



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Genie Minier

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Valorisation du fer pauvre de la mine d'El-Ouenza par méthode de lixiviation acide: Etudes des paramètres opératoires

Par
Hichour Nessrine

Devant le jury :

KRIM.M	Président	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
LARABA M.	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
BOUZENZANA.A	Examineur	Pr	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026



Remerciement

À l'issue de ce modeste travail, je tiens à exprimer, avec une profonde reconnaissance, ma gratitude envers Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail, ainsi que Son soutien miséricordieux tout au long de ma vie et de mes années d'études.

*Je remercie tout particulièrement mon encadreur, **Dr. LARABA Mohammed**, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de cette étude. Son expertise et sa rigueur scientifique ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer et d'examiner ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du département des mines et de géotechnologie, qui m'ont transmis les connaissances et les compétences nécessaires à ma formation.

Enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont soutenue et encouragée durant les moments difficiles, et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce travail.





Dédicace

{وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ}

À mon très cher père,
Qui a toujours été mon soutien et ma plus grande source de force. Merci pour tous les sacrifices, l'amour et les précieux conseils que tu m'as prodigués tout au long de ma vie. Qu'Allah te protège et te garde auprès de nous.

À ma très chère mère,
Pour son amour infini, sa patience, ses prières et son soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Qu'Allah la préserve et lui accorde une longue et heureuse vie.

À mon cher fiancé, Saif,
Merci pour ton soutien constant, ta présence à mes côtés et tes encouragements à chaque étape de cette aventure. Ta présence a été pour moi une véritable source de force et de sérénité.

À ma chère sœur, Hadil,
Et à mes chers frères, Nasreddine, Nizar et Amir,
Merci pour votre affection sincère, votre soutien moral et vos encouragements permanents.

À toute ma famille,
Qui a toujours été une source d'amour, de réconfort et de motivation.

À tous mes amis,
Et particulièrement à ma chère amie Soundes, pour sa gentillesse, sa patience et son soutien dans les moments les plus difficiles.

À tous ceux que j'aime,
À tous ceux qui m'aiment,
Et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je dédie humblement ce mémoire.



Résumé

Le présent travail porte sur l'étude de la valorisation du minerai de fer de la mine d'El-Ouenza, située dans la wilaya de Tébessa (Nord-Est algérien), à travers l'application de la lixiviation comme méthode de traitement hydrométallurgique. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des minerais de faible teneur, dans le but d'améliorer leur qualité et de favoriser leur exploitation industrielle.

La démarche adoptée a consisté en un prélèvement représentatif du minerai au niveau de la zone étudiée, suivi d'une préparation en laboratoire comprenant les étapes de concassage, de broyage et de caractérisation physicochimique et minéralogique. Des essais de lixiviation ont ensuite été réalisés afin d'évaluer le comportement du minerai vis-à-vis de l'agent lixiviant utilisé et d'étudier l'influence des paramètres expérimentaux sur le rendement du traitement.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les principales caractéristiques du minerai étudié ainsi que l'efficacité de la lixiviation dans la dissolution sélective de certains constituants indésirables et l'amélioration de la teneur en fer. Cette étude a également montré l'importance des conditions opératoires dans l'optimisation du procédé et dans la valorisation du minerai traité.

Les travaux réalisés confirment ainsi l'intérêt de la lixiviation comme technique de traitement applicable au minerai de fer d'El-Ouenza et constituent une contribution à la recherche de solutions adaptées pour la valorisation des ressources ferrières à faible teneur en Algérie.

Mots-clés : Minerai de fer, El-Ouenza, Lixiviation, Traitement hydrométallurgique.

Abstract

This work focuses on the valorization of iron ore from the El-Ouenza mine, located in the wilaya of Tébessa (Northeast Algeria), through the application of leaching as a hydrometallurgical treatment method. This study falls within the framework of valorizing low-grade ores, with the aim of improving their quality and facilitating their industrial exploitation.

The approach adopted consisted of a representative sample of the ore from the study area, followed by laboratory preparation including crushing, grinding, and physicochemical and mineralogical characterization. Leaching tests were then carried out to evaluate the ore's behavior with respect to the leaching agent used and to study the influence of experimental parameters on the treatment yield.

The results obtained highlighted the main characteristics of the ore studied, as well as the effectiveness of leaching in the selective dissolution of certain undesirable constituents and the improvement of iron content. This study also demonstrated the importance of operating conditions in optimizing the process and in the valorization of the treated ore.

The work carried out thus confirms the value of leaching as a treatment technique applicable to the El-Ouenza iron ore and constitutes a contribution to the search for suitable solutions for the valorization of low-grade iron ore resources in Algeria.

Keywords: Iron ore, El-Ouenza, Leaching, Hydrometallurgical treatment.

الملخص

يركز هذا العمل على تثمين خام الحديد من منجم الوزنة، الواقع في ولاية تبسة (شمال شرق الجزائر)، من خلال تطبيق عملية الترشيح كطريقة معالجة هيدرومي탈ورجية. تندرج هذه الدراسة ضمن إطار تثمين الخامات منخفضة الجودة، بهدف تحسين جودتها وتسهيل استغلالها الصناعي.

تضمنت المنهجية المتبعة أخذ عينة ممثلة من الخام من منطقة الدراسة، تلاها تحضير مخبري شمل التكسير والطحن والتحليل الفيزيائي والكيميائي والمعدني. ثم أُجريت اختبارات الترشيح لتقييم سلوك الخام تجاه عامل الترشيح المستخدم، ودراسة تأثير المعايير التجريبية على مردود المعالجة.

أبرزت النتائج المُتحصل عليها الخصائص الرئيسية للخام المدروس، بالإضافة إلى فعالية الترشيح في الذوبان الانتقائي لبعض المكونات غير المرغوب فيها، وتحسين محتوى الحديد. كما أظهرت هذه الدراسة أهمية ظروف التشغيل في تحسين العملية وتثمين الخام المُعالج. يؤكد هذا العمل المنجز أهمية عملية الترشيح كتقنية معالجة مناسبة لخام الحديد في منطقة الوزنة، ويسهم في البحث عن حلول ملائمة لاستغلال موارد خام الحديد منخفضة الجودة في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: خام الحديد، الوزنة، الترشيح، المعالجة المائية المعدنية.

SOMMAIRE	N°
Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. Introduction	1
I.2. Minerai de fer	1
I.3. Propriétés du minerai de fer	2
I.4. Minéraux, dépôts et minéralisations du fer	3
I.5. Production du Minerai de Fer en Algérie	8
I.6. PRODUCTION DU MINERAI DE FER DANS LE MONDE	8
I.7. Méthode d'Exploitation du Gisement de Fer	10
I.8. Préparation des Matières Premières	11
I.9. Historique	13
I.10. UTILISATIONS ET APPLICATIONS DU FER	13
I.11. DOMAINES D'UTILISATION	15
I.12. MARCHÉ DU MINERAI DE FER	15
I.13. TYPE DES GISEMENTS FERRIFÈRES	16
I.14. GENERALITES SUR LA LIXIVIATION	19
Conclusion	25
Références	26
CHAPITRE II : GÉOLOGIE RÉGIONALE ET MÉTHODE D'EXPLOITATION	
II.1. Introduction	30
II.2. Historique de la Région	30
II.3. Cadre géographique de Djebel El-Ouenza	31
II.4. Géologie Régionale	33
II.5. Tectonique	37
II.6. Minéralisation	37
II.7. Aperçu géologique sur les quartiers de la mine de l'El-Ouenza	38
II.8. Nature de gisement	41
II.9. Méthode d'exploitation du gisement de fer de l'El-Ouenza	44
II.10. Traitement mécanique	50
II.11. Préparation mécanique du minerai de fer de l'El-Ouenza	51
II.12. Les réserves géologiques et exploitables du gisement d'El Ouenza	52
Conclusion	53
Références	54
CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	
III.1. Introduction	57
III.2. Préparation du minerai de fer	58
III.3. Méthodes analytiques	61
III.4. Lixiviation du minerai de fer pauvre de la mine d'El-Ouenza	66
Conclusion	74
Références	75
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION	

Introduction	80
IV.1. Résultats de la caractérisation du fer d'El-Ouenza	80
IV.2. Effet des paramètres opératoire sur la dissolution	84
IV.3. Effet des paramètres opératoire sur la dissolution	90
IV.4. Effet des paramètres opératoire sur le rendement	92
IV.5. Optimisation de paramètres opératoires	93
Conclusion	97
Références	98
Conclusion générale	100
ANNEXES	102

