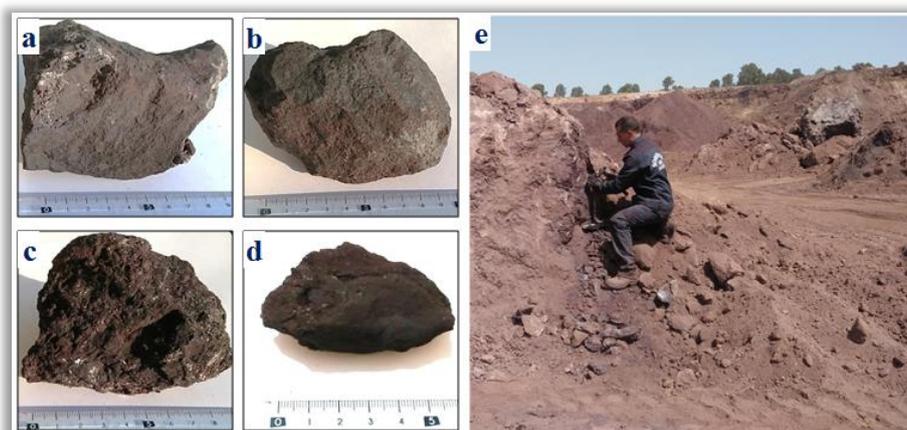


Figure 4.3: Aspect physique du minerai de fer brut de la mine de Khanguet
a- gite A, b- gite B, c- gite C. d- stériles S. e- prélèvement sur terrain.

Tableau 4.1: Coordonnées UTM des points de prélèvement des échantillons

Gite A			Gite C		
Points	X	Y	Points	X	Y
P 1	436924	3916925	P 1	436444	3917155
P 2	436876	3916947	P 2	436392	3917139
P 3	436781	3916960	P 3	436297	3917132
P 4	436743	3917021	P 4	436301	3917170
P 5	437065	3917084	P 5	436289	3917192
Gite B			Stock stériles		
Points	X	Y	Points	X	Y
P 1	436573	3917048	P 1	437311	3917383
P 2	436568	3917022	P 2	437364	3917397
P 3	436518	3916989	P 3	437340	3917432
P 4	436534	3916961	P 4	437339	3917455

4.2.2. Préparation mécanique des échantillons

La préparation mécanique des échantillons consiste essentiellement à réduire les dimensions des grains par concassage, homogénéisation et broyage, afin de faciliter leurs manipulations ultérieures (Analyses physico-chimique et minéralogiques). Le protocole de prélèvement et de préparation mécanique du minerai sont effectués selon le schéma représenté sur la figure 4.4.

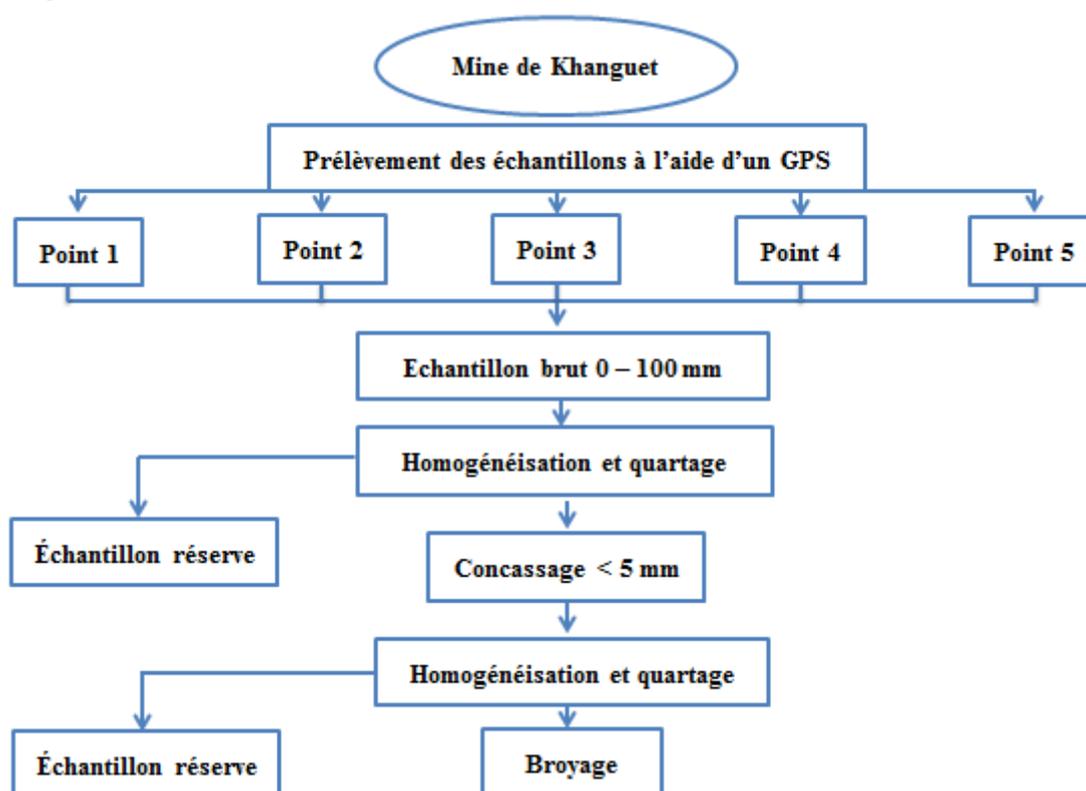


Figure 4.4 : Protocole de prélèvement et de préparation du minerai.

4.2.2.1. Concassage

Le concassage constitue la première étape de la préparation mécanique, son objectif est la réduction des dimensions du minerai afin de faciliter leur manipulation ultérieure. Les échantillons sont réduits jusqu'à une grosseur de grains $< 5 \text{ mm}$ à l'aide d'un concasseur à mâchoire qui consiste de deux plaques de métal en angle ($< 25^\circ$), l'une fixe et l'autre pivote autour d'un point d'ancrage, lui permettant d'exécuter un mouvement de va-et-vient. Le minerai alimenté est alternativement écrasé et relâché par leur mouvement de va-et-vient, jusqu'à ce qu'il sorte par l'extrémité inférieure. La figure 4.5 présente le concasseur à mâchoire du laboratoire LAVAMINE.

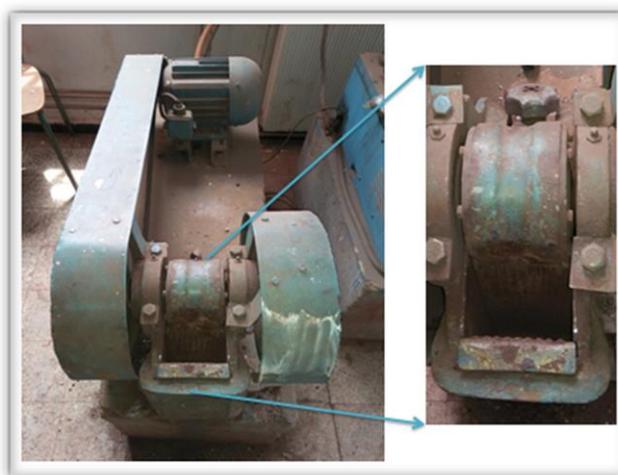


Figure 4.5 : Concasseur à machoire à double effet.

4.2.2.2. Homogénéisation et quartage

L'échantillonnage par quartage est une méthode manuelle qui consiste à homogénéiser l'ensemble de l'échantillon par pelletage de façon à former un cône, ce dernier est aplati en forme de galette arrondie puis diviser en quatre parts. On prend les deux parts opposés pour faire un sous échantillonnage, on répète l'opération jusqu'à ce que la masse de sous échantillon désiré est atteinte figure 4.6.

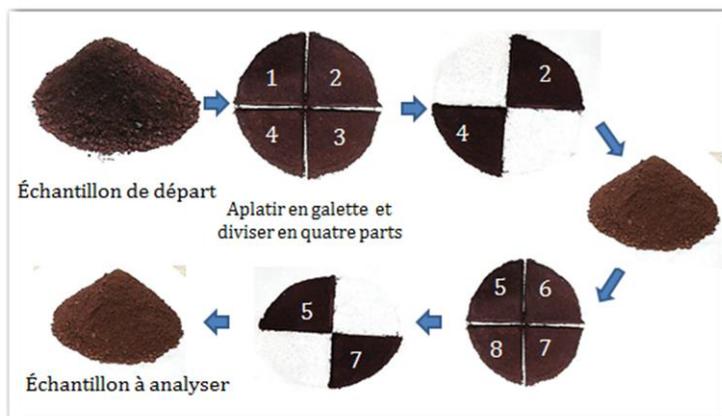


Figure 4.6: Etapes d'échantillonnage par quartage

4.2.2.3. Broyage

L'opération de broyage est effectuée au niveau du laboratoire du département génie minier de l'Ecole Nationale Polytechnique Alger. Cette opération est réalisée par un broyeur planétaire à billes de type Retsch PM 100, Figure 4.7. Le temps de broyage dépend de plusieurs facteurs : la dureté du minerai, la température, la taille et le poids total des billes de broyage. Dans notre cas, le temps de broyage été de 3 à 5 minutes et la vitesse de rotation est égale à 300 tours/minute. Dans cette étape, le minerai est amené à une granulométrie $< 60 \mu\text{m}$ pour permettre de réaliser les différentes analyses et l'identification du minerai par les analyses FRX et DRX.



Figure 4.7 : Vue intérieur et extérieur du broyeur planétaire Retsch PM 100

4.2.2.3.1. Principe du broyeur planétaire Retsch PM 100

Le broyeur planétaire PM 100, Retsch est un appareil de broyage. Le bol de broyage est disposé excentriquement sur la roue solaire du broyeur planétaire à billes. La roue solaire tourne dans le sens contraire à celui de la rotation du bol de broyage. Les billes de broyage situées dans le bol subissent une déviation résultant de mouvements de rotation superposés, responsables de la dite force de Coriolis.

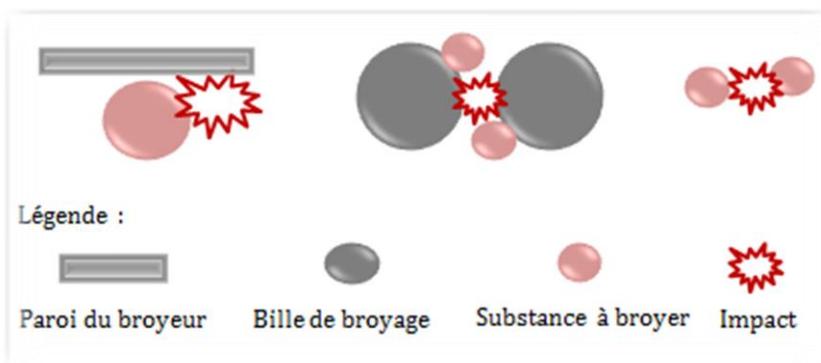


Figure 4.8 : Différents types d'impact mécanique mis en jeu pendant le broyage

Les différences de vitesse entre les billes et le bol de broyage entraînent une interaction entre des forces d'impact et de friction libérant des énergies dynamiques importantes. La combinaison de ces forces se traduit par le degré de broyage élevé et très efficace des broyeurs planétaires à billes [77]. Les forces centrifuges du broyeur planétaire engendrent une très grande énergie de broyage qui se traduit par des temps de broyage très courts. La figure 4.8 représente les différents types d'impact mécanique mis en jeu pendant le broyage.

4.3. Caractérisation du minerai de fer de la mine de Khanguet

La méthodologie globale de caractérisations minéralogiques et physico-chimiques du minerai de fer de la mine de Khanguet après préparation mécanique est illustrée dans la figure 4.9. Ces méthodes seront décrites dans ce chapitre.

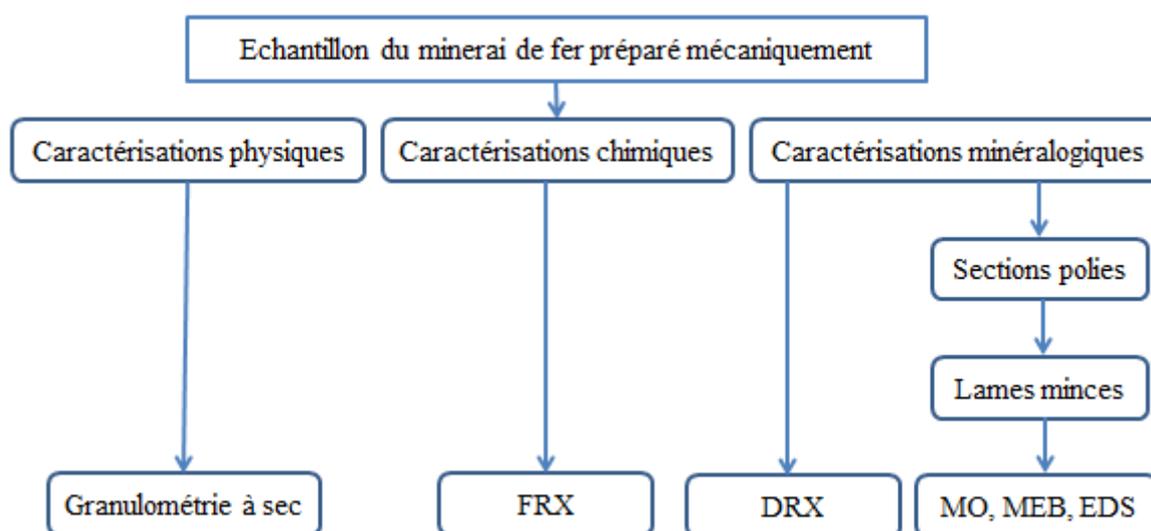


Figure 4. 9 : Méthodologie de caractérisation du minerai de fer de Khanguet après préparation mécanique.

4.3.1. Caractérisation physique par analyse granulométrique à sec

Les opérations d'analyse granulométrique par tamisage à sec ont été réalisées au niveau du laboratoire LAVAMINE, Université de Annaba. Le tamisage est la plus ancienne des méthodes d'analyse granulométrique et de classification de particules. Elle possède des avantages de simplicité et de rapidité de mise en œuvre.

La base de la méthode est le triage de particules par des tamis avec des ouvertures de taille déterminée. La forme des ouvertures est carrée et est appelée maille. Mais il existe des ouvertures circulaires que l'on rencontre fréquemment dans les tamis industriels constitués de plaques métalliques perforées. Le Refus désigne la partie des grains retenues dans un tamis et le tamisât ou passant désigne la partie qui traverse le tamis [78].

4.3.1.1. Principe et description de l'analyse granulométrique par tamisage à sec

L'analyse granulométrique est effectuée sur une tamiseuse électro-vibrante, un appareil à secousse de type RETSCH (Figure 4.10) fonctionnant avec une série de tamis dont les dimensions est de 200 mm x 50 mm. Les conditions opérationnelles sont les mêmes pour tous les essais, les essais sont effectués sur des échantillons de 200 g, l'amplitude de vibration utilisée est égale à 60 et le temps de tamisage est égal à 20 minutes à chaque essai.

Le but de cette l'analyse est de déterminer quantitativement la distribution des particules de l'échantillon par classes de diamètres. Le principe d'analyse consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, empilés les uns sur les autres, le plus petit en bas puis par ordre croissant pour avoir le plus grand en haut. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte du minerai pendant l'opération, on dispose au-dessous de la colonne un fond étanche qui permettra de récupérer les fines.

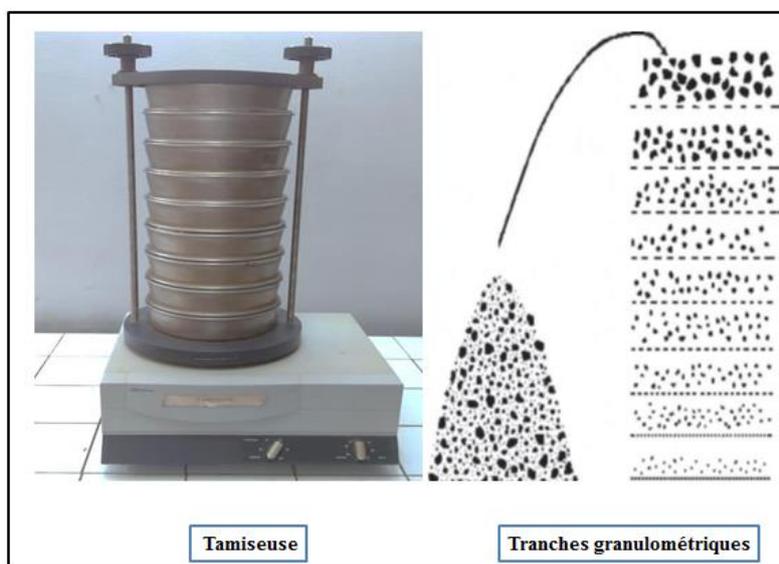


Figure 4.10 : Tamiseuse électro-vibrante de marque RETSCH

L'échantillon étudié est versé en haut de la colonne du tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le tamisage par vibration est effectué sur un échantillon sec. La vibration fait descendre les grains au travers les tamis jusqu'à ce qu'ils soient bloqués par le tamis de la maille correspondant au diamètre du grain. Une fois la période de tamisage achevée, on prélève les différentes fractions dans les tamis en prêtant attention à ne pas forcer le passage de particules au travers des tamis. Les tableaux 4.2 et 4. 3 représentent les différentes fractions granulométriques obtenues des échantillons C et S qui sont respectivement.

Tableau 4.2 : Résultats d'analyse granulométrique de l'échantillon « C »

Mailles (mm)	Taux massique (Rendements)			
	Poids des refus (g)	Pourcentages des refus	Refus cumulés (%)	Passants cumulés (%)
> 4	0	0	0	100
-4+ 2	45,81	22,905	22,905	77,095
-2 +1	30,71	15,355	38,26	61,74
-1 +0,5	25,14	12,57	50,83	49,17
-0,5 +0,250	27,95	13,975	64,805	35,195
-0,250 +0,125	53,52	26,76	91,565	8,435
-0,125 +0,063	10,52	5,26	96,825	3,175
-0,063 +0,045	4,13	2,065	98,89	1,11
< 0,045	2,22	1,11	100	0
Total	200	100	-	-

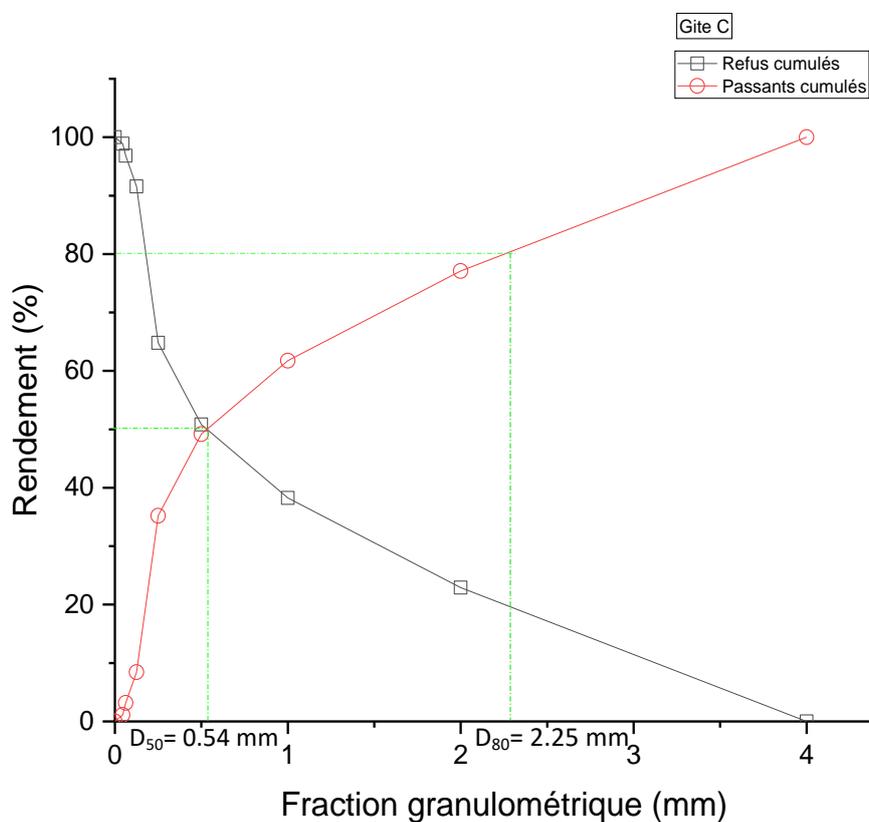


Figure 4.11 : Courbe granulométrique de l'échantillon gite « C » du minerai de fer concassé.

Tableau 4.3 : Résultats d'analyse granulométrique de l'échantillon « S » – stock stériles

Mailles (mm)	Taux massique (Rendements)			
	Poids des refus (g)	Pourcentages des refus	Refus cumulés (%)	Passants cumulés (%)
> 4	0,00	0	0	100
-4+ 2	51,96	25,98	25,98	74,02
-2 +1	38,66	19,33	45,31	54,69
-1 +0,5	27,53	13,765	59,075	40,925
-0,5 +0,250	20,42	10,21	69,285	30,715
-0,250 +0,125	23,35	11,675	80,96	19,04
-0,125 +0,063	23,23	11,615	92,575	7,425
-0,063 +0,045	7,64	3,82	96,395	3,605
< 0,045	7,21	3,605	100	0
Total	200	100	-	-

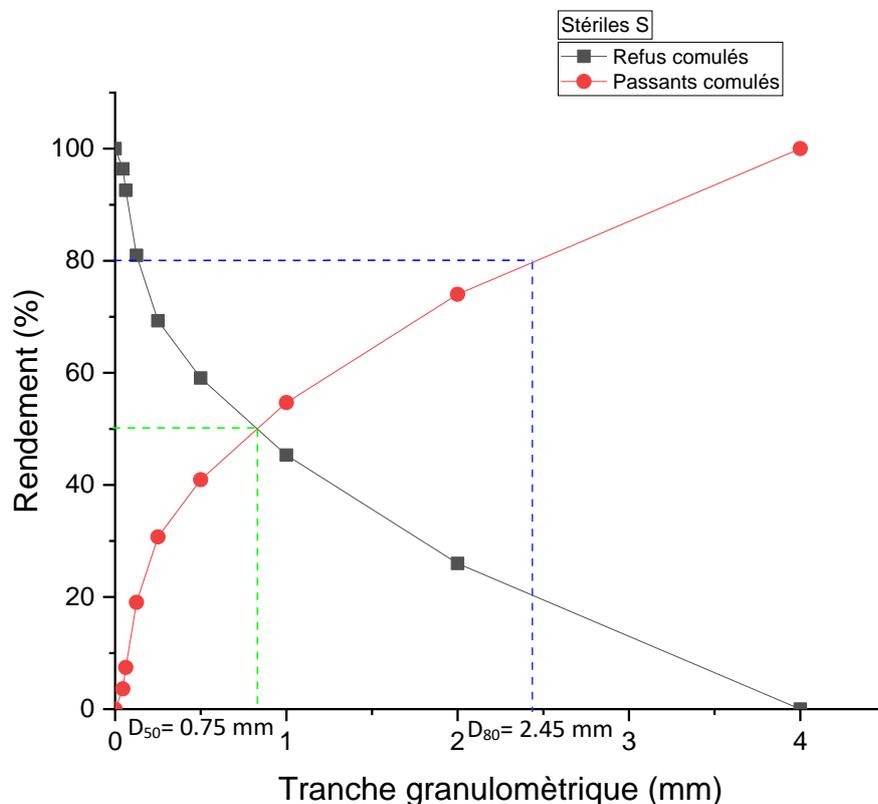


Figure 4.12 : Courbe granulométrique de l'échantillon stérile « S ».

Les pourcentages des refus ou des tamisât cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrie en portant les ouvertures des tamis en abscisse et les pourcentages en ordonnée sur une échelle arithmétique, les courbes granulométriques des échantillons prélevés sont présentées dans les figures 4.11 et 4.12.

Les courbes granulométriques montrent des produits présentant deux populations de particules de tailles respectivement comprises dans des intervalles de : (0 + 0.5) mm et +1 mm, cela veut dire que la distribution granulométrique des particules dans les différentes tranches est de manière irrégulière. Les diamètres des particules dans l'échantillon C et S sont respectivement $D_{50} = 0,54$ mm, $D_{50} = 0,75$ mm et un $D_{80} = 2,25$ mm, $D_{80} = 2,45$ mm.

Les tailles des particules correspondant à 50 % de passant massique D_{50} montrent que plus de la moitié de l'échantillon C et S sont constituées de particules à une maille supérieure à 0,54 mm. Les tailles des particules correspondant à 80 % de passant massique D_{80} montrent que 161 g du poids de l'échantillon C sont constitués à une maille de 2,25 mm. Par contre, plus de 150 g pour l'échantillon S.

4.3.2. Caractérisation chimique et minéralogique du minerai de fer de Khanguet

Afin de caractériser le minerai de fer de Khanguet un prélèvement de plusieurs échantillons à l'aide d'un GPS a été effectué. Ces échantillons représentatifs ont été préparés mécaniquement (concassage, homogénéisation, quartage, broyage), ensuite, utilisés dans les différentes techniques d'analyses. En premier lieu, les analyses chimiques par l'FRX qui ont pour but de déterminer les éléments présents dans les échantillons, en second lieu les analyses minéralogiques (DRX, microscope optique et électronique à balayage équipé d'un détecteur EDS) pour déterminer la texture et les phases minérales constituant le minerai.

4.3.2.1. Caractérisation chimique par fluorescence des rayons X

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres...etc. sous forme solide ou liquide [79].

4.3.2.1.1. Principe de la fluorescence des rayons X

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité, l'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon, l'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique [79].

4.3.2.1.2. Présentation et interprétation des résultats d'analyses par FRX

Les résultats d'analyse chimique des quatre échantillons représentatifs de chaque gîte et le stock du stériles de la mine de Khanguet sont illustrés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Résultats d'analyse par la fluorescence des rayons X

Gîte	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MnO %	SiO ₂ %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	K ₂ O %	SO ₃ %	P ₂ O ₅ %	SrO %	CuO %	Na ₂ O %	TiO ₂ %	PAF %	Ib _g
A	55,13	6,89	2,43	3,77	2,187	1,55	0,13	0,22	0,08	0,10	0,04	0,02	0,05	27,34	1.70
B	58,67	3,46	2,13	8,63	0,828	4,28	0,15	0,46	0,27	0,21	0,49	0,11	0,09	19,49	0.33
C	36,15	7,19	1,44	19,08	0,679	10,01	0,36	4,06	0,09	0,15	0,03	0,05	0,09	20,00	0.26
S	32,37	8,91	1,43	15,66	1,937	7,24	0,73	0,12	0,13	0,10	0,04	0,06	0,16	30,15	0.47

Les analyses par FRX montrent que les gîtes A et B sont riches en substance utile, par contre le gîte C et le stock du stériles S sont pauvres. De ce fait, le travail de recherche portera uniquement sur ces deux derniers. Les analyses chimiques montrent que les éléments principaux constitutifs du minerai sont le : Fer, Silicium, Aluminium, Magnésium et l'Oxygène. Sur l'ensemble des gîtes A, B, C et le stock du stériles S, les teneurs en Fe₂O₃ sont respectivement : 55,13 % ; 58,67 % ; 36,15 % et 32,37 %.

Les différentes fractions issues de l'analyse granulométrique par tamisage à sec des échantillons du gîte C et du stock stériles S sont analysées par FRX et les résultats de cette analyse granulo-chimique sont reportés sur les tableaux 4.5 et 4.6.

Tableau 4.5 : Résultats d'analyse granulo-chimique de l'échantillon du gîte (C).

Fraction (mm)	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	MnO %	P ₂ O ₅ %	CuO %	Na ₂ O %	SO ₃ %	BaO %	K ₂ O %	PAF %
Initiale	36,15	19,02	10,01	7,19	0,68	1,44	0,10	0,04	0,05	4,06	0,37	0,36	20,50
> 2	32,48	20,33	9,02	6,41	1,30	1,50	0,30	0,06	0,08	4,10	0,40	0,41	23,65
-2+1	33,54	20,28	8,40	7,12	0,98	1,90	0,22	0,03	0,06	3,65	0,45	0,38	22,45
-1+0,5	35,01	19,45	7,50	8,50	1,20	1,30	0,31	0,02	0,04	3,45	0,51	0,34	22,22
-0,5+0,25	37,41	18,12	7,54	6,03	1,02	2,21	0,15	0,07	0,09	3,20	0,54	0,32	23,25
-0,25+0,125	38,25	16,72	6,82	6,04	1,58	1,02	0,09	0,04	0,05	4,21	0,33	0,38	24,32
-0,125+0,063	38,52	15,54	6,22	5,97	0,70	1,16	0,06	0,05	0,07	4,15	0,09	0,35	27,02
-0,063+0,045	37,10	17,70	8,91	6,13	0,80	1,55	0,15	0,08	0,06	2,86	0,08	0,30	24,15
<0,045	35,65	19,25	10,25	6,15	0,47	1,15	0,08	0,05	0,05	2,12	0,22	0,31	24,01

Tableau 4.6 : Résultats d'analyse granulo-chimique de l'échantillon du stock stériles (S).

Fraction (mm)	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	MnO %	P ₂ O ₅ %	CuO %	Na ₂ O %	SO ₃ %	BaO %	K ₂ O %	PAF %
Initiale	32,37	15,66	7,23	8,91	1,94	1,43	0,14	0,04	0,06	0,12	0,03	0,73	31,12
> 2	29,02	17,22	7,88	7,50	2,18	1,35	0,16	0,06	0,09	0,10	0,03	0,65	33,65
-2+1	29,89	17,33	6,55	6,99	2,02	1,02	0,08	0,05	0,10	0,15	0,02	0,42	34,95
-1+0,5	32,02	16,86	8,01	7,22	1,44	0,98	0,16	0,05	0,05	0,14	0,04	0,66	31,98
-0,5+0,25	33,50	15,85	6,40	8,98	2,22	0,78	0,09	0,06	0,09	0,16	0,05	0,50	31,10
-0,25+0,125	35,09	15,60	6,52	7,81	1,89	0,68	0,08	0,07	0,08	0,11	0,04	0,71	30,58
-0,125+0,063	35,02	16,24	7,20	8,90	2,45	1,05	0,15	0,05	0,07	0,12	0,06	0,80	27,65
-0,063+0,045	34,56	17,80	8,66	9,02	1,54	1,70	0,88	0,07	0,06	0,09	0,07	0,91	24,52
<0,045	31,98	17,45	8,54	8,50	1,81	1,65	0,74	0,08	0,04	0,08	0,05	0,95	28,00

Les résultats d'analyses granulo-chimiques montrent que la maille de libération du fer de Khanguet est comprise entre la classe granulométrique (-0,5 +0,063) mm.

4.3.2.1.3. Indice de basicité

La sidérurgie exige un pourcentage élevée en Fer et une teneur faible en SiO₂ qui varie entre 1-6 % afin d'assurer une bonne qualité de l'acier et de diminuer la production du laitier au niveau du haut fourneau [81]. L'indice de basicité doit être inclus entre 1 et 1,5 c'est un caractère important qui va déterminer la possibilité de l'utilisation du minerai de fer en sidérurgie [82].

L'indice de basicité est le rapport entre les composants basiques et acides, la forme la plus simple utilise le rapport des teneurs en CaO et SiO₂.

$$I_p = (\text{CaO} / \text{SiO}_2)$$

$$I_p = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$$

$$I_g = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$$

L'indice partiel ou global nous permet de distinguer les minerais siliceux, calcaires ou auto-fondants. De même, selon le rapport Al₂O₃/SiO₂, on classe les minerais en très alumineux, alumineux, ou non alumineux. D'après les résultats obtenus dans les tableaux 4.5 et 4.6, le rapport de l'indice de basicité est faible, ne répond pas aux exigences de la sidérurgie et confirme la nécessité d'un traitement du minerai.

4.3.3. Caractérisation minéralogique du minerai de fer la mine de Khanguet

Une bonne connaissance de la composition minéralogique des minerais est indispensable pour anticiper les difficultés qui pourraient apparaître dans le processus de la valorisation des ressources minérales. Les analyses minéralogiques sont faites pour savoir d'avantage sur la forme, la texture et la granulométrie des minéraux qui constituer le minerai, cela nous permet de déterminer la maille de libération. C'est-à-dire, de savoir à quelle granulométrie il faut faire appel pour arriver à une séparation optimale des divers constituants, ensuite de choisir les types de machines adaptées pour le traitement du minerai en question. Différents types d'équipements ont été utilisés durant ce travail, ces équipements sont cités ci-dessous.