LISTE DES FIGURES	N°
Figure I.1 : La mine de minerai de fer à Ouenza, Algérie	8
Figure I.2 : Production minière canadienne de minerai de fer, 2015–2024 (dpr)	10
Figure I.3 : Processus d’exploitation du minerai de fer dans la mine de l’Ouenza	11
Figure II.01 : Gisement de la mine d’El-Ouenza	31
Figure II.02 : Situation géographique des gisements de fer de l’El-Ouenza (Google Earth)	32
Figure II.03 : Localisation de la région d’étude	32
Figure II.04 : Carte géologique simplifiée de la zone d’étude	33
Figure II.05 : Coupe lithostratigraphique des Monts du Mellègue	36
Figure II.07 : Carte géologique du quartier Chagoura Nord	38
Figure II.08 : Carte géologique du quartier Chagoura Pic-Sud	39
Figure II.09 : Carte géologique du quartier Sainte-Barbe (Îlot)	40
Figure II.11 : Coupe dans la structure anticlinale du gisement de l’El-Ouenza	41
Figure II.12 : Quartiers d’exploitation du gisement de l’El-Ouenza	42
Figure II.13 : La sondeuse INGERSOLL-R (T4BH900HR4) en travail à la mine d’El-Ouenza	47
Figure II.14 : Schéma des trous de la mine d’El-Ouenza	48
Figure II.15 : Le tir de la mine d’El-Ouenza	48
Figure II.16 : Camion CATERPILLAR type 775F	49
Figure II.17 : Chargeuse CATERPILLAR type 988H	50
Figure II.18 : Schéma technologique d’extraction et de préparation du minerai de fer de l’El-Ouenza	51
Figure III.1 : Schéma de traitement proposé pour le minerai de fer d’El-Ouenza	58
Figure III.2 : Concasseur de laboratoire (El-Ouenza)	59
Figure III.3 : Broyeur à disque RS-100 utilisé au laboratoire d’El-Ouenza	59
Figure III.4 : Méthode d’échantillonnage par quartage	60
Figure III.5 : Illustration de la méthode d’échantillonnage de quartage	60
Figure III.6 : Les échantillons et la pile de tamis de laboratoire	61
Figure III.7 : Procédure de mesure et de chauffage	62
Figure III.8 : Appareil de diffraction des rayons X (DRX)	64
Figure III.9 : Procédé de fluorescence X (XRF)	64
Figure III.10 : Principe du MEB-EDX	65
Figure III.11 : Appareil de MEB-EDX (Laboratoire d’ENSTI, Annaba)	66
Figure III.12 : Principaux paramètres opératoires et leur influence sur la cinétique de la lixiviation	67
Figure III.13 : Fioles utilisées	70
Figure III.14 : Pesage des échantillons du fer pauvre.	71
Figure IV.1 : Courbe granulométrique du minerai de fer de la mine d’El-Ouneza	81
Figure IV.2 : Diffraction des rayons X du minerai de fer d’El-Ouneza	83
Figure IV.3 : Analyse MEB-EDS du minerai de fer d’El-Ouenza	84
Figure IV.4 : Courbes de régression des valeurs prédites et actuelles de la lixiviation du fer	90
Figure IV.5 : Cartes des contours (Response Surfaces Contour plots) de la dissolution du fer.	91
Figure IV.6 : Cartes des contours (Response Surfaces Contour plots) du rendement du fer.	92
Figure IV.7 : Module d’optimisation numérique par désirabilité du procédé de lixiviation	94

LISTE DES TABLEAUX	N°
Tableau I.01 : Principales formes minérales du minerai de fer	3
Tableau I.02 : Illustrations des principales formes minérales du minerai de fer	6
Tableau I.03 : Production mondiale de minerai de fer, par pays, 2024	9
Tableau II.01 : Composition chimique moyenne du minerai de fer de l'El-Ouenza	44
Tableau II.02 : Réserves géologiques et exploitables du gisement d'El-Ouenza	52
Tableau III. 1: Principaux acides de lixiviation et leurs caractéristiques	69
Tableau 1. Niveaux des variables indépendantes de la lixiviation	72
Tableau 2. Tests expérimentaux avec variables de lixiviation selon un plan d'expérience	72
Tableau IV.1 : Résultats de l'analyse granulométrique du fer d'El-Ouenza	80
Tableau IV.2 : Résultats de l'analyse granulo-chimique du minerai de fer à faible teneur de la mine d'El-Ouenza	82
Tableau III.3 : Résultats des essais (DOE)	84
Tableau IV.4: ANOVA pour la dissolution du fer en fonction des trois facteurs	87
Tableau IV.4: ANOVA pour le rendement du fer en fonction des trois facteurs	88
Tableau IV.5 : Valeurs paramètres opératoires optimaux calculés par le modèle.	94
Tableau IV.6 : Valeurs des réponses prédites	95

Introduction générale

Introduction générale

Les ressources minérales jouent un rôle clé dans le développement économique et industriel, surtout dans les régions dotées d'un potentiel géologique élevé. Les gîtes ferrifères occupent, parmi ces ressources, une place stratégique du fait de leur haute valeur industrielle et de leur rôle essentiel dans les branches sidérurgique et des matériaux.

En Algérie, le gisement ferrifère d'El-Ouenza, situé dans la wilaya de Tébessa, est l'un des plus importants gisements de fer du pays. Bien que présentant un intérêt économique majeur, certaines zones du gisement sont caractérisées par des teneurs relativement faibles en fer et contiennent des impuretés minéralogiques qui en limitent la valorisation directe dans les procédés métallurgiques classiques. De ce point de vue, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques de traitement capables d'améliorer la qualité du minerai et de favoriser sa valorisation industrielle.

La lixiviation est une des méthodes de traitement utilisées en métallurgie extractive et qui a une grande importance par l'efficacité de sa dissolution sélective de certains constituants minéraux. Ce procédé hydrométallurgique utilise un agent lixiviant qui solubilise les éléments visés et permet de séparer les phases intéressantes des minéraux associés ou des impuretés. Son utilisation dans le traitement des minerais ferreux est particulièrement intéressante, notamment pour l'élimination de certains éléments indésirables et l'amélioration des caractéristiques chimiques du minerai avant sa valorisation industrielle.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective et a pour objet l'étude de la valorisation du minerai de fer pauvre du gisement d'El-Ouenza par l'application de la lixiviation comme procédé de traitement. L'objectif principal est d'évaluer le comportement du minerai par rapport au procédé de lixiviation, de connaître l'influence de certains paramètres expérimentaux sur le rendement du traitement et d'apprécier l'efficacité de cette méthode dans l'amélioration de la qualité du minerai.

Afin d'atteindre ces objectifs, cette étude s'appuie sur une démarche expérimentale comprenant l'échantillonnage, la préparation du minerai, sa caractérisation ainsi que les essais de lixiviation réalisés en laboratoire. Les résultats obtenus permettront d'évaluer le potentiel de cette technique dans la valorisation du minerai étudié et de contribuer à l'optimisation de son traitement.

Ce mémoire est organisé en 4 chapitres :

- Le premier chapitre présente le cadre général géographique et géologique de la région d'étude.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description stratigraphique et structurale détaillée des formations affleurantes.
- Le troisième chapitre décrit les matériels et méthodes mis en œuvre dans le cadre de cette étude.
- Enfin, le dernier chapitre présente les résultats obtenus, leur interprétation et les principales conclusions qui en découlent.

CHAPITRE I
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.Introduction

Le nom du fer vient du latin ferrum. Les plus lointaines découvertes du fer remontent à environ 4000 ans avant le début du calendrier chrétien. L'on retrouve ces artefacts chez les Égyptiens et les Sumériens

Le minerai de fer se compose de roches et de minéraux desquels du fer métallique peut être extrait de manière rentable. Le minerai extrait est habituellement riche en oxydes et en carbonates de fer et de couleur gris foncé, jaune éclatant, pourpre foncé ou rouille. Le fer lui-même se trouve généralement sous la forme de magnétite (Fe_3O_4), d'hématite (Fe_2O_3), de goethite, de limonite ou de sidérite ; l'hématite est aussi appelée « minerai naturel ». Le minerai de fer est la matière première de la fonte de première fusion, qui est elle-même la matière première principale de l'acier.

En général, le minerai le plus riche en fer est le plus rentable. Lorsque sa teneur est supérieure à 54 %, il est considéré comme riche et ne nécessite aucune valorisation à part son calibrage. Lorsqu'elle est inférieure à 54 %, il est considéré comme pauvre et doit être valorisé pour en permettre la commercialisation. Il existe deux calibres de minerai de fer à forte teneur. Le premier est le minerai d'une granulométrie supérieure à 8 mm, qui est appelé « minerai en morceaux », et le second, celui d'une granulométrie inférieure à 8 mm, qui est appelé « minerai fin ». (M. Dumont 2007)

I.2.Minerais de fer

Le minerai de fer est une combinaison de minerais desquels le fer métallique peut être extrait de façon rentable. Il s'agit d'une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxyde, comme l'Hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrique. Il est généralement commercialisé sous la forme d'un minéral plutôt que d'un métal, Il présente de nombreuses variantes chimiques et physiques qui servent à fournir le fer nécessaire à l'élaboration de l'acier ou à des fins non métallurgiques (oxyde de fer entrant dans la fabrication de pigments, d'appareils électroniques, d'abrasifs et de matériaux de constructions).

Il est principalement utilisé à 98% pour la fabrication d'acier et les 2% restants sont utilisés dans diverses applications :

- La **poudre de fer** dans certains types d'aciers, des aimants, des pièces d'automobiles et des catalyseurs ;
- Le **fer radioactif Fe59** est utilisé en médecine comme élément traceur dans la recherche biochimique et métallurgique ;

- Le **bleu de fer** dans les peintures, l'encre d'imprimerie, les plastiques, les produits cosmétiques, les couleurs de peintre, le bleu de lessive, la teinture de papier, l'engrais, les finis en émail cuit sur les véhicules et les électroménagers, et les finis industriels ;

- **L'oxyde de fer noir** comme pigment dans les composés de polissage, en métallurgie, en médecine, dans les encres magnétiques et dans les ferrites pour l'industrie de l'électronique. La production de l'acier, quant à elle, stimule presque toute la demande de minerai de fer.

I.3. Propriétés du minerai de fer

Les propriétés du minerai de fer font référence aux caractéristiques physiques, chimiques de ce matériau. Ces propriétés déterminent notamment son comportement dans différents environnements et son utilisation dans divers processus industriels.

I.3.1. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques du minerai de fer comprennent principalement (1) :

- Sa composition élémentaire : Le minerai de fer est principalement composé de fer, avec des traces d'autres éléments tels que le silicium, l'aluminium, le soufre, le phosphore, le manganèse, et d'autres métaux.
- Sa teneur en fer : Elle détermine la qualité et la valeur du minerai, les concentrations élevées étant généralement plus souhaitables.
- La présence d'impuretés : Des éléments indésirables comme le soufre et le phosphore peuvent affecter la qualité du fer produit et nécessiter des processus de purification supplémentaires.
- Sa réactivité chimique : Le minerai de fer peut réagir avec d'autres substances, notamment dans les processus de réduction et de transformation métallurgique.
- Sa capacité à former des composés : Le fer peut se combiner avec d'autres éléments pour former différents composés chimiques, ce qui influence ses propriétés physiques et son comportement dans différentes conditions.