4.3.3.1. Observation au microscope optique

Les échantillons représentatifs du minerai de fer de la mine de Khanguet ont été observés par microscopie optique (Optika et Carl Zeiss) équipé d'une caméra numérique. Aussi, observés par le microscope électronique à balayage équipé d'un détecteur (EDS). Cet examen microscopique permet d'étudier les relations entre les phases minérales (texture). Les roches destinées à être étudiées aux différents microscopes ont été mises sous forme de poudre, de lames minces et en sections polies.

4.3.3.1.1. Description du microscope optique

Dans sa configuration la plus simple, le microscope optique comporte quatre éléments essentiels : une source lumineuse, un condenseur, un objectif et un oculaire. Ces éléments sont fixés sur une potence appelée statif. L'objet posé sur une platine peut être déplacé verticalement par un mouvement rapide et par un mouvement lent. Tous ces éléments sont essentiels. Néanmoins, la partie la plus importante reste l'objectif dont dépend la qualité de l'image à observer, photographier, analyser ou quantifier. Les résultats de cette analyse microscopique ont illustrées ci-dessous [78].

La composition minéralogique et les textures minérales peuvent être déterminées grâce au microscope optique en lumière polarisée et en lumière transmise (pour les minéraux transparents) ou réfléchi (pour les minéraux opaques, principalement sulfures, métaux natifs et oxydes métalliques). Les échantillons peuvent être observés en lame mince (minéraux transparents) ou en section polie (minéraux opaques). Afin d'étudier les deux types de minéraux conjointement grâce au même support, l'usage de la lame mince polie se généralise, développée aussi pour l'analyse par faisceaux d'électrons MEB. Les lames minces sont particulièrement utiles pour identifier les textures et altérations des minéraux. Cependant, pour certains minéraux, il est possible de les confondre à cause de propriétés optiques voisines, la seule observation au microscope optique ne suffit donc pas dans ce cas [78].

4.3.3.1.2. Observation au microscope optique à lumière naturelle et polarisée

Les observations microscopiques à lumière naturelle et polarisée ont été effectuées au niveau du laboratoire génie minier de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) et le laboratoire de l'Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE (USTHB) à Alger, sur des microscopes de type : Optika et Carl Zeiss (figure 4.13), ce dernier utilise la lumière réfléchi pour l'identification des minéraux opaques en section polie, et en lumière transmise utilisés pour l'étude des minéraux transparents en lame mince. Une caméra connectée à un ordinateur permet une capture directe des photos.

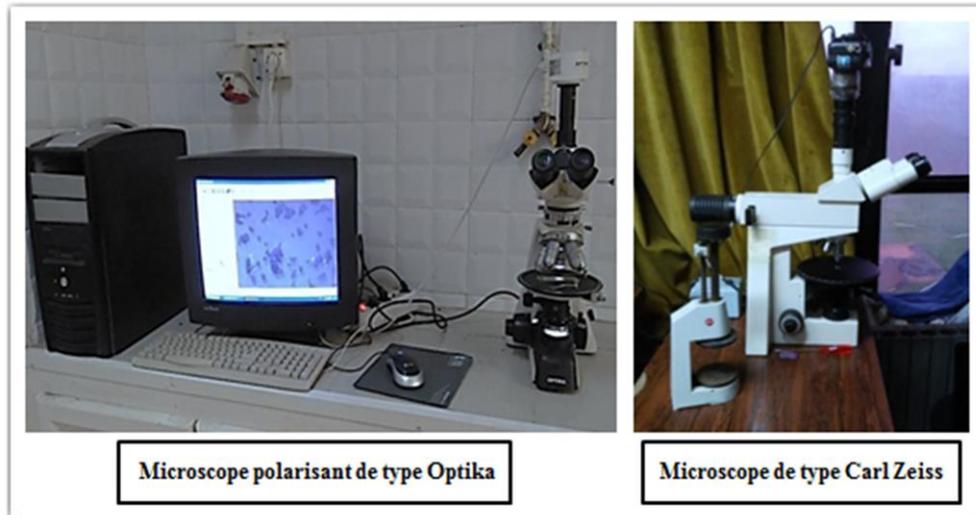


Figure 4.13 : Microscope optique.

La photo microscopique (a) montre les particules de l'hématite partiellement libérées de la gangue, par contre, dans la tranche granulométrique (-0.5 +0.25) mm est presque libérée de la gangue (Gangue : quartz, calcaire et gypse) figure 4.14.

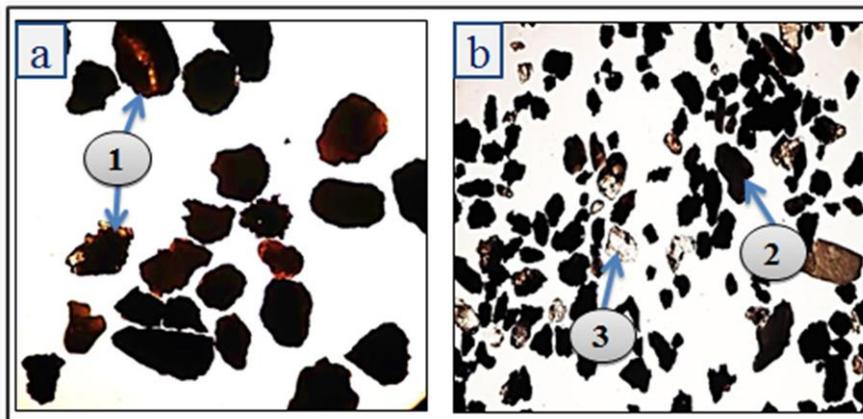


Figure 4.14 : Résultats d'observation sous microscope optique à lumière naturel
a. Tranche granulométrique (-2 +1) mm. G. X 20. 1. Particules mixtes.
b. Tranche granulométrique (-0.5 +0.25) mm. G. X 20. 2. Fer ; 3. Gangue.

La lumière polarisée est largement utilisé pour l'observation des minéraux, elle permet d'obtenir une visualisation en couleurs, permet aussi, une visualisation de la structure interne des particules. Celles-ci dépendant des propriétés optiques des objets observés. Le polariseur est placé entre la source lumineuse et la préparation; il peut tourner dans une bague de façon à être orienté à volonté. L'analyseur est situé entre l'objectif et l'oculaire; il peut être mis en place ou enlevé [78]. Les résultats d'observations faites au microscope optique à lumière polarisée des tranches granulométrique réalisée par tamisage à sec sont représentés dans la figure 4.15. Ils montrent clairement la présence du quartz.

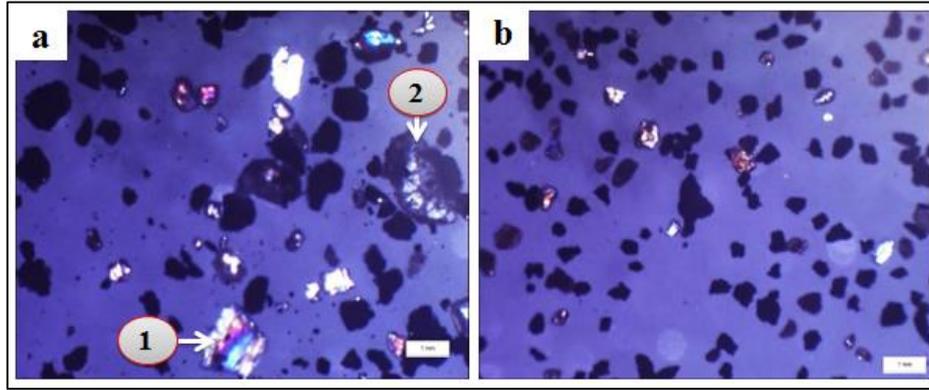


Figure 4.15 : Résultats d'observation au microscope polarisant (G X 20)
 (a) échantillon du gîte C (-2 +1) mm; (b) échantillon stock stériles S (-0,5 + 0,25) mm
 1. Quartz ; 2. particule mixte.

4.3.3.1.3. Observation des sections polies au microscope optique à lumière réfléchi

Les sections polies ont été analysées au microscope optique de type Carl Zeiss muni d'une caméra permettant la prise de photo des échantillons a observés. Cette analyse nous permet d'avoir une vision globale des différentes espèces minérales et les reliefs des grains existants dans l'échantillon.

4.3.3.1.3.1. Etapes de la préparation des sections polies

Les échantillons de minerai que l'on désire étudier au microscope à réflexion doivent tout d'abord être mis sous forme de sections polies, La réalisation de la section polie est élaborée on suivant un protocole précis dont les principales opérations sont :

- **Sciage :** On commence par découper dans l'échantillon, à l'aide d'une scie diamantée, des talons de quelques millimètres d'épaisseur (figure 4.16). Cette étape a été effectuée au laboratoire génie minier de l'ENP – Alger.
- **Polissage :** La préparation de la surface de l'échantillon est d'une importance primordiale pour la section polie. Les échantillons sont polis mécaniquement avec une polisseuse équipée de plusieurs disques abrasifs pour enlever la zone écrouie mécaniquement, Cette opération s'effectue par des passages successifs sur des abrasifs diamantés de plus en plus fins. Ils sont suivis par un drap de polissage afin de donner une certaine bruyance à la surface à observer (figure 4.16). Cette étape a été effectuée au laboratoire métallurgie de l'université d'Annaba.



Figure 4.16 : à gauche ; scie avec lame diamantée, Polisseuse Conforme au Décret 92 767 du Juillet 1992 ; à droite ; minerai de fer découpé. PRESI – TR VERNOLLES ;
 - Type : MINITECH 233 ;
 - Tension : 230 VAC 50-60 Hz ;

L'observation des sections polies au microscope optique de type Carl Zeiss, a montré la présence de différents minéraux tels que l'hématite (phase claire) et les minéraux de gangue (phase sombre). C'est de l'hématite dans et autour des cristaux de la calcite « Forme squelettique » figure 4.17.

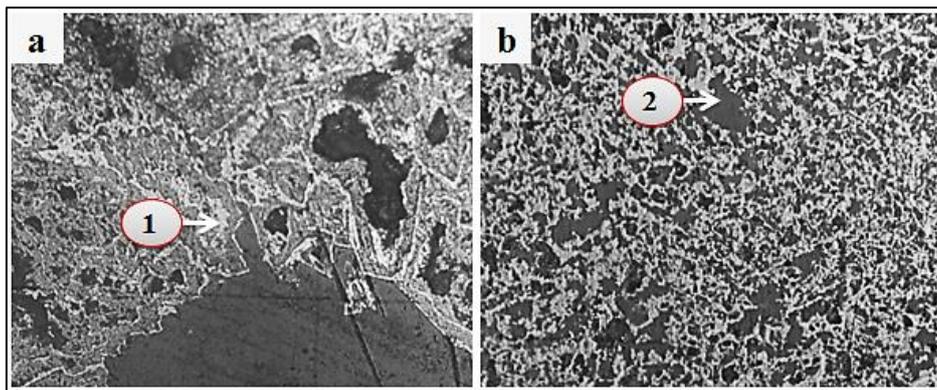


Figure 4.17 : Résultats d'observation au microscope à lumière réfléchie LA, (G. X 20)
 (a) échantillon du gite C ; (b) échantillon stock stérile S. 1- Fer ; 2- gangue

4.3.3.1.4. Observation des lames minces au microscope optique à lumière transmise

Une lame mince de roche est une préparation qui présente sur une lame de verre, une mince couche d'une roche à observer. Ces préparations sont obtenues par amincissement d'un échantillon de roche préalablement collé sur une plaque de verre, pour ne laisser qu'une épaisseur de 30 micromètres environ. La préparation est alors transparente ce qui permet son observation au microscope optique, soit en lumière naturelle, soit en lumière polarisée. La réalisation de la lame mince est élaborée on suivant un protocole précis dont les principales opérations sont (figure 4.18) :

- Sciage de l'échantillon à la scie diamantée pour obtenir un morceau de quelques millimètres d'épaisseur et de la taille d'un morceau de sucre environ ;
- Rodage de la surface à coller (aplanissement par usure progressive grâce à un abrasif) ;

- Collage de l'échantillon sur plaque de verre ;
- Sciage de la préparation à la scie diamantée pour réduire son épaisseur à environ 1 à 2 mm ;
- Mise à l'épaisseur de la lame mince par la rectifieuse ;

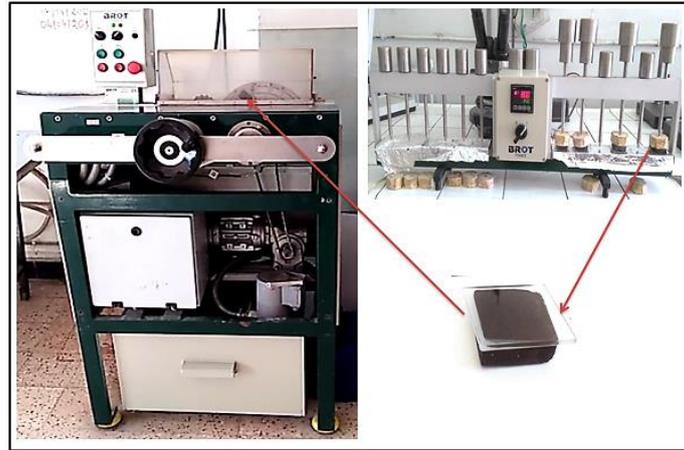


Figure 4.18 : À gauche rectifieuse. À droite, collage de l'échantillon sur plaque de verre.

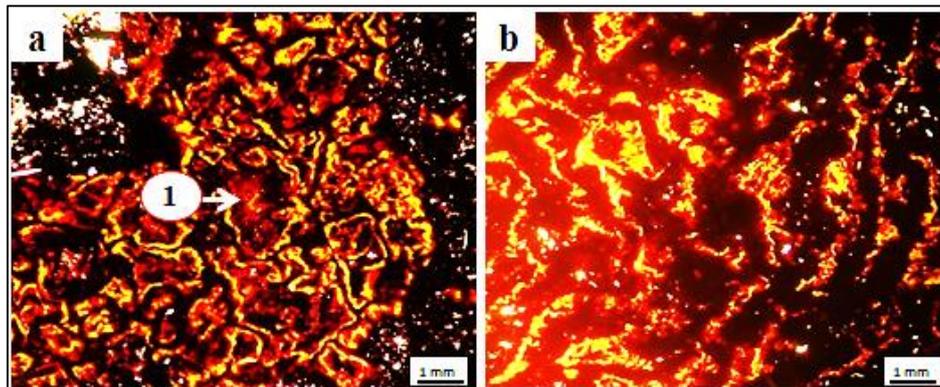


Figure 4.19 : Microphotographies en LPA (G.X 20) des lames minces, a- hématite saine en nodules auréolées de limonite (C) ; b- hématite saine rubanée à bordure altérée en limonite (S). 1. Nodule d'hématite.

On voit clairement dans les deux images l'altération de l'hématite en limonite, ce qu'est transparent représente les minéraux de gangue (quartz, carbonates) et des vides figure IV.19.

4.3.3.2. Observation au microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) est devenu un outil fondamental dans la recherche scientifique, car il permet d'étudier la morphologie et la composition élémentaire chimique des matériaux, qui consiste à bombarder un échantillon solide avec un faisceau primaire d'électrons et qui va balayer la surface de l'objet à observer [82]. Il est essentiellement une technique d'imagerie, utilisent comme véhicule de l'information, non pas la particule lumière, le photon, mais l'électron. Les observations par le MEB et les analyses de spectromètre à dispersion d'énergie des photons (EDS) sont effectuées au niveau du laboratoire de l'école nationale supérieure des mines et de la métallurgie d'Annaba sur un microscope électronique de type QUANTA 250 figure 4.20.



Figure 4.20 : Microscope électronique à balayage QUANTA 250.

4.3.3.2.1. Principe de la microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière (figure 4.21). Elle consiste à bombarder un échantillon solide avec un faisceau primaire d'électrons, et qui va balayer la surface de l'objet observé [83].

Le faisceau primaire d'électrons va pénétrer en surface de l'échantillon, et cette interaction est à l'origine de l'émission de plusieurs types de signaux [84]. Les principaux signaux habituellement analysés sont les suivants (Figure 4.22) :

- Les électrons rétrodiffusés, qui sont les électrons primaires réfléchis par la matière, qui vont générer essentiellement un contraste basé sur la composition chimique (numéro atomique moyen de la zone analysée) ;
- Des électrons secondaires, qui sont les électrons des atomes de l'échantillon excités par le faisceau primaire et arrachés par ionisation, et qui vont générer un contraste surtout basé sur la topographie de la zone analysée (microstructure) ;
- Des photons X (électron Auger) émis suite à l'excitation des couches électroniques profondes des atomes de l'échantillon, suivis par une désexcitation radiative ; ces photons sont exploités par la micro-analyse, le plus souvent en spectroscopie à dispersion d'énergie.

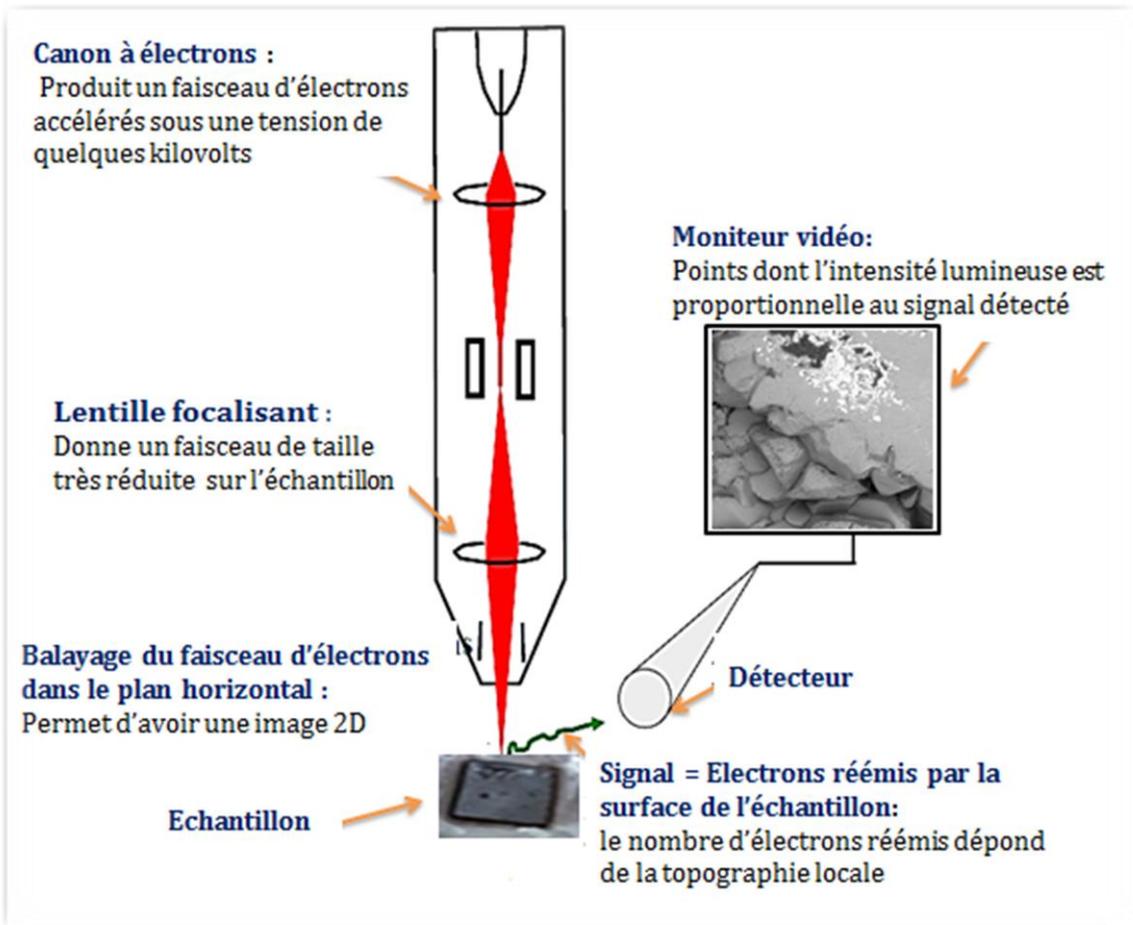


Figure 4.21 : Principe de fonctionnement général du MEB

Ses types de signaux sont ensuite générés suite à l'interaction du faisceau d'électrons avec l'échantillon et sont captés par différents détecteurs. Les électrons Auger eA possèdent une très faible énergie et sont rarement captés. Les électrons secondaires eS permettent d'obtenir des informations sur la surface de l'échantillon, les électrons rétrodiffusés eR permettent d'obtenir des informations d'homogénéité chimique, la quantité d'électrons rétrodiffusés dépend du numéro atomique des atomes constituant les phases de l'échantillon. Les composés formés d'atomes au numéro atomique Z élevé produisent davantage d'électrons rétrodiffusés et seront plus brillants sur les images résultantes. Les rayons X seront détectés par un (ou plusieurs dans le cas des systèmes de minéralogie automatisée) détecteurs EDS. Les spectres obtenus permettent d'obtenir des informations sur la composition chimique [84].

Ces différents signaux sont détectés par des dispositifs associés au microscope et sont convertis en image. Les photons X émis sont collectés par un détecteur EDS et classés en fonction de leur énergie. L'analyse quantitative est basée sur la comparaison de l'intensité élémentaire de l'échantillon avec celle d'un échantillon témoin. La figure ci-dessous illustre les différentes interactions faisceau primaire et l'échantillon d'après Mermillod-Blondin [83].

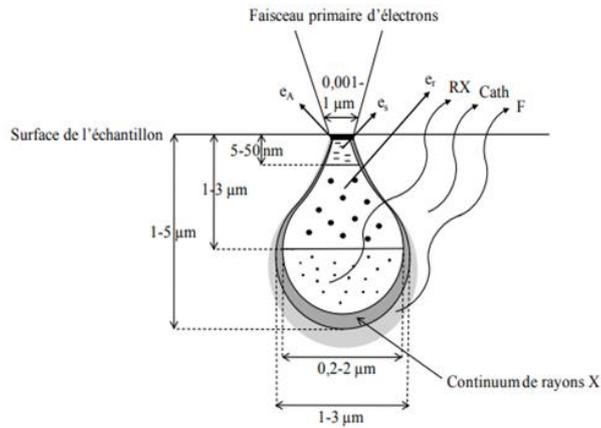


Figure 4.22 : Schéma simplifié des interactions faisceau primaire-échantillon (e_A : électrons Auger ; e_s : électrons secondaires ; e_r : électrons rétrodiffusées ; RX : rayons X ; Cath : cathodo luminescence ; F : fluorescence X secondaire) [85].

IV.3.3.2.2. Résultats et traitement des images issues des observations au MEB

Afin de bien approfondir sur les résultats obtenus précédemment au microscope optique de la section ploie, on a effectués des observations approfondi en utilisant le MEB et un système EDS pour les analyses semi-quantitatives. Les résultats d'observation sont illustrés ci-dessous figures 4.23 et 4. 25.

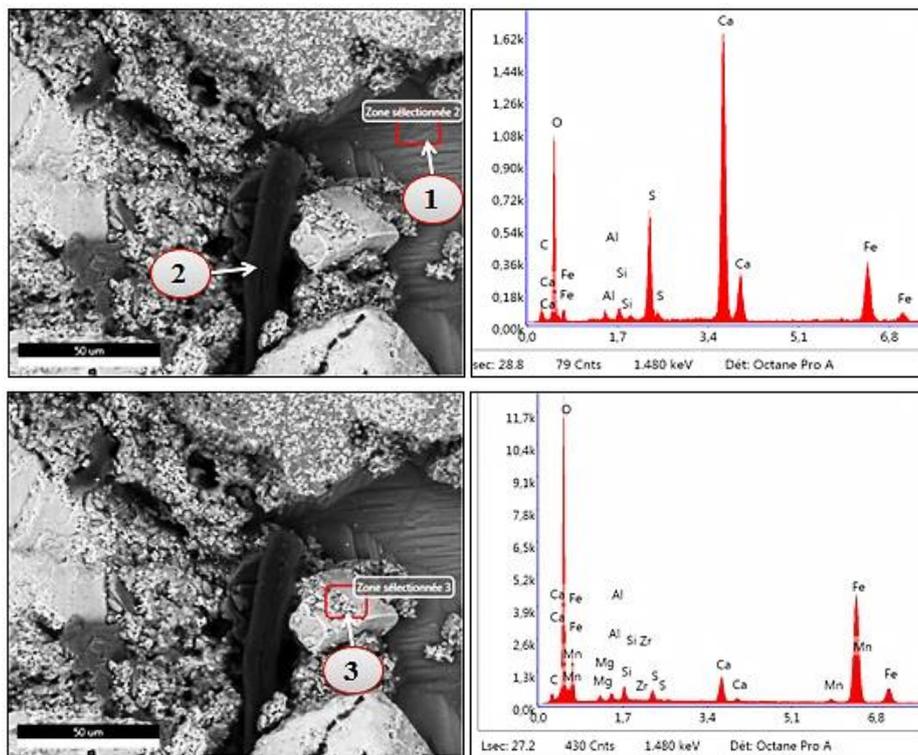


Figure IV.23 : Microphotographie prise sur l'échantillon du gîte C.
1. Calcite ; 2. Matière organique; 3. Hématite

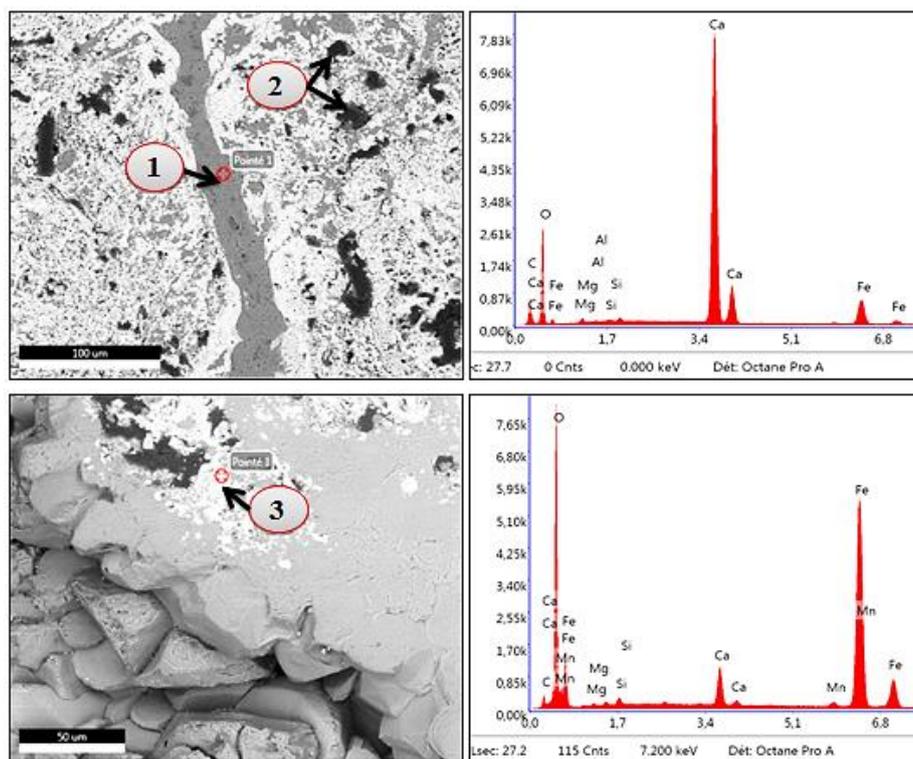


Figure 4.24 : Microphotographie prise sur l'échantillon du stériles S.
1. Veinule de Calcite; 2. Pores; 3. Hématite.

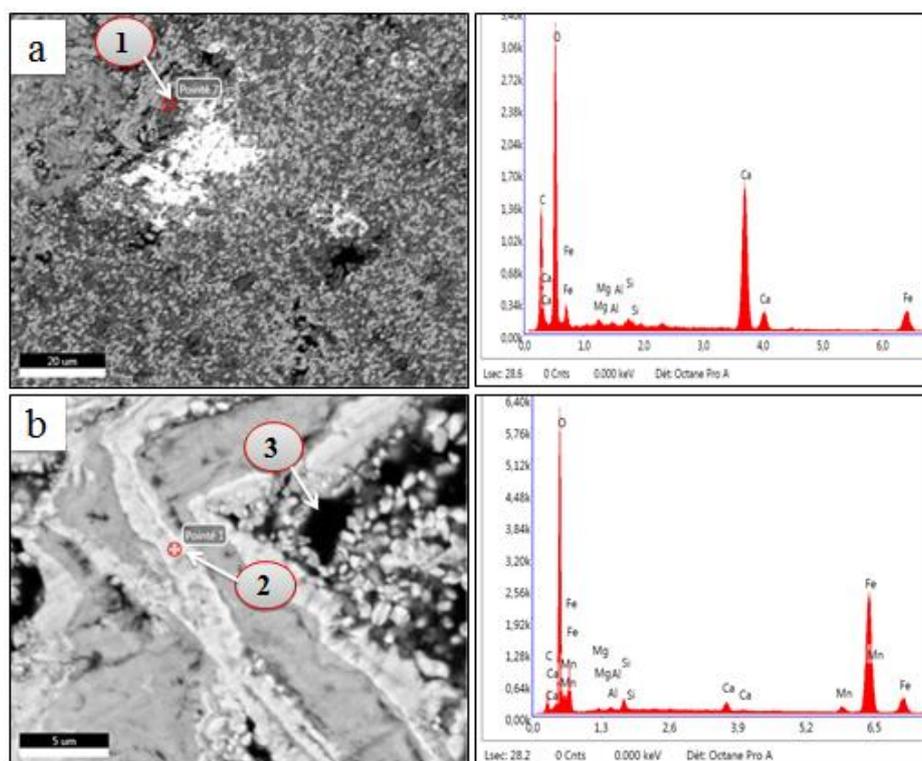


Figure 4. 25 : Microphotographies des lames minces a. échantillon C, b- échantillon S
à droite : spectre EDS.1. Carbonates ; 2. Hématite ; 3. Pore.

4.3.3.2.3. Interprétation des résultats d'observation au MEB

Le microscope électronique à balayage nous permet d'effectuer des observations approfondies, d'après les microphotographies (figure 4.23, 4.24 et 4.25). Il apparaît clairement l'existence de deux phases principales, la phase claire est essentiellement composée du fer, et la phase sombre constituée des carbonates. Cette observation couplée à une micro-analyse chimique semi-quantitative (EDS) a montré une composition chimique diversifiée, constituée principalement des éléments suivants : Fe, Si, Al, Ca, Mg, Mn et O, on constate aussi, la présence de plusieurs éléments en trace tel que : S, Cl et C. La quantité importante d'oxygène détectée dans tous les échantillons revient au fait qu'il intervient dans la composition de plusieurs oxydes. La présence de la silice et de l'alumine témoigne de la présence d'une fraction argileuse, enfin, la présence du Calcium et Magnésium signifient la présence des carbonates.

4.3.3.3. Caractérisation minéralogique par diffraction aux rayons X

Les analyses par diffraction des rayons X (DRX) sont effectuées à l'université de Blida 2, Département de chimie, où les échantillons sont mis sous forme de poudres. Cette méthode d'analyse est basée sur la diffraction des rayons X par la matière. Les diffractogrammes sont traités avec le logiciel HighScore PlusV3.0d.2013.

4.3.3.3.1. Principe de la diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est considérée parmi les méthodes les plus importantes de caractérisation minéralogique des minerais, utilisée pour identifier les phases minérales, elle est relativement rapide et simple. Elle fut développée par le père et fils Bragg à partir de 1912. C'est une technique physico-chimique d'analyse des solides cristallisés, la technique est basée sur la diffraction des rayons X par la matière, le faisceau de rayons X va être dispersé au contact du matériau, les rayons réfractés sont collectés. La mesure des angles et l'intensité des rayons ainsi que l'utilisation de la loi de Bragg permettent l'élaboration d'un diffractogramme. Chaque matériau pur possède sa propre signature, cette technique permet donc de distinguer deux solides ayant la même formule brute [86].



Figure 4.26 : DRX de type D2 PHASER, marque BRUKER

À chaque phase cristalline correspond un ensemble caractéristique de pics de diffraction. Cette signature unique permet la caractérisation et l'identification des phases en comparant les pics obtenus avec une base de données. Leur quantification s'effectue alors grâce à une décomposition mathématique utilisant la méthode des moindres carrés pour approcher au mieux le spectre obtenu [87]. Les méthodes basées sur la diffraction des rayons X ont l'avantage de fournir une quantification directe des minéraux d'un échantillon sans passer par l'analyse en éléments chimiques. Cependant, sa limite de détection des phases minérales est relativement élevée (environ 1% massique). De plus, le matériel doit être au préalable micronisé afin d'atteindre une granulométrie dont 95% des particules sont inférieures à 10 μm [78].