I.3.2. Propriétés Physiques

Les propriétés physiques du minerai de fer incluent:

- Sa couleur : Le minerai de fer peut varier en couleur, allant du gris foncé au rougeâtre en fonction de sa composition chimique et de son degré d'oxydation.
- Sa densité : Le minerai de fer a généralement une densité élevée en raison de sa forte concentration en fer.
- Sa dureté : La dureté du minerai de fer peut varier en fonction de sa composition minéralogique, mais elle est généralement relativement élevée.

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- Sa magnétisme : Certains types de minerai de fer, comme la magnétite, sont magnétiques et peuvent être attirés par un aimant.
- Sa conductivité électrique et thermique : Le minerai de fer est un bon conducteur d'électricité et de chaleur, ce qui peut être exploité dans certaines applications industrielles.
- Sa structure cristalline : Le minerai de fer peut présenter différentes structures cristallines en fonction de sa composition chimique et de ses conditions de formation

I.4. Minéraux, dépôts et minéralisations du fer

Le fer peut se manifester sous des formes minérales diverses : Hématite, Magnétite, Sidérite, Pyrite etc.... (Tab. 2.01 et Tab. 2.02). La majeure partie du fer dans la croûte terrestre est combinée avec l'oxygène, formant ainsi des minerais d'oxydes de fer, tels que : l'Hématite (Fe_2O_3), la Magnétite (Fe_3O_4) et la Limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

Environ une météorite sur vingt comprend de la Taénite, unique alliage de minéral de fer-nickel (fer 35-80%) et de la Kamacite (fer 90-95%). Bien que rares, les météorites de fer sont une source de fer nickelé.

L'autre source naturelle de fer métal légèrement nickelé, sont les gisements de fer tellurique ou fer natif des minéralogistes qui sont plus rares. Environ 90% des gisements de minerai de fer dans le monde sont contenus dans une couche de faible épaisseur et très riche en Fe(II) "fer rubané".

Tableau I.1: Principales formes minérales du minerai de fer (R.M. Cornell, U. Schwertmann, 1996 ; A.P. Zhukhlistov, 2001)

Minerai	Répartition chimique	Couleur	Caractéristiques
MINERAIS OXYDES			
Magnétite Fe_3O_4	72,36% Fe 27,64 % O	Gris foncé à noir	Roche très magnétique.
Hématite Fe_2O_3	69,94% Fe 30,06% O	Gris acier à rouge vif	Elle a plusieurs origines de genèse. En dehors des roches sédimentaires, l'hématite prend naissance aussi dans les roches métamorphiques, ainsi qu'en petites quantités dans les veines hydrothermales, dans les roches magmatiques et dans les zones d'oxydation. On désigne ordinairement du nom d'hématite les variétés cristallisées et cristallines plus dures. L'hématite micacée est une hématite lamellaire qui se présente en grains, souvent associé au quartz. Si elle est stratifiée et forme une roche, on la désigne comme micaschiste ferreux ou

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

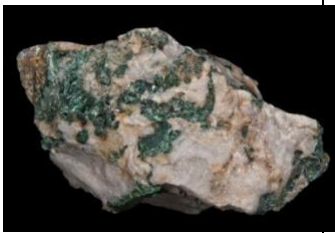
			itabirite. Les gisements d'hématite sont très nombreux dans le monde. Les gisements les plus riches se trouvent en Suède et en Russie.
Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$	60-65%	Noire-marron	La goethite est tout d'abord un produit d'altération d'autres minéraux de fer, dont la pyrite, la magnétite et la sidérite. Elle se forme en même temps que la limonite par oxydation de la pyrite ou par déshydratation de la limonite elle-même. Dans divers gisements, elle est aussi associée à l'hématite, à des oxydes de manganèse et à la calcite. On en trouve aussi à l'intérieur de géodes de quartz formées dans des environnements hydrothermaux. Les gisements les plus connus sont le Siegerland (Allemagne) et Cornouailles (Grande-Bretagne).
Limonite (Hématite brune) $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$	62,85% Fe 27,01% O 10,14% H_2O	Jaune ou marron, parfois noire	Elle se forme très fréquemment un peu partout, surtout par oxydation d'autres minerais de fer. Les deux principaux minéraux dont fait partie la limonite sont la goethite et la lépidocrocite. Elle est abondante dans les minerais oolithiques. Les plus importants gisements se trouvent en Suède et en Finlande où on l'appelle "fer des marais" ou "fer des lacs", parce qu'elle se forme au fond de certains lacs, sous l'action de microorganismes.
Ilménite FeTiO_3	36,80% Fe 31,57% Ti 31,63% O	Noire	Parfois en association avec de petites quantités de magnétite. Généralement exploitée pour le titane qu'elle contient. Le minerai de fer est extrait en tant que sous-produit. cette roche n'est pas magnétique.
MINERAIS CARBONATES			
Sidérite FeCO_3	48,20% Fe 37,99% CO_2 13,81% O	Blanche à grise verte, brune en présence d'humidité	On la trouve dans les roches sédimentaires (calcaires et schistes), dans les filons hydrothermaux et dans les filons métallifères. Elle est rarement pure à l'état naturel. On la rencontre le plus souvent avec le Ti ou le Ni. Elle s'altère en limonite ou goethite. les solutions hydrothermales, en traversant les formations carbonatées, dissout le calcaire qui est substitué par la sidérite (métamorphose hydrothermale). Pendant ce processus, il se forme du carbonate de calcium (Fleur de fer). Le plus important gisement est l'Erzberg (Eisenerz, Autriche)
MINERAIS SILICATES			
Chamosite, Stilpnomélane, Greenalite,	La formulation chimique est difficile, vu qu'il s'agit d'un groupe très complexe d'aluminosilicates alcalins de Mg, Al, Mn, Ba et fer. Les minerais de ce		

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Minnesotaite, Grunerite		type, bien que d'une importance assez limitée en tant que tels pour la production de minerai de fer, présentent un certain intérêt en tant que source de minerais oxydés.	
MINERAIS SULFURES			
Pyrite FeS ₂ (Or des fous)	46,55% Fe 53,45% S	Jaune cuivré	C'est la roche contenant du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est exploité comme sous-produit. On la trouve dans des roches de toute nature et de tout âge géologique, mais surtout dans les roches métamorphiques et sédimentaires associées à des milieux réducteurs. A l'état primaire elle est sous forme d'imprégnation ou disséminée dans la roche. La pyrite est souvent associée à des gisements de houille et à des lits argileux. Les principaux gisements sont : Italie (Gavorrano), Grèce (la Chalcidique) (Grèce), Suède (Gallivare) et Etats-Unis (Utah). Les principaux producteurs : l'Espagne (Rio Tinto) et le Japon.
Pyrrhotite FeS ₂	60,4% Fe 39,6% S	Jaune-Bronze	On le trouve couramment avec la Pentlandite et d'autres sulfures dans des roches ignées pauvres en silice : Kongsberg (Norvège), Andreasberg (Allemagne), Trentin (Italie) et Sudbury (Canada). La variété Troilite, dont la composition est proche de celle du sulfure de fer (FeS), est un constituant important de certaines météorites.
Marcassite FeS ₂	46,55% Fe 53,45% S	Jaune-cuivré	D'origine hydrothermale ou sédimentaire, la marcasite associée généralement à la galène, à la sphalérite, à la pyrite, etc... et à d'autres sulfures. On la trouve le plus souvent avec la pyrite dans le charbon et dans les roches sédimentaires ou métamorphiques. Elle forme des concrétions dans l'argile et dans le calcaire et apparaît, mais plus rarement, dans certaines veines de minerais. On a les gisements de : Folkestone, Douvres et Freiberg (Sud de l'Angleterre), Monts des Géants et Sokolov (Tchécoslovaquie), Cap Blanc Nez (France).

Tableau I.2 : Illustrations des principales formes minérales du minerai de fer
(R.M. Cornell, U. Schwertmann, 1996 ; A.P. Zhukhlistov, 2001)

Types de Minerais		
MINERAIS OXYDES		
Magnétite Fe_3O_4 	Hématite Fe_2O_3 	Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$ 
Magnesia, Thessalie (Bolivie)	Hématite, Col de Couraduque. Hautes-Pyrénées (France)	Hautes-Pyrénées (France) Goethite, Mine de fer de Dunet, Indre (France).
Limonite (Hématite brune) $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 	Ilménite FeTiO_3 	
Limonite, Gaofeng Mine (Chine)	Ilmenite sur épidote, Crique de Bilhéric, île de Groix, Morbihan (France)	
Les carbonates		
Sidérite FeCO_3 		

LES SILICATES		
Chamosite 	Stilpnomélane 	Greenalite 
Vielsalm, Bastogne, Province de Luxembourg (Belgique)	Stilpnomelane et adulaire du mont-Chemin en Valais (Suisse)	Biwabik, St. Louis County, Minnesota (USA)
Gruenerite 	Minnesotaite 	
Gruenerite, North of Keystone, South Dakota (USA)	Empire mine, Marquette iron range, Michigan (USA)	
LES SULFURES		
Pyrite FeS_2 (Or des fous) 	Pyrrhotite FeS_2 	Marcassite FeS_2 
Pyrite - Mines de Huaron (Pérou)	Pyrrhotite et quartz Bluebell Mine - Colombie Britannique (Canada)	Marcassite en rognon, Carrière de Beez, Namur (Belgique)

I.5. Production du Minerai de Fer en Algérie

Le minerai de fer est une ressource minière importante pour l'Algérie, en dehors des hydrocarbures. L'exploitation de ces gisements a toujours été un pilier de l'industrie extractive du pays. Les principaux gisements, tels que ceux de l'Ouenza et de Boukhadra dans l'est du pays, sont exploités par le groupe SIDER Tébessa, avec des réserves significatives et une production annuelle de 2 millions de tonnes. D'autres gisements, comme Chaabet-el-Ballout à Souk-Ahras et ceux de SOMIFER-spa à Khanguet, Sidi Maarouf et Djebel Anini, présentent également des réserves substantielles. Le gisement de Rouina à Ain Defla fournit du minerai de fer utilisé principalement dans la production de ciment. D'autres gisements potentiels se trouvent dans le sud-ouest du pays, notamment à Gara-Djebilet et Mecheri-Abdelaziz, avec des réserves géologiques importantes en minerai de fer. Ces gisements non exploités représentent un potentiel significatif pour l'avenir de l'industrie minière de l'Algérie. En particulier, le gisement de l'Ouenza est crucial pour l'approvisionnement en minerai de fer de l'industrie sidérurgique nationale. La majeure partie de la consommation du complexe sidérurgique d'El Hadjar provient de la Mine de l'Ouenza, soulignant ainsi son rôle primordial dans l'économie algérienne en stimulant le développement de l'industrie lourde et en favorisant l'emploi. (2)



Figure I.1: La mine du minerai de fer à Ouenza, Algérie

I.6. PRODUCTION DU MINERAI DE FER DANS LE MONDE

En 2024, la production mondiale de minerai de fer a été estimée à 2,5 milliards de tonnes, soit une baisse de 1 % par rapport à 2023. Les quatre principaux producteurs ont fourni collectivement les trois-quarts du minerai de fer mondial. L'Australie a été le plus grand producteur, représentant 37 % du total. Le Canada s'est classé au huitième rang des producteurs mondiaux de minerai de fer et au sixième rang en ce qui concerne les réserves(3).

Tableau I.3: Production mondiale de minerai de fer, par pays, 2024 (dpr)

Classement	Pays	Millions de tonnes	Pourcentage du total
1	Australie	930	37,2 %
2	Brésil	440	17,6 %
3	Chine	270	10,8 %
4	Inde	270	10,8 %
5	Russie	91	3,6 %
6	Iran	90	3,6 %
7	Afrique du Sud	66	2,6 %
8	Canada	54	2,2 %
9	États-Unis	48	1,9 %
10	Ukraine	42	1,7 %
-	Autres pays	199	8,0 %
Total		2 500	100,0 %

En 2024, la production minière canadienne de minerai de fer en concentrés et en boulettes a atteint 70 millions de tonnes, soit une hausse de 7 % par rapport à l'année précédente.

Dans le même année, la production canadienne d'acier brut estimée est demeurée stable, à 12 millions de tonnes, ne montrant aucun changement significatif par rapport à 2023.(3)

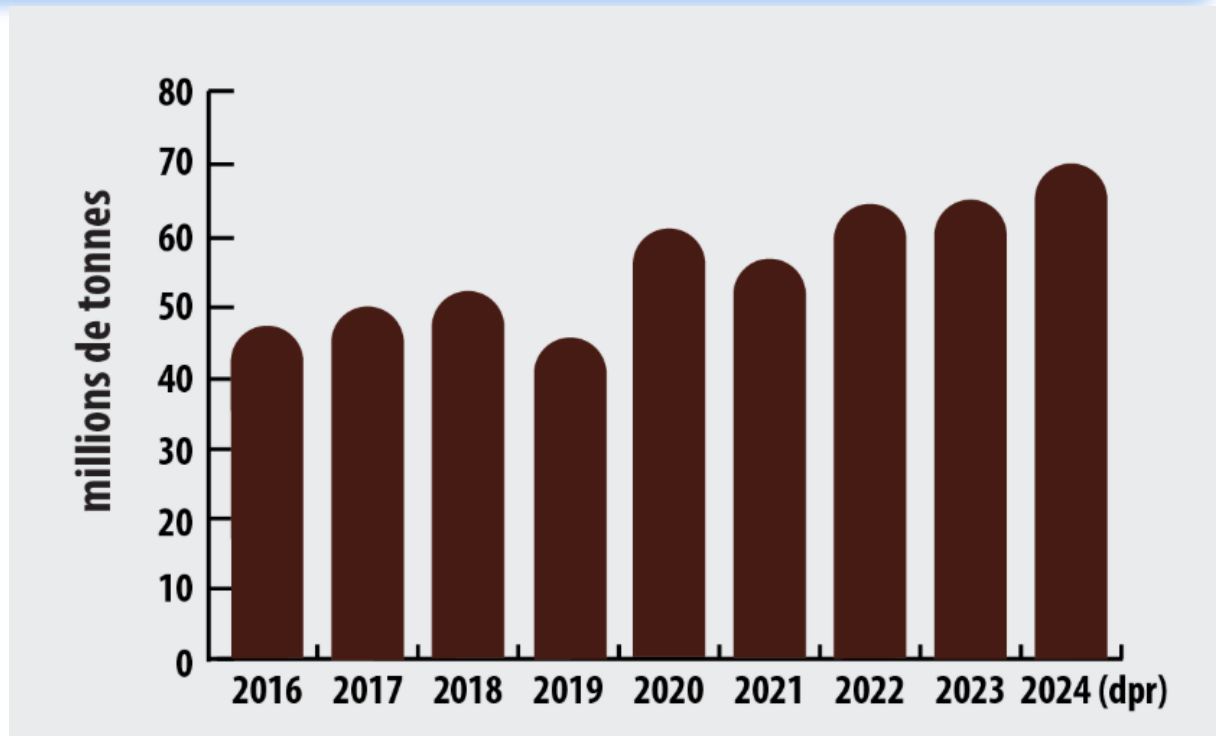


Figure I.2: Production minière canadienne de minerai de fer, 2015–2024 (dpr) (3)

I.7.Méthode d'Exploitation du Gisement de Fer (G.M.Houdaifa Hadjira,2020)

La méthode d'exploitation minière se compose d'une série d'opérations de creusement, de décapage et d'extraction du minerai suivant un ordre précis. Le système d'exploitation se distingue par l'organisation spatiale et temporelle des travaux préparatoires, de décapage et d'extraction du minerai. Le choix de la méthode d'exploitation est conditionné par les facteurs suivants : les caractéristiques géologiques du gisement, le nombre et la puissance des équipements impliqués dans la chaîne technologique d'exploitation, le mode d'ouverture du gisement, la morphologie des gisements ainsi que les propriétés physicomécaniques du minerai et des roches à évacuer, en tenant compte également du relief du terrain, de l'épaisseur et de l'inclinaison des filons. Dans une mine, l'exploitation se déroule en plusieurs étapes bien définies :

1. Le processus commence par le forage à l'aide de foreuses, avec des gradins atteignant une hauteur de 15 mètres ;
2. Ensuite, les trous ainsi réalisés sont chargés d'explosifs ;
3. Les explosifs sont ensuite détonés ;
4. Les masses extraites sont rechargées à l'aide de pelles et de chargeuses ;
5. Elles sont ensuite transportées par camion jusqu'à la station de concassage ;

6. Après le criblage et le concassage, les matériaux passent sous un concasseur avant d'être acheminés au parc de stockage via un convoyeur à bande ;

7. Enfin, les matériaux sont expédiés vers le Complexe sidérurgique dans des wagons de 60 tonnes gérés par la SNTF.

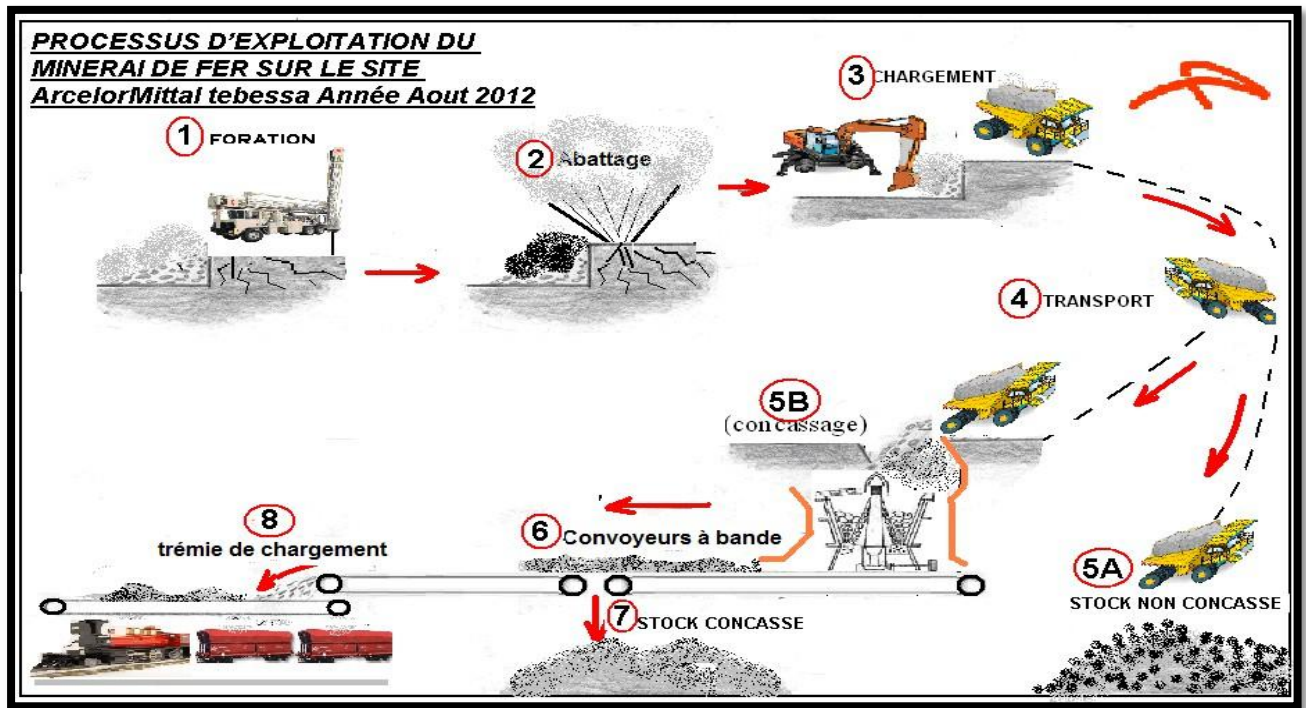


Figure I.3: Processus d'exploitation de minerai de fer dans la mine de l'Ouenza
(G.M.Houdaifa Hadjira, 2020)

I.8.Préparation des Matières Premières

Le minerai de fer doit passer par plusieurs étapes de préparation pour éliminer les impuretés et le rendre plus adapté au processus de fabrication de l'acier. Les principales étapes de préparation du minerai de fer sont les suivantes: (4)

- **Extraction** : Le minerai de fer est extrait des roches dans lesquelles il est contenu. Ce type d'exploitation minière a généralement lieu dans des mines à ciel ouvert ou souterraines. Dans l'exploitation minière à ciel ouvert, des explosifs sont utilisés pour briser la roche et exposer le minerai de fer. Dans les mines souterraines, des galeries sont creusées pour le minerai de fer. Il est extrait à l'aide de machines et de techniques spéciales afin de minimiser les risques pour les travailleurs et l'environnement.