4.3.3.3.2. Loi de Bragg

La diffraction des rayons X repose sur la loi de Bragg, elle est régie par la même loi de réflexion avec une condition restrictive du fait de la pénétration en profondeur des photons X. Considérons un faisceau de rayons X qui tombe sur un cristal (figure 4.27). Les rayons X pénètrent dans le cristal. Chaque plan cristallin peut réfléchir le faisceau, les photons réfléchis par les différents plans seront réémis dans la même direction de réflexion si la distance temporelle qui sépare les plans considérés correspond à un nombre entier de fois la période [87].

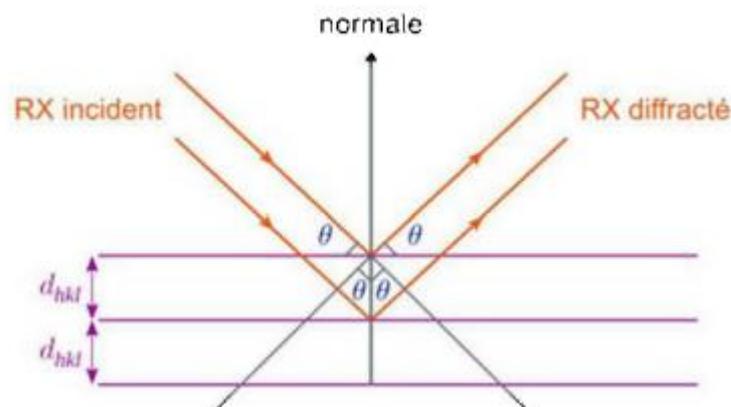


Figure 4.27 : Loi de Bragg, diffraction des rayons X incidents d'une longueur d'onde λ . donnée selon un angle θ .

4.3.3.3.3. Résultats de l'analyse par le DRX

Les résultats d'analyses minéralogique par diffraction des rayons X ont révélé que le gîte C est similaire à celui du stock du stériles S, ils sont constitués de trois phases minérales, elle s'agit de l'hématite en tant que principal minéral d'oxyde opaque et de la silice ainsi que des carbonates forment les minéraux de gangue dans le minerai [88].

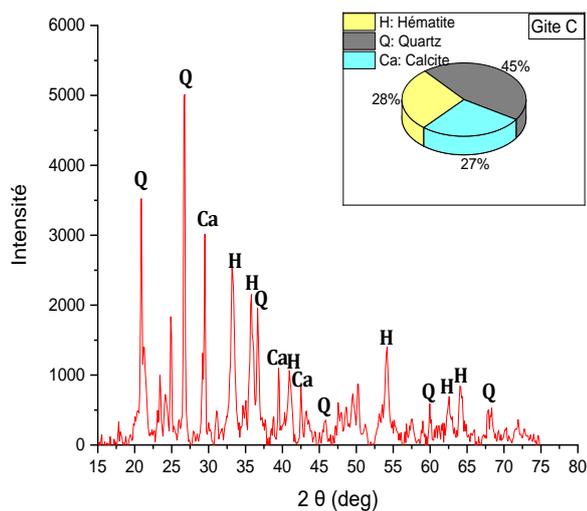


Figure 4.28 : Spectre DRX du gite C

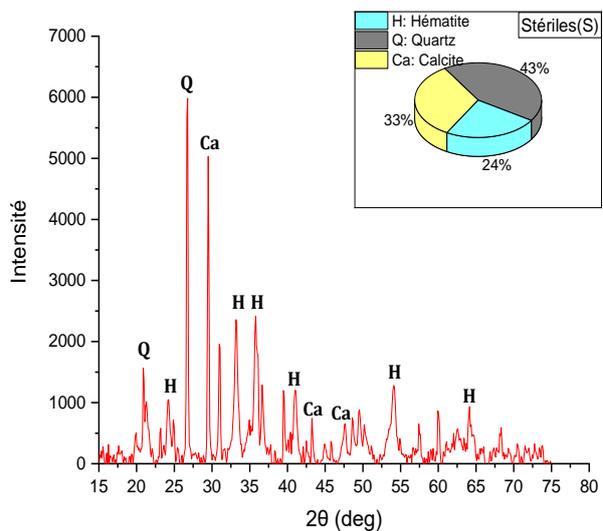


Figure 4.29 : Spectre DRX du stériles S

4. 4. Conclusion

Les résultats d'analyse physico-chimique par fluorescence des rayons X montrent que les gites (A) et (B) sont riches en substance utile, par contre le gite (C) et le stock du stériles (S) sont pauvres. Sur l'ensemble des gites A, B, C et le stock du stériles S, les teneurs en Fe_2O_3 sont respectivement : 55,13 % ; 58,67 % ; 36,15 % et 32,37 %. De ce fait, notre recherche est portée seulement sur les deux derniers. Les résultats d'analyses granulochimiques montrent que la maille de libération du fer est comprise entre (-0,5 +0,063) mm.

D'après les microphotographies obtenues des observations optiques et le microscope électronique à balayage, il apparaît clairement l'existence de deux phases principales, la phase claire est essentiellement composée du fer, la phase sombre constituée des carbonates et du quartz. Les études minéralogiques par DRX ont révélé que le minerai de fer de Khanguet est constitué de trois phases minérales, il s'agit de l'hématite (Fe_2O_3) en tant que principal minéral d'oxyde opaque et du quartz (SiO_2) ainsi que des carbonates (CaCO_3) forment les minéraux de gangue dans le minerai.

CHAPITRE 5

**Essais de valorisation du minerai de fer de la mine
de Khanguet**

5.1. Introduction

L'activité minière a pour but de répondre et satisfaire la demande des industries en minéraux et en métaux afin de développer plusieurs secteurs d'activité et d'améliorer la qualité de vie de la population. Le traitement des minéraux est un ensemble de méthodes et de processus de traitement des minerais afin de concentrer les composants précieux dans les produits conditionnés en éliminant la gangue. Lors de l'enrichissement des minerais, les tâches principales suivantes peuvent être résolues: la teneur en composant utile de la matière première augmente ; la plupart des impuretés sont éliminées de la matière première ; l'homogénéité du produit fini en termes de taille et de composition chimique est atteinte.

La mine de Khanguet est classée parmi les plus anciennes mines de fer exploitées en Algérie, les premiers travaux d'exploitations ont commencé en 1917, ces derniers génèrent l'épuisement des réserves riches en fer d'une part, d'autre part, génèrent des déchets miniers qui ne sont pas uniquement un problème environnemental, mais aussi une perte économique. À cet effet, le travail est porté sur le traitement du minerai à faible teneur et les stériles qui sont stockés à proximité de la mine.

Les échantillons prélevés du gîte C et du stock des stériles ont subi une série d'opérations de préparation mécanique (concassage, homogénéisation, quartage et broyage), de caractérisation minéralogique et chimique, suivi par des essais de traitement (magnétique et électrostatique). L'objectif de ce travail repose sur l'étude de la faisabilité et de l'efficacité du procédé de la séparation magnétique à haute intensité et la séparation électrostatique à effet corona pour le traitement du minerai de fer pauvre et les stériles de la mine de Khanguet.

5.2. Méthodes d'enrichissement du minerai de fer et les stériles de la mine de Khanguet

Les principaux processus d'enrichissement comprennent les processus physiques et physico-chimiques de séparation des minéraux, dans lesquels les minéraux utiles sont libérés dans des concentrés et les rejets dans des résidus. Les processus de séparation des minéraux lors du traitement sont très nombreux et sont classés selon leurs appartenances à telle ou telle méthode d'enrichissement, la caractéristique de séparation, la nature des forces de séparation et la conception de l'appareil. Les méthodes d'enrichissement sont classées en fonction des propriétés des minéraux utilisés comme signe de séparation et des principales forces de séparation.

5.2.1. Enrichissement par le procédé de la séparation magnétique

La technique de la séparation magnétique vise généralement à séparer les minéraux ferromagnétiques des paramagnétiques et diamagnétiques avec différentes intensités de champ magnétique. Le comportement des minéraux dans un champ magnétique réside dans la susceptibilité magnétique du matériau à séparer [89].

Les machines utilisées pour la séparation magnétique sont appelées séparateurs magnétiques (figure 5.1). Le principe de fonctionnement d'un séparateur magnétique est simple, lorsqu'un flux de particules de minerai traverse en continu un champ de force magnétique, les particules magnétiques sont attirées vers la source de force magnétique tandis que les éléments non magnétiques ne sont pas attirés [90].

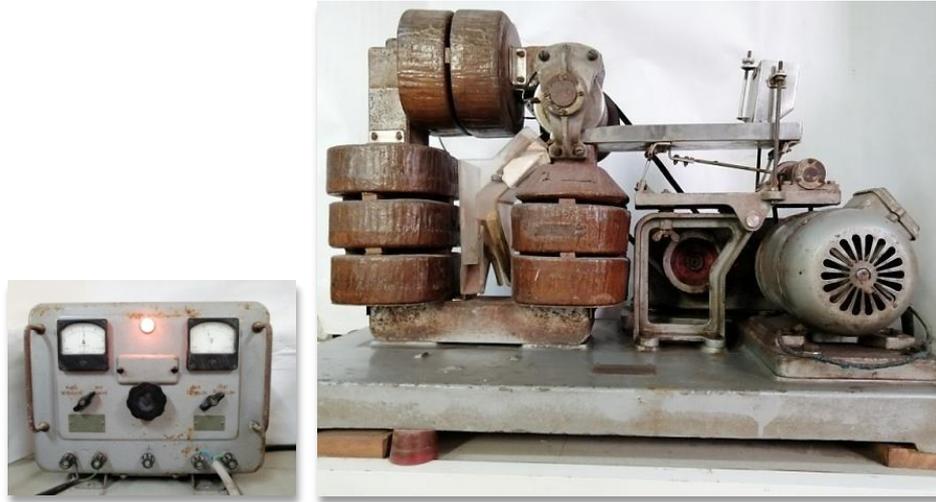


Figure 5.1 : Séparateur magnétique à haute intensité (SMHI) voie sèche

5.2.1.1. Conditions d'application et paramètres variables des essais réalisés par le procédé de la SMHI en voie sèche.

Le séparateur magnétique utilisé est constitué d'une boîte d'alimentation, un alimentateur vibrant et trois bobines électromagnétiques liées à un régulateur de l'intensité du courant et de tension, ces bobines offrent une densité de flux magnétique variable, ainsi que deux sorties, l'une de produit magnétique et l'autre de produit non magnétique. Les essais d'enrichissement ont été menés avec les paramètres suivants : Tension du courant électrique variable ; la granulométrie des particules est variable ; Humidité : 2 % ; Température ambiante : 25° C. Les essais de traitement ont été réalisés au niveau du laboratoire de génie minier, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

L'analyse par la fluorescence des rayons X est considéré comme une technique l'analyse chimique, il nous permet d'identifier et de déterminer qualitative et quantitative de la composition élémentaire d'un échantillon sous forme de poudre [79]. Les analyses FRX ont été effectuées au centre de recherche nucléaire de Birine, wilaya de Djelfa. Les résultats des essais de séparation magnétique à haute intensité du minerai de fer du gîte C et les stériles de la mine sont regroupés dans le tableau 5.1 ci-après.

Tableau 5.1 : Récapitulation des résultats des essais de traitement par SMHI.

Tranche (mm)	Intensité (A)	Susceptibilité Magnétique	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	γ (%)
-1 +0.5	7	Magnétique	58.14	6.78	15.87	0.87	8.78	65.51
		Non-magnétique	9.02	25.94	24.04	0.96	6.45	34.49
	10	Magnétique	58.32	6.51	15.09	0.67	8.44	64.99
		Non-magnétique	8.85	24.66	25.17	0.40	7.13	35.01
	13	Magnétique	59.40	6.55	14.78	0.71	8.45	64.26
		Non-magnétique	7.92	24.98	23.01	0.54	6.80	35.47
-0.5 +0.25	7	Magnétique	62.24	5.40	12.70	0.64	6.83	63.04
		Non-magnétique	4.77	21.39	21.17	0.88	5.25	36.96
	10	Magnétique	62.46	5.18	11.88	0.69	7.56	63.13
		Non-magnétique	4.25	22.14	23.20	0.91	5.53	36.87
	13	Magnétique	65.75	5.21	12.47	0.56	7.42	60.77
		Non-magnétique	2.65	23.15	23.45	0.74	5.66	39.23
-0.25+0.125	7	Magnétique	64.31	4.50	12.24	0.49	7.47	60.82
		Non-magnétique	4.81	23.12	18.82	0.85	4.95	39.18
	10	Magnétique	65.49	4.14	11.61	0.37	7.38	58.78
		Non-magnétique	6.08	21.53	23.60	0.60	5.50	41.22
	13	Magnétique	65.92	4.71	12.06	0.44	7.64	60.88
		Non-magnétique	2.21	22.19	18.80	0.73	4.26	39.12

Les résultats des tests de la valorisation par le procédé de la séparation magnétique à haute intensité en variant l'intensité du courant électrique et la dimension des particules à séparer (tableau 5.1) montrent que la teneur maximum en hématite (65 %) est obtenue pour une intensité du courant de 13 Ampère avec la tranche granulométrique de (-0.5 +0.125) mm. C'est un procédé adéquat pour l'enrichissement. On peut conclure donc que le traitement du minerai de fer et les stériles de la mine de Khanguet par le procédé de la SMHI donne des bons résultats avec les particules de dimension (-0.5 +0.125) mm en appliquant d'une intensité du courant électrique 13 A.

5.2.1.2. Schéma proposé de traitement par le procédé magnétique

L'affinité de notre travail de recherche est l'élaboration d'un schéma technologique de traitement du minerai de fer pauvre et les stériles de la mine de Khanguet. Le schéma proposé est composé principalement de trois parties :

- La première partie, concerne les étapes essentielles de préparation mécanique (concassage criblage et broyage), la préparation mécanique est conditionnée par la nature et la morphologie du minerai ;
- La deuxième étape est celle du prétraitement par le lavage, afin d'éliminer les fines particules, principalement les argiles.
- La dernière étape, c'est le traitement minéralurgique en utilisant le procédé de la séparation électrostatique.
- d'après les résultats de traitement, on a réussi à augmenter la teneur en hématite, d'abord de 35 à 41 % juste par le lavage, ensuite de 41 à 66 % par la séparation magnétique, c'est-à-dire une augmentation de 31 % au total. Donc, l'objectif est atteint. Au-delà de 66 %. c'est le domaine de la métallurgie qui va intervenir.

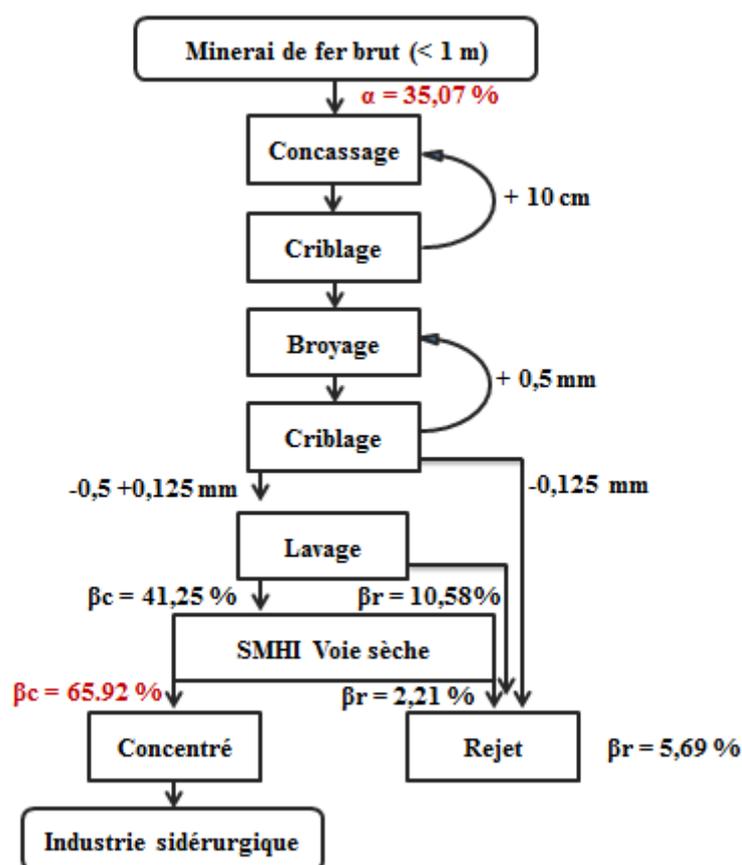


Figure 5.2 : Schéma proposé de traitement par le procédé magnétique

5.2.2. Enrichissement par le procédé de la séparation électrostatique à effet corona

Le procédé de séparation électrostatique à effet corona est actuellement utilisé pour le traitement des minerais, le recyclage des matériaux ou le conditionnement des produits agricoles [91, 92], il tire profit de la différence de conductivité électrique qui existe entre les matériaux afin d'accomplir leur séparation [93]. Il existe plusieurs types de séparateurs et la

différence est due au mode de mise en charge, un système d'attraction ou de répulsion proportionnel à cette charge permet leur séparation.