- **Tamissage** : Cette étape est réalisée pour classer le minerai en différentes qualités à l'aide de différents types de tamis avec des tailles de maille variées.

- **Concassage** : Le minerai de fer est d'abord broyé en morceaux plus petits pour faciliter son traitement ultérieur.

- **Broyage** : Les morceaux de minerai de fer sont ensuite broyés en une fine poudre afin de libérer les particules de fer des autres minéraux présents dans le minerai.

- **Triage mécanique** : Cette étape consiste à séparer les différentes parties du minerai selon leur teneur en fer et leurs caractéristiques physiques et chimiques. Le processus de tri mécanique consiste généralement en une séparation par gravité, une séparation par cyclone, une séparation par densité ou une séparation magnétique. Ces techniques permettent de séparer les particules de minerai selon leur poids spécifique, leur taille et leur composition en fer.

- **Enrichissement par flottation** : Cette technique consiste à utiliser des agents chimiques pour rendre les particules de fer hydrophobes, les faisant ainsi flotter à la surface tandis que les impuretés restent dans la solution aqueuse.

- **Décantation** : Il est utilisé pour séparer les particules solides de minerai de l'eau. Une fois les solides déposés, l'eau claire présente sur les sédiments s'écoule lentement, permettant aux particules de fer concentrées de collecter et d'éliminer le liquide restant. Les sédiments contenant des impuretés et des particules indésirables sont ensuite éliminés. le liquide restant. Les sédiments contenant des impuretés et des particules indésirables sont ensuite éliminés.

- **Filtrage et séchage** : La filtration et le séchage du minerai de fer sont des étapes importantes du traitement du minerai avant sa conversion en concentré de fer.

- **Filtration** : Après broyage et concentration, le minerai de fer est généralement mélangé à de l'eau pour former une pulpe. Cette pâte est ensuite filtrée pour séparer les particules de fer du liquide. La filtration capture les particules de fer solides, tandis que l'eau et les autres substances indésirables sont éliminées. Un filtre sous pression, un filtre cylindrique ou un filtre sous vide peuvent être utilisés comme filtre, selon les caractéristiques du minerai traité.

- **Séchage** : Une fois les particules de fer séparées du liquide, elles sont généralement humides et doivent être séchées avant le stockage ou l'expédition.

Le séchage peut être effectué à l'aide de différents équipements, tels qu'un séchoir rotatif, un séchoir à bande ou un séchoir à lit fluidisé. Le but du séchage est de réduire la teneur en humidité de l'oxyde de fer pour assurer sa stabilité et faciliter son transport.

I.9. Historique

Durant l'époque coloniale, la recherche et l'exploitation minières du fer s'intéressaient uniquement aux gisements sub-affleurant, peu profonds, faciles à exploiter et à teneur riche en fer.

- La première exploitation de fer en Algérie a débutait approximativement durant l'année 1867 à Béni Saf par la société Mokta El Hadid (ASGA, 2023).

- De 1865 à 1966, plus de 117 millions de tonnes de minerai de fer ont été extraites, dont 100 Mt provenaient des principales mines de l'Ouenza et Boukhadra (Tébessa), Timezrit (Béjaia), Rivet El Maden (Blida), Zaccar (Ain Defla) et Béni Saf (Ain Témouchent). Le reste provenait des 28 petites exploitations fermées avant l'indépendance pour diverses raisons.

- En 1921 et 1925, la société de l'Ouenza entama, respectivement, l'exploitation des plus grands gisements connus à l'époque de l'Ouenza et de Boukhadra (ORGM, 1990).

- A l'aube de l'indépendance, des missions de recherches minières et géologiques, guidées par le Bureau Algérien de Recherches et d'Exploitations Minières (BAREM), étaient programmées à travers le territoire national en vue d'établir un bilan sur les gisements connus et de déterminer les terrains privilégiés et perspectifs pour la mise en évidence des gisements de substances métalliques et/ou non métalliques.

- En 1967 (création de la SONAREM), la participation algérienne dans la production mondiale en minerai de fer était de l'ordre de 0,48% avec 3Mt/an (22ème place sur 43 producteurs mondiaux et la 4ème place des producteurs en Afrique).

- De 1964 à 1988, des campagnes de recherche et d'explorations minières étaient effectuées sporadiquement sur certains gisements et anciennes exploitations et depuis, pratiquement aucune campagne n'a été mise en œuvre pour déterminer et circonscrire le potentiel géologique ferrifère national, à l'exception des quelques campagnes de prospection à caractère régional qui ont été entreprises par la SONAREM, puis l'EREM (actuel ORGM) dans les régions suivantes : (6)

- ✓ Petite Kabylie (1972-1974) ;
- ✓ Région de Collo (1972-1984) ;
- ✓ Région de l'Ouenza-Boukhadra (1976-1979) ;
- ✓ Nord-Est algérien (1985-1988).

I.10.UTILISATIONS ET APPLICATIONS DU FER

Traditionnellement, deux principaux types de produits peuvent être distingués : les plats et les longs. Les produits plats en feuilles ou en bobines comprennent les plaques, les

feuillards, les tôles minces nues ou revêtues. Les produits longs regroupent principalement les profilés lourds du type poutrelles, rails et fils. Ce sont ces produits "semi-finis" qui entreront dans le processus de fabrication de différentes industries allant du bâtiment, aux boîtes de conserves alimentaires, en passant par les composants électroniques ou les coques de certains bateaux. (KARA Mourad , DJEFAFLA Sayah,2005)

I.10.1.Applications industrielles du fer

C'est le métal le moins coûteux. Il est rarement employé à l'état pur, car il se corrode facilement. C'est également le métal le plus utile sous forme d'acier. L'acier est obtenu à partir de la fonte liquide. Cet acier carboné renferme au maximum 2 % de carbone. Il existe également l'acier allié où d'autres éléments métalliques qui sont incorporés lors de son élaboration afin d'en modifier les propriétés. Selon la teneur de l'acier en carbone, on obtient un matériau doux malléable et ductile pour des teneurs inférieures à 0,2 % de carbone, demi-dur ou extra-dur pour des teneurs plus élevées. En fonction de leur dureté, ils sont choisis comme matériaux pour outillages ou de construction. Aujourd'hui, les aciers de construction sont généralement des aciers alliés qui peuvent répondre à des sollicitations mécaniques plus élevées que les aciers carbonés. Les aciers inoxydables sont des aciers alliés contenant des pourcentages élevés de chrome et de nickel, leur assurant une bonne résistance à la corrosion.

I.10.2.Dans la construction

Les inventions de bessemer, martin et thomas en permettant de fabriquer un acier normalisé et standardisé ont ouvert la voie à une production de masse. À partir de cette époque, l'acier a commencé à être plus généralement employé notamment dans la réalisation d'ouvrages architecturaux. Il est aujourd'hui le métal le plus utilisé dans ce secteur où il sert notamment à la réalisation d'ouvrages d'arts tels que les ponts. Même s'il n'en constitue pas le matériau de base, l'acier est presque toujours présent puisqu'il sert à armer le béton, permettant ainsi de renforcer les fondations et de le rendre plus résistant à long terme. Il permet également de fermer le squelette de certains bâtiments. La construction est le premier secteur d'utilisation de l'acier

I.10.3.Dans l'automobile

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

devra être traité contre la corrosion (application d'une couche de zinc et d'une couche de peinture, pour les carrosseries notamment) (KARA Mourad , DJEFAFLA Sayah2005)

I.11. DOMAINES D'UTILISATION (R. M. Cornell, U. Schwertmann., 2003)

L'utilisation de minerai de fer est diversifiée, presque 98% du minerai expédié est utilisé comme une matière première pour les industries sidérurgiques, le reste est reparti aux autres domaines telles que :

- Additif pour la fabrication des ciments ;
- Pigments pour la peinture et l'industrie constructive ;
- Ferrite et pigments magnétiques ;
- Catalyses pour des synthèses industrielles ;
- Adsorbant pour la purification de l'eau et du gaz et du traitement des fluides faiblement radioactives ;
- Fabrication des bijoux (surtout l'hématite) ;
- Industries chimiques ;
- Production photochimique ;
- Agent de pondération dans les boues de forage ;
- Alimentation animale ;
- Production des engrais ;
- Amélioration des sols ;
- Enrichissement des minéraux (lavage du charbon) ;
- Polissage des lentilles optiques.

I.12.MARCHÉ DU MINERAI DE FER :

Dans le passé, les distances avaient divisé le monde en marchés individuels des minerais de fer. Depuis quelques décennies, on assiste à l'approvisionnement des grandes sidérurgies par des minerais ayant accompli des trajets maritimes très longs. Il n'existe pas de marché formel organisé du minerai de fer et de l'acier. La formation des prix n'est en cela pas transparente, toutefois, l'usage veut que les prix soient fixés de gré à gré entre grandes sociétés internationales. (KHENKHAR Mohamed Islam,2018)

I.12.1 Prix

Bien que le prix du minerai de fer soit influencé par de nombreux facteurs subtils et variables, comme les coûts, les tarifs de fret, la qualité des produits et les taux de change, il demeure principalement tributaire de l'offre et de la demande. Généralement, le prix du minerai de fer est d'abord négocié à huis clos entre un certain nombre d'exploitants de mines

et leurs clients producteurs d'acier d'Asie et d'Europe, puis, une fois qu'un certain nombre d'ententes et de contrats annuels ont été signés, le reste des exploitants emboîtent le pas et un « prix du marché » est fixé.

I.12.2 Établissement des prix

Il semble que la négociation annuelle d'un prix du minerai de fer avec les utilisateurs s'avère de plus en plus difficile, à mesure que l'on abandonne les contrats à long terme pour profiter du prix au comptant élevé du précieux minerai. Le développement d'un marché financier diversifié du minerai de fer permettrait aux exploitants d'usines de traitement et aux producteurs de fixer leurs prix de manière à courir moins de risques et de favoriser un équilibre entre les prix de référence et les prix au comptant, ainsi qu'entre leurs intérêts respectifs, afin d'éliminer la combativité et la tension inhérentes aux négociations annuelles. Le minerai de fer est commercialisé sous plusieurs formes : les morceaux, blocs rocheux, de plus de 40 mm environ (lumps ou calibrés), les fines (0-10 mm) pour agglomération sur grille (ou sinter-feed), les boulettes (10-20 mm) ou pellets, fabriquées à partir de minerais très fins (moins de 100 mm). On estime à près de 98% la part du minerai de fer employé pour la fabrication d'acier. Ce pourcentage très élevé s'explique notamment par le caractère extrêmement polyvalent de ce métal en comparaison avec la fonte. (MOUSSACEB. K 2007)

I.13. TYPE DES GISEMENTS FERRIFÈRES

Le fer est l'un des éléments les plus abondants de l'écorce terrestre qui en contient près de 5%. C'est très probablement un des constituants essentiels du noyau, il est également présent dans les météorites et les poussières cosmiques. Il s'est concentré en gisements, à de nombreuses époques géologiques, en de multiples endroits de la croûte terrestre et dans des conditions génétiques variées. Une des classifications géologiques les plus complètes est celle qui est basée sur la notion de type telle que l'a proposée F. Blondel en 1955 et que l'a développée P. Routhier en 1963. Elle ne distingue pas moins de quinze types de gisements et un certain nombre de sous-types. Tous les types répertoriés n'ont évidemment pas la même importance sur le plan économique. Seuls ceux qui correspondent aux minerais le plus fréquemment utilisés par la sidérurgie (J. BLONEAU 2005).

I.13.1. Quartzites ferrugineux

Généralement rubanés, ce sont, à l'origine, d'énormes dépôts de quartzites ferrifères dont les seuls éléments sont pratiquement la silice et les oxydes de fer. Ces formations apparaissent dans tous les vieux socles précambriens du monde : Amérique du Nord, Brésil, Venezuela, Afrique, Scandinavie, Russie, Ukraine, Inde, Australie, et portent divers noms

consacrés par les usages locaux (itabirite, iron formation, taconite, banded hematite, quartzite, jaspillite, etc.). Leur origine sédimentaire par précipitation chimique est très généralement admise. D'après une hypothèse formulée plus récemment, le dépôt pendant le Précambrien de quantités considérables de quartzites ferrugineux serait étroitement lié au développement de la vie dans les océans, à une époque où l'atmosphère était composée d'azote et de gaz carbonique, mais dépourvue d'oxygène, et où les eaux, rendues acides par ce gaz carbonique, pouvaient dissoudre de grandes quantités de fer à l'état de fer ferreux. La formation de ces quartzites limitait la pression de l'oxygène à un faible niveau par fixation de tout l'oxygène produit par photosynthèse ; ce n'est que lorsque le fer fut entièrement précipité que l'oxygène put s'accumuler dans l'atmosphère, permettant l'apparition de nouvelles formes de vie. Ces dépôts très anciens ont été soumis à un métamorphisme plus ou moins intense, et parfois ont été fortement plissés, ce qui a favorisé leur évolution ultérieure et la formation des minerais riches à hématite. Les premiers quartzites ferrugineux exploités ont été ceux du Lac Supérieur (États-Unis). Puis ont été mis en exploitation les gisements du Québec-Labrador, du bassin de Krivoï Rog, du bassin de Suède Centrale et du Liberia (Bong)

I.13.2. Gisements associés :

La plupart des grands gisements de minerais riches à hématite se sont formés aux dépens des quartzites ferrugineux, par lessivage de la silice dans des conditions géologiques et géographiques particulières et encore mal élucidées avec, dans certains cas, remise en mouvement d'une partie du fer en dissolution. Malgré leur origine semblable, les gisements de minerais riches à hématite présentent entre eux des différences importantes, liées au dépôt originel, aux influences métamorphiques et tectoniques (plissements) qu'ils ont pu subir et aux conditions particulières de leur altération. Les minerais riches à hématite sont associés à la plupart des formations de quartzites ferrifères (Canada, États-Unis, Venezuela, Brésil, Inde, Mauritanie, Australie, etc.). Ils constituent souvent des amas de plusieurs centaines de millions de tonnes et sont exploités dans de très grandes mines à ciel ouvert.

I.13.3. Minerais de ségrégation dans les roches acides :

Ils sont tous associés à des laves acides et comprennent toujours de la magnétite, de l'oligiste (martite) et de l'apatite. Les teneurs en fer varient entre 50 et 71 %, avec 0,8 à 2 % de phosphore. Les alcalins sont relativement abondants, le titane et le vanadium sont fréquents. Leur nom vient de l'interprétation que les géologues ont donné pendant longtemps de leur origine : il était admis que la minéralisation dérivait du même magma que les porphyres dont elle s'était différenciée en profondeur (d'où le terme de ségrégation).

I.13.4.Minerais oolithiques :

Les minerais de fer oolithiques sont très répandus mais pratiquement plus exploités. Les gisements se sont formés pendant les ères primaire et secondaire. Ce sont tous des gisements sédimentaires marins, caractérisés par une texture oolithique : les oolithes sont des grains ovoïdes concrétionnés formés de couches concentriques, leurs dimensions varient de 80 µm à 2 mm environ. Sur le plan minéralogique, ces minerais sont caractérisés par une grande variété de constituants : limonite, hématite rouge, oligiste, chlorites, magnétite, sidérose, pyrite, quartz et calcite, dont les proportions peuvent varier d'un gisement à l'autre mais aussi à l'intérieur d'un même gisement. (Gîte oolithique d'Ain Babouche, Gara Djebilet en Algérie)

I.13.5.Autres types

On se limitera à trois d'entre eux, qui présentent ou ont présenté jusqu'à une date récente un certain intérêt pour les sidérurgistes.

-Gisements pyrométasomatiques sont caractérisés par la présence d'une formation particulière appelée skarns, très colorée et riche en espèces minérales variées, due à un métamorphisme de contact ou régional intense. Les minerais correspondants sont à magnétite et à oligiste. Ils peuvent être pauvres ou riches en manganèse et contiennent souvent des éléments indésirables : cuivre, phosphore, etc. Les gisements de l'Oural, le gisement de Marcona au Pérou, Rouina-Anini, et Aïn Sedma en Algérie, aussi de nombreux gisements chinois sont rattachés à ce type.

-Gisements de substitution : se sont formés par circulation d'eaux hydrothermales chargées en fer, qui ont entraîné le remplacement de calcaire par de la sidérose. Celle-ci s'est ensuite transformée en hématite par altération au contact des eaux de surface. Le gisement d'Ouenza, en Algérie, appartient à ce type.

-Les placers sont des dépôts de minéraux lourds le long des rivages ou dans les rivières. Certains rivages présentent ainsi de grandes accumulations de minéraux ferifères (magnétite associée généralement à de l'ilménite) mélangés à du sable et faciles à enrichir. De tels gisements sont exploités à grande échelle en Nouvelle-Zélande. (J. BLONEAU 2005)

I.14 GENERALITES SUR LA LIXIVIATION

I.14.1 Définitions

Provenant du latin *lixivium* (lessive), la lixiviation désigne une technique de lessivage de produits solides par un solvant approprié, de façon à en extraire les parties solubles (5). Le dictionnaire de l'environnement définit la lixiviation comme étant une percolation lente de l'eau à travers le sol permettant la dissolution des matières solides qui y sont contenues. Le liquide résultant est appelé *lixiviat*. Par exemple, l'eau peut ainsi se charger en substances toxiques lors de la traversée des sols ayant servi de décharges, ou des sols contenant des nitrates en quantité. La lixiviation consiste à mettre en solution, sous forme ionique, le ou les métaux recherchés. Le but est de déterminer le type de lixiviat optimal en termes de consommation et de coût de réactif, de solubilisation minimale d'impuretés et d'entretien du matériel.

C'est une technique utilisée pour décontaminer des terres ou des déchets pollués par des éléments organiques ou minéraux.

I.14.2 Définition du lixiviat

Les lixiviats sont des effluents toxiques issus des centres de stockage des déchets appelés «jus de décharges» résultent de la percolation, au travers du massif de déchets, de l'eau contenue dans les déchets et de celle apportée par les précipitations. Ils sont composés de multiples éléments organiques et minéraux. Lors de leur stockage et sous l'action conjuguée de l'eau de pluie et de la fermentation naturelle, les déchets produisent une fraction liquide appelée «lixiviats». Riches en matière organique et en éléments traces, ces lixiviats ne peuvent être rejetés directement dans le milieu naturel et doivent être soigneusement collectés et traités.