5.2.2.1. Principe de fonctionnement du procédé électrostatique à effet corona

Le séparateur électrostatique à tambour est composé d'un cylindre mis à la terre et de charge positive, d'une électrode ionique de charge négative et d'une électrode statique de charge négative (figure 5.3). Les particules constituant l'alimentation tombent sur le cylindre qui tourne avec une vitesse contrôlée (débit réglable) et passent à travers un faisceau d'ions mobiles en provenance de l'électrode ionique reliées à un générateur de haute tension [49].

Le mélange particulaire à séparer est acheminé sur la surface du tambour et traverse le champ électrique, ce dernier, est produit entre ce tambour et une ou plusieurs électrodes reliées à un générateur de haute tension, les particules sont chargées artificiellement à l'aide d'un courant électrique établi entre une électrode corona et le tambour en mouvement de rotation mise à la masse. L'électrode corona est disposée parallèlement à la largeur du tambour [51]. L'électrode corona émet des ions, généralement des électrons. À sa proximité, les gaz s'ionisent du même signe que les électrons, puis se dirigent vers le tambour mis à la masse. Les particules qui sont transportées par le tambour en rotation sont toutes chargées négativement par les gaz ionisés. Le comportement du mouvement des particules est différent en raison de leur extrême différence de conductivité électrique, qui fournit une excellente condition pour la mise en œuvre de la séparation électrostatique à effet corona (tableau 5.2) [50, 51]. Pour les particules conductrices, aussitôt acquise la charge est perdue au profit du tambour. Pour, les particules non conductrices, la charge acquise est retenue presque indéfiniment, une brosse est nécessaire pour retirer certaines particules non conductrices du tambour en rotation (figure 5.3).

Tableau 5.2 : Minéraux conducteurs et non-conducteurs [50].

Conducteur		Non-conducteur	
Pyrite	Anastase	Amphibole	Kaolinite
Arsénoxyrite	Pyrochlore	Anhydrite	Malachite
Rutile	Bornite	Apatite	Monazite
Sphalérite	Cassitérite	Barytine	Olivine
Spinelles	Chalcopyrite	Calcite	Pyrolusite
Wolframite	Chromite	Cérussite	Pyroxène
Hématite	Columbite	Chrysolite	Quartz
Ilménite	Galène	Corindon	Scheelite
Magnétite	Graphite	Feldspath	Sidérite
Molybdénite		Fluorine	Sylvite
		Zircon	Talc
		Gypse	Vermiculite
		Wollastonite	

L'utilisation des équipements de séparation électrostatique à effet corona est appropriée pour les particules dont la taille est comprise entre 60 et 500 μm et une différence de conductivité électrique entre les matériaux. Cependant, la capacité diminue considérablement

pour les particules de 75 μm et moins [94]. Les matériaux à traiter doivent être impérativement secs, car la présence d'humidité altère le comportement des particules.

Les paramètres variables du processus de la séparation électrostatique à tambour peuvent être mécaniques (vibro-transporteur, cylindre et collecteur), matière (conductivité des particules, forme et dimension des particules, densité volumique), environnemental (température, humidité et poussières) et électrique (électrode actives, électrode de neutralisation et haute tension) [95, 96].

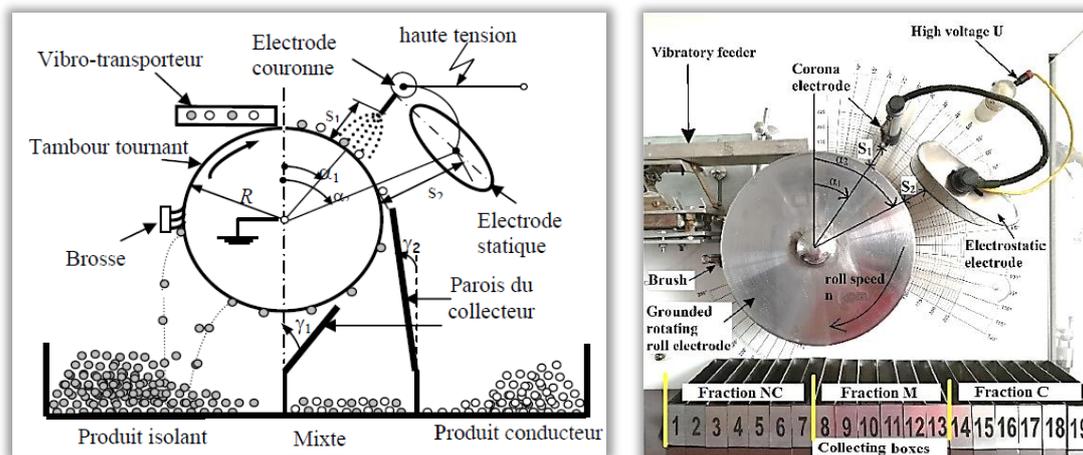


Figure 5.3 : (a) Variable d'un procédé de séparation électrostatique à effet couronne [97].
(b). Séparateur électrostatique à tambour (effet couronne) [98].

5.2.2.2. Effet couronne du séparateur électrostatique

Il existe plusieurs configurations d'électrodes couronnes (figure 5.4), ils sont fixés sur un support cylindrique en métal connectés à un générateur de haute tension continue et charge les particules par bombardement ionique. L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans la zone de champ électrique très intense produit à la surface d'une telle électrode à faible rayon de courbure. Les électrodes couronne à fil, par leur facilité de réalisation et leur faible coût de revient, sont les plus appréciés dans l'industrie, mais, la présence de poussières dans les mélanges industriels diminue l'efficacité de telles électrodes [99].

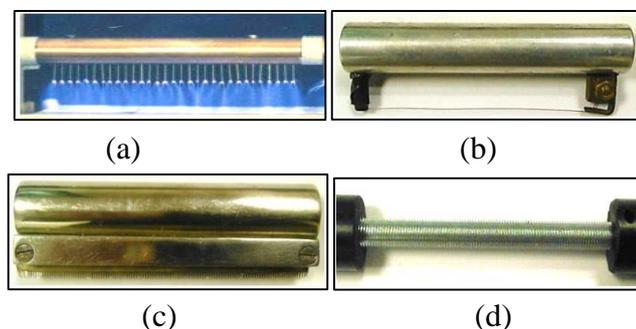


Figure 5.4 : Différentes configurations d'électrodes couronnes. (a) Electrode à pointes (à aiguilles); (b) Electrode à fil; (c) Electrode peigne; (d) Electrode couronne type tige filetée.

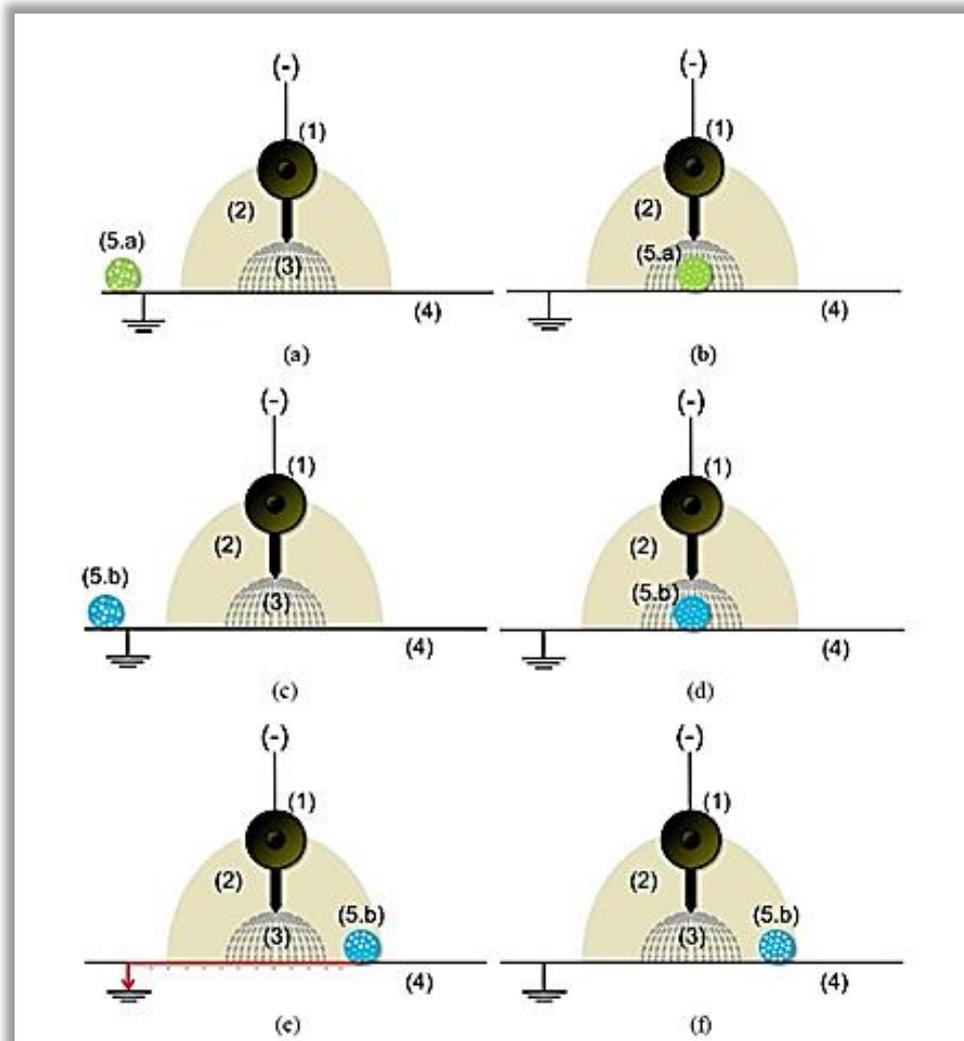


Figure 5.5 : Représentation schématique de l'effet couronne sur une particule non-conductrice (5.a) et conductrice (5.b). (a) Particule non-conductrice initialement neutre ; (b) Particule non-conductrice chargée négativement par l'effet couronne ; (c) Particule conductrice initialement neutre ; (d) Particule conductrice chargée négativement par l'effet couronne ; (e) Ecoulement des charges négatives vers la terre, particule conductrice polarisée par induction électrostatique ; (f) Particule conductrice chargée positivement par induction électrostatique. (1) Electrode couronne ; (2) Zone d'induction électrostatique créé par le support de l'électrode couronne ; (3) Zone de décharge couronne ; (4) Electrode plaque reliée à la terre [50].

Dans la zone de décharge couronne (3), seules les particules non-conductrices sont capables de conserver leurs charges lorsqu'elles sont en contact avec la terre. En dehors de cette zone, les particules conductrices se déchargent rapidement.

5.2.2.3. Forces agissant sur les particules conductrices et non conductrices

La figure 5.6 décrit les forces auxquelles sont soumises les particules conductrices et non conductrices, lorsqu'elles sont en contact avec la surface du tambour en rotation et la zone d'écoulement du courant [51]. Les principales forces agissant sur les particules sont :

a. Forces d'attraction électriques

- **Force du champ électrique** : Agit pratiquement sur les particules conductrices,

$$F_e = Q_{ind} \cdot E \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

E: intensité du champ électrostatique généré par l'électrode statique ;

Q_{ind} : Valeur de la charge acquise de la particule conductrice par induction électrique sous l'action de E ;

- **Force d'attraction électrostatique** : Agit pratiquement sur les particules non-conductrices, entre le tambour mis à la terre de charge positive et les particules chargées négativement.

$$F_{a(i)} = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon d^2} \dots\dots\dots (2)$$

Avec :

Q : charge de la particule acquise par bombardement ionique dans la zone à effet couronne ;

d : distance séparant le centre de la particule et à la surface du tambour ;

b. Forces de répulsion (Forces mécaniques).

- **Force centrifuge** : Elle dépend de la masse de la particule (m), du rayon (r) et la vitesse de rotation du tambour (v)

$$F_{cf} = \frac{m v^2}{r} \dots\dots\dots(3)$$

Avec :

r : rayon du tambour ;

m : masse de la particule ;

v : vitesse de rotation du tambour ;

- **Force d'attraction gravitationnelle**

$$F_g = mg \dots\dots\dots (4)$$

Avec :

m : masse de la particule ;

g : gravitation universelle ;

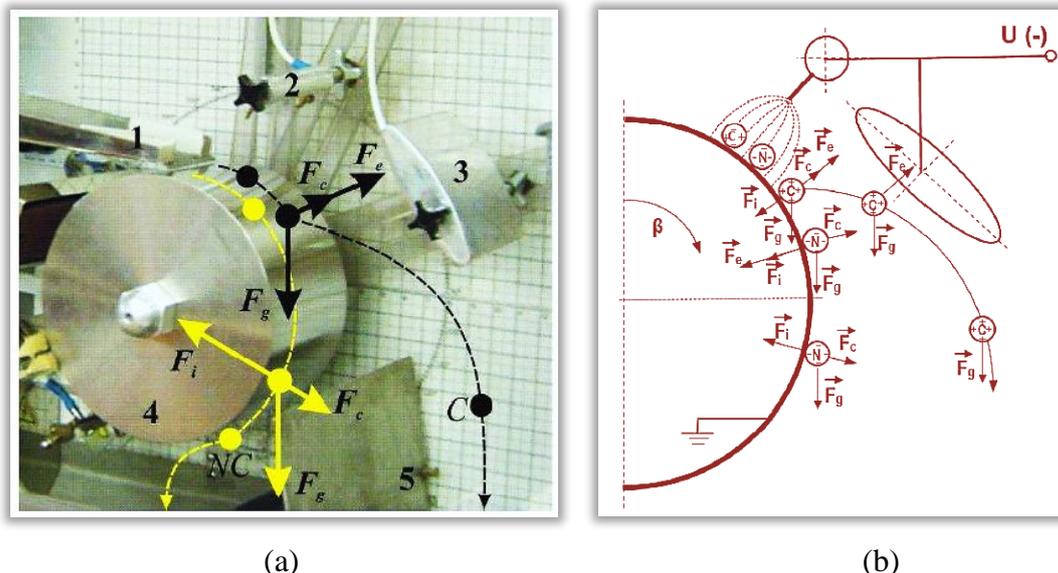


Figure 5.6 : a. Séparateur électrostatique à tambour (électrode ionique). (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode couronne ; (3) Electrode statique ; (4) Electrode cylindrique tournante ; (5) Déflecteur. b. Représentation schématique des forces électrostatiques et mécaniques exercées sur les particules conductrices et non conductrices [98].

5.2.2.4. Essais de traitement du minerai de fer et les stériles de la mine de Khanguet par le procédé électrostatique

Pour pouvoir accéder aux minerais les quantités des stériles extraites de l'exploitation minière de la mine de fer de Khanguet sont considérables et importantes. De ce fait, ils ne sont pas commercialisés et constituent une perte économique pour l'entreprise et même des risques environnementaux, ils représentent une charge financière supplémentaire pour l'entreprise. La production d'un acier de haute qualité nécessite un minerai de fer avec une teneur élevée, ce dernier, est de plus en plus fait rare. Le traitement des stériles et le minerai pauvre de la mine de Khanguet est devenu une priorité car il apporte une valeur ajoutée pour l'entreprise sur tous les plans.

Tenant compte des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques du minerai pauvre et les stériles de la mine de Khanguet, ainsi que le climat aride de la région, des tests sont menés sur le traitement par le procédé de la séparation électrostatique. Les recherches sont menées sur des échantillons pour déterminer les paramètres optimaux de l'effet couronne testés par électrostatique; ces paramètres sont la tension électrique et la vitesse de rotation du tambour.

5.2.2.4.1. Conditions des essais de traitement par le séparateur électrostatique à tambour

Les essais d'enrichissement par le procédé de la séparation électrostatique ont été menés avec les paramètres suivants : Electrode à fil avec une position : $\alpha_1 = 10^\circ$; Electrode statique avec une position : $\alpha_2 = 45^\circ$; Tension électrique : (14 ; 17 ; 20) kV ; Vitesse de rotation du tambour : (40-50-60) rpm ; Granulométrie des particules : (-1 +0.125) mm ; Température : 25°C ; Clapés du séparateur sont réglés pour que le produit initial sera diviser en deux produits (conducteur, non-conducteur).

Les résultats des essais réalisés par le procédé de la séparation électrostatique du minerai de fer de Khanguet (gite C et stériles S) sont représentés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Résultats des essais de traitement par l'électrostatique

Vitesse rotation (rpm)	Tension (KV)	Conductivité	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	IP
40	14	Conducteur	45,58	7,72	15,17	0,01	4,04	1,37	0,51
		Non-conducteur	36,88	9,68	22,02	0,08	4,54	1,44	0,44
	17	Conducteur	46,21	6,67	10,28	0,068	3,49	1,09	0,65
		Non-conducteur	31,52	12,34	26,2	0,123	4,77	1,66	0,47
	20	Conducteur	48,37	6,22	7,02	0,001	3,49	1,04	0,89
		Non-conducteur	34,23	17,68	23,36	0,02	4,57	1,51	0,76
50	14	Conducteur	45,98	6,41	10,33	0,026	3,07	0,98	0,62
		Non-conducteur	29,25	13,54	24,37	0,08	4,92	1,68	0,55
	17	Conducteur	54,30	6,12	6,08	0,01	3,45	0,99	1,01
		Non-conducteur	15,27	15,26	25,05	0,171	4,91	1,69	0,61
	20	Conducteur	58,46	6,48	5,51	0,01	3,29	1,05	1,18
		Non-conducteur	7,41	18,87	27,38	0,182	5,47	2,07	0,69
60	14	Conducteur	45,92	6,51	11,03	0,001	3,46	0,85	0,59
		Non-conducteur	31,56	13,72	21,73	0,05	4,37	1,51	0,63
	17	Conducteur	47,45	5,49	7,08	0,01	3,04	0,99	0,77
		Non-conducteur	30,97	16,26	23,11	0,046	4,29	1,61	0,70
	20	Conducteur	51,59	6,94	6,57	0,01	3,29	0,99	1,06
		Non-conducteur	12,61	17,11	26,84	0,15	4,92	1,66	0,64

D'après les résultats des essais de traitement par le procédé de la séparation électrostatique à effet corona (tableaux 5.4 et 5.5) on remarque que les meilleurs résultats sont obtenus avec les paramètres suivants : Vitesse de rotation 50 rpm et une tension électrique de 20 kV, permettant ainsi d'atteindre des résultats satisfaisants, en terme de teneur en fer est égale à 58,46 %, indice de basicité partiel (IP) égal à 1,18 avec un rendement (γ) de 66,30 % plus une récupération de 93,94 %.

Tableau 5.4 : Rendement, récupération du concentré et du rejet [88]

Vitesse (tr/min)	Tension (kV)	Conductivité	Poids (%)	Fe _t (β) (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Rendement, γ (%)	Récupération, ε (%)
40	14	Conducteur	77,98	31,92	45,58	50,33	55,61
		Non-conducteur	22,02	25,82	36,88	49,67	44,40
	17	Conducteur	70,26	32,36	46,21	66,28	74,24
		Non-conducteur	29,74	22,07	31,52	33,72	25,76
	20	Conducteur	65,46	33,87	48,37	49,70	58,26
		Non-conducteur	34,54	23,97	34,23	50,30	41,74
50	14	Conducteur	66,12	32,2	45,98	71,76	79,98
		Non-conducteur	33,88	20,48	29,25	28,24	20,02
	17	Conducteur	74,28	38,02	54,30	66,59	87,64
		Non-conducteur	25,72	10,69	15,27	33,41	12,36
	20	Conducteur	81,18	40,94	58,46	66,30	93,94
		Non-conducteur	18,82	5,19	7,41	33,71	06,06
60	14	Conducteur	71,38	32,16	45,92	67,50	75,13
		Non-conducteur	28,62	22,1	31,56	32,50	24,87
	17	Conducteur	66,72	33,23	47,45	62,40	71,76
		Non-conducteur	33,26	21,69	30,97	37,61	28,24
	20	Conducteur	63,82	36,13	51,59	73,48	91,89
		Non-conducteur	36,16	8,83	12,61	26,52	8,11

5.2.2.4.2. Schéma proposé de traitement par le procédé électrostatique

L'objectif de notre travail de recherche est l'élaboration d'un schéma technologique de traitement du minerai de fer pauvre et les stériles de la mine de Khanguet. Le schéma proposé est composé principalement de trois parties :

- La première partie, concerne les étapes essentielles de préparation mécanique (concassage criblage et broyage), la préparation mécanique est conditionnées par la nature et la morphologie du minerai ;
- La deuxième étape est celle du prétraitement par le lavage, afin d'éliminer les fines particules, principalement les argiles.
- La dernière étape, c'est le traitement minéralurgique en utilisant le procédé de la séparation électrostatique.
- d'après les résultats de traitement, on a réussi à augmenter la teneur en hématite, d'abord de 35 à 41 % juste par le lavage, ensuite de 41 à 58 % par la séparation électrostatique, c'est-à-dire une augmentation de 23 % au total.

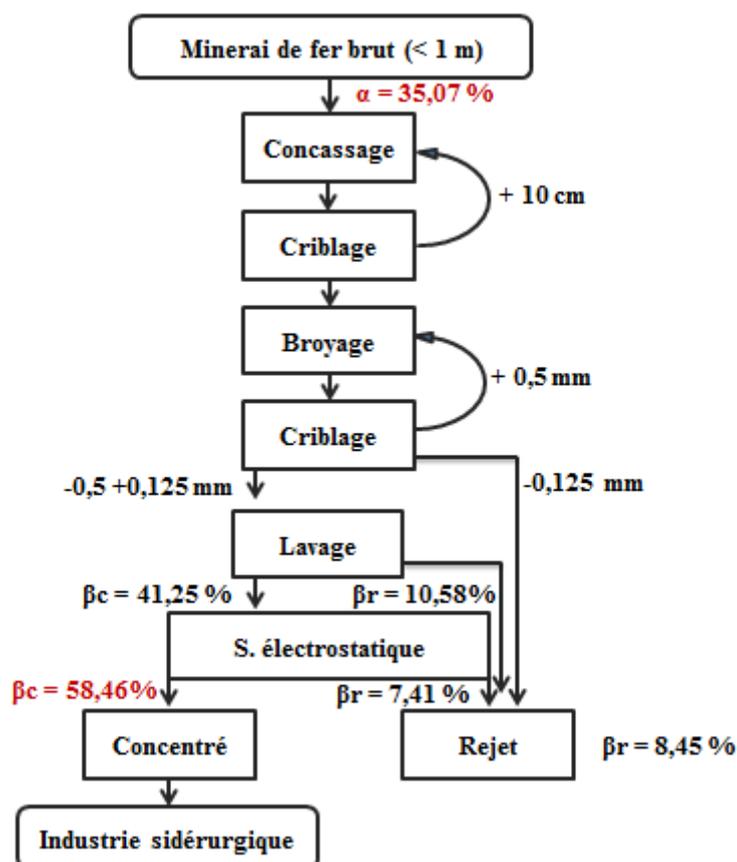


Figure 5.7 : Schéma proposé de traitement par le procédé électrostatique

5.3. Conclusion

Le traitement des minéraux est un maillon étroit de la technologie générale et assure la production des produits commercialisables qui répondent aux conditions requises pour les matières premières des industries chimiques et métallurgiques, entre autres.

L'utilisation rationnelle des ressources minérales et la protection de l'environnement dépendent de plus en plus du niveau de technologie et de la technologie de la première transformation des minéraux.

La séparation magnétique à haute intensité par voie sèche a permis d'obtenir un concentré de bonne qualité, la teneur en hématite a augmenté de 41.25 % à 65.92 % et un rendement de 60.88 % en appliquant une intensité du courant électrique de 13 A.

D'après les résultats des essais réalisés par le séparateur électrostatique à effet corona on a remarqué que les meilleurs résultats sont obtenus avec les paramètres suivants : Vitesse de rotation est égale à 50 rpm et la tension électrique est égale à 20 kV.

Le séparateur magnétique s'est avéré le choix le plus avantageux lorsqu'il s'agit du traitement du minerai pauvre et les stériles de la mine de Khanguet. Les essais de valorisation ont confirmé la faisabilité et l'efficacité du procédé magnétique.

CONCLUSION GENERALE

Le minerai de fer est la matière première pour la production de la fonte, qui est elle-même la matière première principale de l'acier. Presque la totalité du minerai de fer exploité dans le monde est utilisé pour produire du fer ou de l'acier, qui est l'un des métaux les plus utiles au monde. Son exploitation joue toujours un rôle significatif dans l'économie nationale et internationale, c'est le moteur principal de plusieurs industries (lourde et légère). Les ressources minérales Algérienne en matière des minerais de fer sont localisées et réparties sur huit gisements dont ceux de Chaabet-El-Ballout (W. Souk-Ahras), Sidi Maarouf (W. Jijel), Djebel Anini (W. Sétif), Rouina (W. Ain Defla), Gara Djebilet (W. Tindouf), Ouenza, Boukhadra et Khanguet situés à l'Est du pays (W. Tébessa).

La mine de Khanguet est l'une des plus anciennes mines exploitée en Algérie, son minerai est pauvre en substance utile, il est utilisé jusqu'à aujourd'hui comme adjuvant dans les cimenteries de l'Est Algérien. Tous les gites minéralisés du gisement se présentent sous forme de lentilles et de bancs, sont en concordance avec les roches encaissantes, la minéralisation est dans une assise argilo-carbonatée d'Aptien-Vraconien indifférencie qui recouvre en concordance les dépôts gypsifères du crétacé inférieur. La mine est caractérisée par cinq gites minéralisés: Quatre d'entre eux sont rapprochés l'une de l'autre (A, B, C et E) et se trouvent à la distance de 300- 500 m, le cinquième gite (D) se localise au Nord de ce groupe à 1,5 km environ, actuellement, seuls les gites A, B et C font l'objet des travaux d'exploitation. Ses derniers génèrent d'une part, l'épuisement des réserves riche en fer, d'autre part, ces travaux d'exploitation génèrent des stériles qui ne sont pas seulement un problème environnemental, mais aussi une perte économique pour l'entreprise. L'objectif de cette étude est donc : la caractérisation et la valorisation du minerai de fer pauvre et les stériles de la mine de Khanguet pour diversifier leurs utilisation et d'éliminer les stériles stockés à proximité de la mine qui nuisent l'environnement. Pour cela, une étude de caractérisation a été effectuée. Suivi par le traitement en utilisant deux méthodes de traitement (électrostatique et magnétique).

D'une manière générale, les minerais extrait des entrailles de la terre ne peuvent pas être utilisées directement dans l'industrie, la plupart des cas parce qu'ils ne répondent pas aux exigences de qualité, leurs teneurs est faible. Par conséquent, leurs traitement est obligatoire afin d'améliorer la teneur en substance utile. Leurs compositions minéralogiques et chimiques ont un impact significatif sur le choix des méthodes d'enrichissement. Toutes les méthodes d'enrichissement exploitent une différence dans les propriétés chimiques ou physiques afin d'effectuer une bonne séparation des différentes substances minérales existant dans le minerai. Parmi ces méthodes, on trouve la technologie de la séparation magnétique qui joue un rôle important dans la valorisation de ces minerais de fer à faible teneur, car les séparateurs magnétiques présentent les avantages combinés d'une grande capacité, d'un faible coût d'exploitation et d'un respect de l'environnement. Il y a aussi, la méthode de séparation électrostatique à tombeau utiliser pour le traitement des minerais, elle tire profit de la différence de conductivité électrique qui existe entre les minéraux afin d'accomplir leur séparation.

Une étude de caractérisation a été menée sur des échantillons prélevés des gites A, B, C et le stock des stériles de la mine de Khanguet en utilisant des techniques d'analyses multiples (FRX, DRX, MO et MEB). Les résultats d'analyses par fluorescence des rayons X montrent que les gites A et B sont riches en substance utile, par contre le gite C et le stock des stériles S sont pauvres. De ce fait, notre recherche est portée seulement sur les deux derniers (C et stériles S). Sur l'ensemble des gites A, B, C et le stock des stériles S, les teneurs en Fe_2O_3 sont respectivement : 55,13 % ; 58,67 % ; 36,15 % et 32,37 %. Les résultats d'analyses granulochimiques montrent que la maille de libération du fer est comprise entre (-0,5 +0,063) mm.

D'après les observations faites au microscope électronique à balayage, il apparaît clairement l'existence de deux phases principales, la phase claire est essentiellement composée du fer, et la phase sombre constituée des carbonates et du quartz. Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X ont révélé que le minerai de fer de Khanguet est constitué de trois phases minérales, elle s'agit de l'hématite en tant que principal minéral d'oxyde opaque et de la silice ainsi que des carbonates forment les minéraux de gangue dans le minerai.

Les deux méthodes de valorisation du minerai de fer à faible teneur et les stériles de la mine de Khanguet ont donné de bons résultats, ce qui montre la possibilité de traitement. D'après les résultats des essais réalisés par le séparateur électrostatique à effet corona on a remarqué que les meilleurs résultats (58 % en Fe_2O_3) sont obtenus avec les paramètres suivants : Vitesse de rotation est égale à 50 rpm et la tension électrique est égale à 20 kV. Par contre, la séparation magnétique à haute intensité par voie sèche a permis d'obtenir un concentré de bonne qualité, la teneur en hématite a augmenté de 41,25 % à 65,92 % et un rendement de 60,88 % de Fe_2O_3 en appliquant une intensité du courant électrique de 13 A pour une classe granulométrique de -0,5 +0,125 mm, donc l'objectif est atteint. Le séparateur magnétique s'est avéré le choix le plus avantageux lorsqu'il s'agit du traitement du minerai pauvre et les stériles de la mine de Khanguet. Les essais de valorisation ont confirmé la faisabilité et l'efficacité du procédé magnétique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CLOUT, J. M. F. et MANUEL, J. R. Mineralogical, chemical, and physical characteristics of iron ore. In : Iron Ore. Woodhead Publishing, 2015. p. 45-84.
- [2] RAMANAIDOU, E. M. I. C., WELLS, Martin, LAU, Ian, et al. Characterization of iron ore by visible and infrared reflectance and, Raman spectroscopies. In: Iron ore. Woodhead Publishing, 2015. p. 191-228.
- [3] WEHLEEKEMA, Siaplay. Assessment of Iron Ore Mining Gangues in Itakpe for Secondary Recovery of Other Metal Values. Abuja, Nigeria. Thèse de doctorat. 2017.
- [4] PETRUK, William. Applied mineralogy in the mining industry. Elsevier, 2000.
- [5] CORNELL, Rochelle M., SCHWERTMANN, Udo, et al. The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences, and uses. Weinheim : Wiley-vch, 2003.
- [6] FERENCZI, P. A. Iron ore, manganese and bauxite deposits of the Northern Territory. Department of Business, Industry and Resource Development, 2001. pp. 13-41.
- [7] POSTMA, Dieke. Formation of siderite and vivianite and the pore-water composition of a recent bog sediment in Denmark. Chemical Geology, 1980, vol. 31, p. 225-244.
- [8] BOURMAN, R. P., FITZPATRICK, R. W., et SELF, P. G. Character and origin of ferruginous voidal concretions in weathered triassic sediment of the telford basin, south australia. In : Proceeding of the 10th international clay conference. 1993. p. 346-354.
- [9] ROH, Y., ZHANG, C.-L., VALI, H., et al. Facteurs biogéochimiques et environnementaux dans la biominéralisation du fer : formation de magnétite et de sidérite. Argiles et minéraux argileux, 2003, vol. 51, n° 1, p. 83-95.
- [10] BROBST, Donald Albert et PRATT, Walden P. United States mineral resources. Geological Survey, Washington, DC (USA), 1973.
- [11] TAYLOR, D., DALSTRA, H. J., HARDING, A. E., et al. Genesis of high-grade hematite orebodies of the Hamersley Province, Western Australia. Economic Geology, 2001, vol. 96, no 4, p. 837-873.
- [12] HOWIE, RA, ZUSSMAN, Jack, et DEER, W. An introduction to the rock-forming minerals . Londres, Royaume-Uni : Longman, 1992. 696 p.
- [13] HURST, Luke. West and Central African iron ore development and its impact on world prices. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2013, vol. 57, no 4, p. 521-538.
- [14] BRIDGE, Gavin. Contested terrain: mining and the environment. Annu. Rev. Environ. Resour., 2004, vol. 29, p. 205-259.
- [15] GUEDADCHIA, Anouar et REDJIMI, Haroune. Optimisation des opérations de broyage et de transport dans la mine de fer d'Ouenza NE de l'Algérie afin de contrôler la qualité de minerai de fer. 2021. Thèse de doctorat.
- [16] IDRES, A. et BOUNOUALA, M. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer de l'Ouenza par radiométrie. In : Journal de Physique IV (Proceedings). EDP sciences, 2005. p. 177-181.
- [17] Durozoy, G. Carte Géologique de l'Algérie à 1/50 000, Tébessa, avec notice explicative, Publication du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Alger. 1956. Feuille 206, 6 p.
- [18] Rapport sur les résultats des travaux de prospections. SOMIFER : Société des Mines de Fer d'Algérie. 2013.