I.14.3 Techniques de lixiviation

Selon la nature, le conditionnement et la teneur en éléments utiles du minerai ou du concentré à traiter, on distingue plusieurs techniques de lixiviation, basées essentiellement sur le mode de mise en solution du métal qui nécessite la réalisation du contact entre le composé contenant le métal et le solvant idéalement choisi. Ainsi, il existe deux méthodes de lixiviation appliquées en métallurgie extractive à savoir : La lixiviation par percolation et lixiviation par agitation (P. Aravind, 2005).

I.14.4 Lixiviation par percolation

Ce procédé est appliqué quand le minerai constitue un ensemble suffisamment et uniformément poreux pour pouvoir être traversé, d'une manière permanente, par la solution. La percolation est pratiquement le mode de lixiviation le plus économique. Elle consiste à faire passer la solution d'attaque à travers la masse métallifère qui reste statique. Le minerai

est soit en place (in situ), disposé en tas ou encore broyé et disposé dans des tanks.

a. Lixiviation in situ

Cette méthode consistant en la lixiviation directe du minerai en place est utilisée lorsque les teneurs en éléments valorisables sont tellement faibles qu'elles n'assurent pas la rentabilité des opérations de minage et de transport vers la surface.

Cette méthode d'exploitation consiste à traiter des dépôts minéralisés conservés dans leurs sites géologiques ayant ou non subi une fragmentation. Sa pratique requiert certaines conditions dont la plus importante est que le gisement soit limité par des couches imperméables empêchant la perte des solutions riches, mais qu'il soit perméable à la solution de lixiviation elle-même. Généralement, on l'utilise pour extraire les sels solubles directement des gisements souterrains ; qui peut se faire par irrigation ou par injection de la solution selon que le gisement est exposé ou enterré. Il existe deux méthodes de lixiviation in situ. La première est la lixiviation par irrigation (spraying), qui est appliquée lorsque le gisement est exposé et la solution de lixiviation est arrosée sur le dessus du gisement et la seconde, est la lixiviation par injection, qui est appliquée lorsque le gisement est enterré et la solution de lixiviation est injectée dans le gisement à travers un système de tuyaux verticaux perforés

b. Lixiviation en tas

Par cette lixiviation, on traite le minerai en le disposant sous forme de tas sur des surfaces de drainage imperméables, en pente. La solution de lixiviation est arrosée sur le dessus du tas et percole ensuite à travers ce dernier, tout en solubilisant le métal de valeur. Cette technique s'applique également aux minerais très pauvres. La lixiviation en tas exige une bonne fragmentation naturelle ou artificielle du minerai jusqu'à une granulométrie variant entre '6,35 mm et 19,05 mm', dépendant du minerai lui-même, afin d'éviter la migration verticale provoquée souvent par la présence des particules ultrafines et de permettre un contact efficace entre les réactifs et les minéraux, et une bonne isolation naturelle ou artificielle vis-à-vis des réseaux hydrologiques souterrains pour éviter la pollution(Y. Tapia, E. Eymar, A 2013) Deux cas sont retenus pour ce type de lixiviation. Le dump leaching où les minerais sont placés en tas sur une surface naturellement imperméable. La solution lixivante est aspergée au-dessus du tas et on récupère la solution enrichie en bas et le heapleaching dont le principe est le même que pour le Dump leaching, sauf que dans ce cas, le tas de minerais est placé sur une surface rendue artificiellement imperméable.

c. Lixiviation en bac (cuve)

Cette technique consiste à mettre dans une cuve des minerais broyés d'environ 10 mm de diamètre et y verser la solution d'acide. Elle est basée sur le principe de cafetière. Ceci nous

permet de récupérer toute la solution chargée des éléments utiles en dessous de la cuve. Elle s'applique à des minerais dont la teneur est suffisante tout en évitant les matières argileuses.

I.14.5. Lixiviation sous pression

Quelques fois, il est nécessaire de travailler sous pression pour accélérer la mise en solution des éléments valorisables lorsque celle-ci s'avère lente à pression atmosphérique et avoir un meilleur rendement. Elle est effectuée en autoclave sous haute pression et à haute température. Les réactifs utilisés sont hautement volatils tels que le $NNHH_3$, OO_2 , HH_2 . Par le fait de la haute pression, l'oxygène dissous permet la lixiviation de certains sulfures insolubles dans des conditions de lixiviation ordinaires. C'est le procédé de lixiviation le plus coûteux du point de vue coût d'investissement et coût opératoire. (Y. Tapia, E. Eymar, A. Garate, A 2013)

I.14.6. Lixiviation par agitation (Habashi F., 1970)

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

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

I.14.7 Types de lixiviation (Mwepu wa Nzovu ,2013)

Les types de lixiviation sont classés suivant les agents lixivants utilisés ,On distingue :

- Lixiviation chimique (Mwepu wa Nzovu,2013) :

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

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

A. Lixiviation acide:

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

➤ **Lixiviation acide et oxydante :**

Il y a lixiviation oxydante lorsqu'il y a montée d'état d'oxydation de l'élément dans la solution que dans le solide. Ce type de lixiviation s'applique aux minerais mixtes (oxyde et sulfures). L'acide sulfurique est le solvant le plus utilisé. Les conditions oxydantes peuvent être réalisées par l'air (oxygène) ou par les ions ferriques présents (provenant des minerais ou ajoutés intentionnellement). (Patrick Mbweb Katshil,2017)

➤ **Lixiviation acide et réductrice:**

Dans ce types de lixiviation, la solution lixiviante est rendue réductrice par un agent réducteur tels que le SO_2 , le fer ferreux, le NO_2 , le metabisulfite de sodium. La réduction permet la dissolution des oxydes tels que MnO_2 et CO_2O_3 qui ne sont pas solubles dans l'acide sulfurique dilue (Patrick Mbweb Katshil,2017).

B. Lixiviation ammoniacale:

La lixiviation ammoniacale est utilisée pour les minerais à gangue dolomitique (CaO , MgO) qui se prêtent mal à une attaque acide. Pour les minerais sulfurés, la lixiviation ammoniacale se fait en présence d'oxygène comme agent lixiviation . (Mwepu wa Nzovu ,2013)

C. Lixiviation par cyanuration :

Ce type de lixiviation est applique essentiellement au traitement des métaux précieux. On utilise une solution diluée de cyanure de potassium (KCN) en milieu basique pour éviter l'hydrolyse du cyanure. (Patrick Mbweb Katshil,2017).

D. Lixiviation par les chlorures

Cette lixiviation est utilisée pour les minerais sulfurés mais l'utilisation de l'acide chlorhydrique est exclue compte tenu de son prix qui est élevé, cependant on emploie une solution acide de FeCl_3 .

E. Lixiviation par la soude caustique

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

I.14.8 Lixiviation bactérienne

Elle est utilisée pour la mise en solution des mineras sulfurés, pauvres et complexes. La biolixiviation (appelée aussi lixiviation biologique ou lixiviation bactérienne) est

une technique d'extraction de métaux à grands intérêts économiques d'une roche, mettant en jeu des micro-organismes (les thiobacilles et les ferrobacilles possèdent des propriétés catalytiques permettant d'augmenter la cinétique de lixiviation). Capables de convertir les métaux de la forme solide à la forme soluble, et qui pourront ensuite être extraits.

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

Lorsque les microorganismes utilisent les minéraux comme source d'énergie en saisissant des électrons pour leur enrichissement. Cette technique s'effectue sans rejet de SO₂ dans l'atmosphère (Brierley, J., 2001)

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

On a trois catégories des bactéries suivantes qu'elles procèdent à température faible, moyenne ou exagérée (Rodriguez, Y., Ballester, M.L., Blazquez, F., Gonzalez, J.A., Munoz, J.A., 2003) sont :

- Les bactéries mésophiles largement connus par leur activité métabolique à température faible et moyenne (30°C à 35°C) sont Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus thiooxidans, Leptospirillum ferrooxydans (thermotolerant up to 50°C) et Thiobacillus caldus ;

- Les bactéries thermophiles moyenne (biolixiviation de 50°C à 55°C) : Thiobacillus caldus, Sulfobacillus (tolérant jusqu'à 63°C), Sulfobacillus thermosulfidooxydans, Sulfobacillus acidophilus et Acidimicrobium ;

- Les bactéries thermophiles exagérés (60°C à 85°C) : Sulfolobus (sulfolobus metallicus, sulfolobus acidocaldarius), Acidianus brierleyi.

I.14.8 Mécanisme de la lixiviation (Michel Bonan, 1998)

Après une étude approfondie du mécanisme de lixiviation, la transformation physico-chimique s'opère en plusieurs étapes :

- Le transfert des réactifs en solution vers l'interface solide-liquide.
- L'absorption des réactifs à la surface.
- La désorption des produits solubles de la réaction.
- Le transport des produits de l'interface solide-liquide vers la solution. (Brierley, J., 2001)

I.14.9 Paramètres de lixiviation (Kashala Mpanga,2014)

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

Les paramètres importants sont :

- ✓ La température
- ✓ L'agitation
- ✓ Le pourcentage des solides
- ✓ Le pH
- ✓ La concentration de l'agent lixiviant
- ✓ La granulométrie
- ✓ Le temps.

I.14.10 Réactifs de lixiviation

Les réactifs de lixiviation les plus couramment utilisés sont (Mwepu wa Nzovu2013):

➤ **L'eau** : Elle est utilisée pour la lixiviation des minerais solubles dans l'eau tels que les sulfates et même les oxydes.

➤ **Les acides** : Les acides sont utilisés pour l'attaque de plusieurs constituants parfois d'une manière sélective. L'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, l'acide nitrique sont les réactifs les plus utilisés.