- [19] Durozoy, J.M Vila et d'A. Charrière, et de J.M Vila, In Belaala. Carte géologique simplifiée du Djebel Djébissa. 1956.
- [20] GHRIEB, Lassaad. Impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité de l'eau et du sol en zone SEMI-ARIDE. 2011. Thèse de doctorat. Annaba.
- [21] SALMI-LAOUAR, S., LAOUAR, R., BOYCE, A. J., et al. Rapports isotopiques du soufre, de l'oxygène et du carbone dans le massif de Boujaber, NE Algérien: origine des minéralisations à Pb-Zn-Ba et sources des fluides. Bulletin du Service géologique de l'Algérie, 2004, vol. 15, no 1, p. 3-25.
- [22] G. Bétier, L. Royer, H. Termier, R. Laffitte. Le Service de la Carte Géologique de l'Algérie. 1956.
- [23] Dubourdiou G. Étude géologique de la région de l'Ouenza (confins algéro-tunisiens). Thèse des Sciences, Paris, Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Bulletin N° 10, 1956, Vol. 1, 659 p.
- [24] SALMI-LAOUAR, Sihem. Contribution à l'étude géologique et géochimie des isotopes stables (S, O, C,) des minéralisations polymétalliques (Zn-Pb-F-Ba-Fe-Hg) de la zone des DIAPIRS du nord de Tébessa (NE ALGERIEN). 2004. Thèse de doctorat. Annaba.
- [25] BOUZENOUNE, Azzedine. Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). 1993. Thèse de doctorat. Paris 6.
- [26] ROUVIER, H., PERTHUISOT, V., et MANSOURI, A. Pb-Zn deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. *Economic Geology*, 1985, vol. 80, no 3, p. 666-687.
- [27] Chevenine A., Popov Y., Douha Dj. et Benzeroual M. Rapport sur les résultats de l'étude géologique complémentaire des feuilles 124 (Oued Kebarite), 125 (Ouenza), 150 (El Ouinet) et 151 (Boukhadra) pour la préparation à l'édition des cartes géologiques au 1/50.000. Partie 1, 1989. O.R.G.M. Algérie.
- [28] MASSE, Jean-Pierre et CHIKHI-AOUIMEUR, Fettouma. La plate-forme carbonatée de l'Ouenza (Sud Constantinois, Algérie). Organisation et dynamique durant l'Aptien supérieur. *Géologie Méditerranéenne*, 1982, vol. 9, no 3, p. 259-267.
- [29] Beghoul, mekki et Sonatrach, soc. Étude géologique de la région des Hamimat (Sud-Est constantinois). Application à la recherche pétrolière dans les confins Algéro-Tunisiens. 1974. thèse de doctorat.
- [30] Chikhi-Aouimeur F. Les Rudistes de l'Aptien supérieur de djebel Ouenza (algérie NE). Paléontologie, Contexte stratigraphique et paléogéographie. 1980. Thèse 3ème cycle, USTHB, Alger, 114 p.
- [31] OTHMANINE, A. Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tébessa-Morsott. Relation entre la paléogéographie albo-aptienne, diapirisme, structure et métallogénie. 1987. Thèse de doctorat, Univ. P. et M. Curie, Paris VI, 220p.
- [32] Nedjari-Belahcène S. et Nedjari A. Le Boukhadra: esquisse paléogéographique aptienne. 5ème séminaire Nationale des Sciences de la Terre, Alger, 1984. pp. 102.
- [33] Thibiéroz J. et Madre M. Le gisement de sidérite du Dj. Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de mer aptienne. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord, 1976. 67, 3-4, pp.

- [34] Kowalski W.M. et Hamimed M. Diapirisme polyphasé ou glacier de sel albien? Dilemme du matériel triasique des confins algéro-tunisiens. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie. Vol.11, n°1 pp.29-60, 12 fig., 2000.
- [35] Rapport sur les travaux de prospection, Office National de la recherche Géologique et Minière. 1997-2000.
- [36] André CHARRIERE, et al. Nouvelles données stratigraphiques et structurales sur le Djebel Djébissa, près de Tébessa (frontière Algéro-Tunisienne) : reconstitution d'un dôme de sel et en contexte distensif chaud au Crétacé Inférieur-moyen ; Bulletin du Service Géologique de l'Algérie ; 1996. Vol. 7, n° 2, pp. 109-132, 11 fig.
- [37] POHL, W., AMOURI, M., KOLLI, O., et al. A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. Mineralium deposita, 1986, vol. 21, p. 228-233.
- [38] Rapport sur les résultats des travaux de prospection exécutés sur le gisement de fer de Khanguet. Société nationale de recherche et d'exploitations minières. 1979.
- [39] Sanjay kumar A et Sudhanshu K., Beneficiation of Iron Ore. Department of Mining Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008, 2014. p 55.
- [40] ABAKA-WOOD, George B., ADDAI-MENSAH, Jonas, et SKINNER, William. Magnetic separation of monazite from mixed minerals. In : Chemeca Conference. 2016. p. 605-612.
- [41] BRONKALA, William J. Magnetic separation. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2000.
- [42] RAO, DV Subba. Valorisation minérale : un cours de base concis . CRC Press, 2011.
- [43] GILL, Charles B. Materials beneficiation. Springer Science & Business Media, 2012.
- [44] XIONG, D., LU, L., et HOLMES, R. J. Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. In : Iron ore. Woodhead Publishing, 2015. p. 283-307.
- [45] DWARI, Ranjan Kumar, RAO, Danda Srinivas, et REDDY, Palli Sita Ram. Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, vol. 23, no 1, p. 1-5.
- [46] B.A. Wills, Mineral Processing Technology, Pergamon Press, New York, 1979, p. 345.
- [47] J.H. Brown, Opérations unitaires en génie minéral, International Academic, Kingston, Ontario, Canada, 1979, p. 159.
- [48] SVOBODA, J. et FUJITA, T. Recent developments in magnetic methods of material separation. Minerals Engineering, 2003, vol. 16, no 9, p. 785-792.
- [49] SENOUCI, K., MEDLES, K., BENDAOU, A., et al. Application de la Maîtrise Statistique des Procédés au pilotage d'un processus de séparation électrostatique. Acta Electrotechnica, 2006.
- [50] Serge Bouchard, traitement du minerai : flottation, méthodes physiques, Griffon d'argile 2001, ISBN 978-2-89443-156-6.
- [51] CUI, Jirang et FORSSBERG, Eric. Recyclage mécanique des déchets d'équipements électriques et électroniques : un état des lieux. Journal des matières dangereuses , 2003, vol. 99, n° 3, p. 243-263.
- [52] Fuerstenau, M.C. (Ed.), Froth Flotation: A Century of Innovation. SME, Littleton, CO, USA. 2007.
- [53] BLAZY, Pierre et JDID, Ei-Aid. Flottation. Mécanismes et réactifs. Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés, 2000, vol. 3, no J3350, p. J3350. 1-J3350. 22.
- [54] HOUOT, R. Beneficiation of iron ore by flotation—review of industrial and potential applications. International Journal of Mineral Processing, 1983, vol. 10, no 3, p. 183-204.

- [55] PROULX, Mélanie. Amélioration du rendement des particules grossières par la stratégie d'addition des réactifs dans un banc de flottation. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa, 2001.
- [56] KLIMPEL, RR et ISHERWOOD, Simon. Certaines implications industrielles de la modification de la structure chimique du mousser. *Revue internationale de traitement des minéraux*, 1991, vol. 33, n° 1-4, p. 369-381.
- [57] Mahtout, Leila. Influence de la consommation des réactifs de flottation sur la sélectivité des métaux pb/zn (mine amizour). Sétif. 2018. Thèse de doctorat.
- [58] Kelly, E.G. et Spottiswood, D.J. *Introduction to Mineral Processing*. New York: John Wiley & Sons; 1982; p. 479.
- [59] Plumpton, A. J. Le CRM à l'avant-garde en matière de concentration gravimétrique. CRM En Bref, Bulletin D'Information Du Centre De Recherche Minérale. 1996; Juin:1-4.
- [60] Wills, B.A. *Mineral Processing Technology*. 4^{ème} édition. Oxford: Pergamon Press; 1988; p.855.
- [61] DWARI, Ranjan Kumar, RAO, Danda Srinivas, et REDDY, Palli Sita Ram. Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23, no 1, p. 1-5.
- [62] SINGH, Subhashree, SAHOO, H., RATH, S. S., et al. Separation of hematite from banded hematite jasper (BHJ) by magnetic coating. *Journal of Central South University*, 2015, vol. 22, p. 437-444.
- [63] SONG, S., LU, S., et LOPEZ-VALDIVIESO, A. Magnetic separation of hematite and limonite fines as hydrophobic flocs from iron ores. *Minerals engineering*, 2002, vol. 15, no 6, p. 415-422.
- [64] IDRES, Abdelaziz, BOUHEDJA, AHCÈNE, BOUNOUALA, Mohamed, et al. New method of electrostatic separation of the oxidized iron ore. *Mining Science*, 2016, vol. 23, p. 33--41.
- [65] IDRES, A. et BOUNOUALA, M. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer de l'Ouenza par radiométrie. In : *Journal de Physique IV (Proceedings)*. EDP sciences, 2005. p. 177-181.
- [66] Ma, M. (2012). Froth flotation of iron ores. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1(2), 56-61.
- [67] SAHOO, Hrushikesh, RATH, Swagat S., RAO, Danda S., et al. Role of silica and alumina content in the flotation of iron ores. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 148, p. 83-91.
- [68] YIN, Wan-zhong, LI, Dong, LUO, Xi-mei, et al. Effect and mechanism of siderite on reverse flotation of hematite. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2016, vol. 23, p. 373-379.
- [69] LIN, Li, JIONG-TIAN, Liu, YONG-TIAN, Wang, et al. Experimental research on anionic reverse flotation of hematite with a flotation column. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, vol. 1, no 1, p. 791-798.
- [70] SU, Xing Guo, LI, Yan Jun, LIU, Jie, et al. Shear flocculation and flotation of hematite. In : *Advanced materials research*. Trans Tech Publications Ltd, 2011. p. 224-232.
- [71] YUE, Tao et WU, Xiqing. Magnetic seeding depression in flotation of hematite ore slimes. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2018, vol. 54.
- [72] OFOR, O. Effect of temperature on the emulsion flotation of hematite. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 1992, vol. 9, p. 115-118.

- [73] FILIPPOV, L. O., SEVEROV, V. V., et FILIPPOVA, I. V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International journal of mineral processing*, 2014, vol. 127, p. 62-69.
- [74] WANG, Dianzuo. *Flotation reagents: applied surface chemistry on minerals flotation and energy resources beneficiation*. Singapore : Springer, 2016.
- [75] Hoenig., et Thomas P., Préparation d'échantillons de l'environnement pour analyse minérale, Dossier P4150, *Techniques de l'Ingénieur*, 2002. p 12.
- [76] Nicolas., *Principes de l'échantillonnage dans l'environnement*, Université de Liège, Liège, 2006. p 89.
- [77] LI, Xinyan. *Intérêt de la réduction de taille des principes actifs peu hydrosolubles: étude bibliographique et expérimentale*. 2014. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [78] BÉLAROUÏ, Karima. *Compréhension des mécanismes de fragmentation par analyse granulométrique et morphologique*. 1999. Thèse de doctorat. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- [79] Thirion-Merle, V. *Spectrométrie de fluorescence X. Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes*, Editions des archives contemporaines, Collection Sciences Archéologiques. 2014.
- [80] Joseph J. P. *Use of iron ore in agglomeration, blast furnace and alternative ironmaking processes*, AJM Global Iron Ore & Steel Forecast Master class B, 27th, Perth, Australia. 2007.
- [81] Jacques C., *Pré-5e édition Index. Le savoir...fer Glossaire du Haut-Fourneau*. http://savoir.fer.free.fr/pGLO/5e_ed/5edition.jpg. 2013. 1985-2062p
- [82] CHOPARD, Aurélie. *Évaluation environnementale de minerais sulfurés polymétalliques basée sur une approche minéralogique pluridisciplinaire*. 2017. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [83] MARCHIONNI, Silvia, BALDISSARA, Paolo, MONACO, Carlo, et al. *Une méthode systématique pour l'analyse prédéterminée au microscope électronique à balayage en science dentaire*. *Numérisation*, 2010, vol. 32, n° 2, p. 97-103.
- [84] CHOMEL, P. et ROCHER, A. *Optique électronique et microscopie électronique à balayage. Microcaractérisation des solides: méthodes d'observation et d'analyse*. CRAM-LPSES-CNRS, Sophia Antipolis, Valbonne, France, 1989.
- [85] COUSSY, Samuel. *Stabilisation de rejets miniers pollués à l'arsenic à l'aide de sous-produits cimentaires: étude de l'influence de la cristallogénèse sur le risque de mobilisation des polluants*. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (Canada), 2011.
- [86] MERMILLOD-BLONDIN, Raphaël. *Influence des propriétés superficielles de la pyrite sur la rétention de molécules organiques soufrées: application à la désulfuration des résidus miniers*. École Polytechnique de Montréal, 2005.
- [87] Maitte, Baptiste. *Influence de l'activité bactérienne ferro-oxydante et ferri-réductrice sur les propriétés minéralogiques et micromécaniques du minerai de fer dans le contexte des mines abandonnées de Lorraine*. Diss. Université de Lorraine, 2015.
- [88] Tiour, f., Idres, a., Ould hamou, m., et al. *Characterization and processing of low-grade iron ore from the Khanguet mine by electrostatic separation*. *Scientific bulletin of national mining university*, 2022, n°3, pp.76-81.
- [89] BRONKALA, William J. *Magnetic separation*. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2000.

- [90] RAO, DV Subba. Valorisation minérale : un cours de base concis . CRC Press, 2011.
- [91] I.I. Incullet, Electrostatic Mineral Separation, Wiley, New York, 1986.
- [92] Haga, K., Chang, J. S., Kelly, A. J., & Crowley, J. M, Applications of the electrostatic separation technique. In Handbook of Electrostatic Processes, New York: Marcel Dekker, 1995, (pp. 365-386).
- [93] Gill, C. B. Materials Beneficiation. New York: Springer-Verlag; 1991; p. 245.
- [94] Wills, B.A. Mineral Processing Technology. 4^{ième} édition. Oxford: Pergamon Press; 1988; p.855
- [95] Tilmatine, A., Azzouz, Z., Younes, M., et al. Separation électrostatique des particules: une technologie efficace dans l'industrie de recyclage. Sciences & technologie. B, sciences de l'ingénieur, 2004, p. 42-46.
- [96] LOUATI, H., TILMATINE, A., OUIDDIR, R., et al. Nouvelle technique de séparation des matériaux granulaires métal/polymère à l'aide d'un dispositif de tri électrostatique. Journal d'électrostatique, 2020, vol. 103, p. 103410.
- [97] Medles, K., Tilmatine, A., et al. L. Évaluation de la capacité et contrôle statistique des processus de séparation électrostatique. Compte rendu de la conférence Industry Applications Conference, 2005. Vol. 4, pp. 2590-2596. IEEE.
- [98] CATINEAN, Andrei, et al. Improving the recovery of copper from electric cable waste derived from automotive industry by corona-electrostatic separation. Particulate Science and Technology, 2021, vol. 39, no 4, p. 449-456.
- [99] RICHARD, Gontran. Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires. Thèse de doctorat. Poitiers. 2018.