➤ **Les bases** : Les bases telles que l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde d'ammonium (NH₄OH) sont utilisées respectivement pour la lixiviation des bauxites ainsi que celle des minerais de cuivre et de nickel

➤ **Les sels solubles** : Le sulfates ferreux, les chlorures, les carbonates et cyanures de sodium permettent la lixiviation de certains minerais sulfurés tels que le CuS.

➤ **Les bactéries** : Les microorganismes tels que ; les thiobacillus pour les sulfures des métaux, les minerais complexes ainsi que pour les roches à faible teneur en minerai (< 0.4%). On effectue donc une biolixiviation.

➤ **Les gaz dissouts** : Le Dioxyde de soufre, Dichlore, Oxygène sont utilisés par exemple pour la lixiviation du Zinc . (Blazy P.,1979)

Conclusion

À travers cette recherche bibliographique, il apparaît que le minerai de fer occupe une place essentielle dans l'industrie métallurgique et constitue une ressource stratégique pour le développement économique et industriel. L'étude des différentes formes minéralogiques du fer, de leurs caractéristiques physico-chimiques ainsi que de leur répartition a permis de mieux comprendre les particularités de cette ressource et les enjeux liés à sa valorisation.

Par ailleurs, l'analyse des procédés de traitement, notamment la lixiviation, a mis en évidence l'importance de cette technique dans l'extraction et la récupération des métaux à partir des minerais. Les différents facteurs influençant son efficacité montrent que la maîtrise des paramètres opératoires est indispensable pour optimiser le rendement et garantir une meilleure valorisation du minerai.

Enfin, cette synthèse bibliographique a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du sujet étudié et constitue un support scientifique pour la suite de ce travail. Elle servira ainsi de référence pour l'approche expérimentale et l'analyse des résultats qui seront développées dans les chapitres suivants.

Références

M. Dumont, Annuaire des minéraux du Canada, 2007, pp 1, 8-9

(R.M. Cornell, U. Schwertmann, 1996 ; A.P. Zhukhlistov, 2001; E. Jansen, A. Kyek, W. Schafer, U. Schwertmann, 2002) ,

R. M. Cornell, U. Schwertmann. (2003). The iron oxides, structure, properties, reactions, occurrences and uses. John Wiley and Sons. 2nd Edition.

G.M.Houdaifa Hadjira, "Enrichissement et agglomération du minerai de fer pauvre de L'Ouenza", Université Larbi Tebessi – Tébessa, 2020

KARA Mourad , DJEFAFLA Sayah: Caractérisation et contrôle de la qualité d'aggloméré, Projet de fin d'étude (DEUA). UBMA, 78p. (2005).

KHENKHAR Mohamed Islam, Les procédés d'Enrichissement et mise en tas du minerai de fer de l'Ouenza, p26 (2018)

MOUSSACEB. K, « optimisation du système de gestion de l'homogénéisation du cru et du processus technologique de fabrication du ciment dans le système carrière usine de fabrication, application aux cimenteries Algériennes, laboratoire de technologie des matériaux et de génie de procédés », Thèse Doctorat, université de Bejaia, (2007).

J. BLONEAU Élaboration et recyclage des métaux (Minerais et Fondants -Minerais de fer) Techniques de l'Ingénieur, M 7 040/2005

P. Aravind, M.N.V. Prasad, Cadmium-induced toxicity reversal by zinc in *Ceratophyllum demersum* L. (a free floating aquatic macrophyte) together with exogenous supplements of amino-and organic acids, Chemosphere 61 (2005) 1720- 1733

Y. Tapia, E. Eymar, A. Garate, A. Masaguer, Effect of citric acid on metals mobility in pruning wastes and biosolids compost and metals uptake in *Atriplex halimus* and *Rosmarinus officinalis*, Environ. Monit. Assess. 185 (2013) 4221- 4229.

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

Mwepu wa Nzovu. Notes de cours de métallurgie générale destinées aux étudiants de deuxième graduat métallurgie, Faculté Polytechnique, UNIKOL, inédit, 2013-2014.

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

Brierley, J., A., Brierley, = present and future commercial applications of biohydrometallurgy=. Hydrometallurgy 59, pp 233-239, 2001.

Rodriguez, Y., Ballester, M.L., Blazquez, F., Gonzalez, J.A., Munoz, J.A., 2003. New information on the chalcopryrite bioleaching mechanism at low and high temperature. Hydrometallurgy 71, pp 47-56.

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

Kashala Mpanga. Notes de cours de métallurgie des métaux non ferreux destinées aux étudiants de troisième graduat métallurgie, Faculté Polytechnique inédit, UNIKOL, 2014-2015.

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

Website:

(1) <https://fr.geologyscience.com/mineraux-de-minerai/minerai-de-fer>

(2) <https://www.algerie-eco.com/2018/05/16/yousfi-la-production-de-fer-brut-dans-la-mine-del-ouenzatebessa-passera-a-5-millions-tonnes-dans-les-annees-a-venir/>

(3) <https://ressources-naturelles.canada.ca/mineraux-exploitation-mini%C3%A8re/donnees-statistiques-analyses-exploitation-mini%C3%A8re/faits-mineraux-m%C3%A9taux/faits-minerai-fer>

(4) http://ressources.unit.eu/cours/RMDI/RMDI6/co/grain1_1.html

(5) <https://www.universalis.fr/encyclopedie/lixiviation>

(6) Agence du Service Géologique de l'Algérie (ASGA) — Organisme officiel algérien fournissant des données sur l'historique et les ressources minières nationales.

CHAPITRE II

GEOLOGIE REGIONALE & METHODE D'EXPLOITATION

II.1. Introduction

Le gisement de El-Ouenza est à la fois le plus riche et le plus important gisement de fer en exploitation en Algérie, il fut découvert en 1878, son exploitation remonte en 1921. Proche de la frontière tunisienne, ce gisement est situé dans l'anticlinal dit Djebel El-Ouenza.

Différentes hypothèses ont été proposées par les géologues pour la formation des concentrations de sidérite qui se trouve oxydée dans la zone superficielle en formant des amas stratoïdes d'extension kilométrique, encaissés dans des calcaires récifaux de l'Aptien. Récemment les études disent que cette formation est liée à la mise en place de diapirs argilo-gypseux.

L'exploitation des réserves géologiques restantes, s'effectue à ciel ouvert, pour atteindre une production de 1,8 à 2 millions t/an avec un taux de découverte de 2,96.

II.2. Historique de la Région

Le gisement de fer de l'El-Ouenza se trouve à une dizaine de kilomètres de la frontière algéro-tunisienne, sur le prolongement du sillon Aurès-El Kef, à 70km au Nord de Tébessa et à 150 km au Sud-Est de Annaba. Il est relié à cette dernière par une voie ferrée électrique qui sert au transport du minerai de fer vers le complexe sidérurgique d'El Hadjar. Le Gisement de fer de l'El-Ouenza entre dans l'histoire vers la fin du 19ème Siècle avec l'exploitation du Cuivre au niveau des Quartiers Douamis et Hallatif, comme l'atteste les vestiges encore existants sous formes de puits et de galeries. En effet, c'est vers 1875 que l'ingénieur des mines « J. Tissot » signale l'importance des affleurements du minerai de fer. Le premier permis de recherche du fer du djebel El-Ouenza a été octroyé en 1878. Il s'en est suivi l'obtention par le prospecteur « F.R. Pascal » d'une concession minière en 1901. Ce n'est qu'aux environs de 1913 que la Société de l'El-Ouenza fut créée. L'exploitation de la mine a commencé au début des années vingt (1921).

Le début de la modernisation de la mine remonte à 1939 avec l'électrification de la voie ferrée. Après l'indépendance, la mine connaît une mutation très importante, plusieurs événements se succèdent :

- En 1966, la nationalisation des mines ;
- En 1967, début d'aménagement des installations ;
- En 1983, la restructuration de la SONAREM et la création de l'entreprise de recherche; Par contre, l'événement le plus important est celui du partenariat avec le Groupe LNG « ISPAT » en 2001, devenu « ArcelorMittal » en 2006. (AZIMI .S,2004)

II.2.2 Importance de la mine

Le gisement de fer de l'El-Ouenza constitue la principale source d'approvisionnement en minerai de fer de la sidérurgie nationale. Les trois quarts de la consommation du complexe sidérurgique d'El Hadjar, au temps du groupe SIDER, viennent de la mine de l'El-Ouenza, cela en faisant abstraction de la production de la mine de Boukhadra, qui vient en second lieu. Donc il tient un rôle très

important dans l'économie algérienne, de par sa contribution au développement de l'industrie lourde dans le pays et spécialement dans la Wilaya concernée.



Figure II.1 : Gisement de la mine d'El-Ouenza

II.3. Cadre géographique de Djebel El-Ouenza

La région de Djebel El-Ouenza est située au Nord-Est de l'Algérie. Il se trouve à 160 km au Sud de la ville d'Annaba, à 50 km au Nord de la ville de Tébessa et à 15 km de la frontière Algéro-Tunisienne, sur la route nationale n°82 qui relie Tébessa à Souk-Ahras. Le massif de Djebel El-Ouenza est situé dans la région des monts de Mellègue, qui fait partie du diapirisme triasique de l'Atlas Saharien oriental, formé dans son ensemble par une structure anticlinale orienté Sud-Ouest Nord-Est. Cette structure est formée par les sédiments du Mésozoïque du Tertiaire et du Quaternaire (figure I.1). Le gisement ferrifère de l'El-Ouenza repose sur le flanc nord d'un massif montagneux qui culmine à 1288 m au niveau du pic, il est d'environ de 12km de longueur et 5km de largeur. Les amas métallifères se présentent sous la forme de mamelons grossièrement elliptiques. Ils comprennent successivement du nord-est au sud-ouest : le Koudiat Douamis, Koudiat Hallatif, la région des conglomérats, le quartier Sainte-barbe, le gisement de Chagoura (Nord, Sud, Pic) et le Koudiate Zerga. Le minerai affleure sur des longueurs atteignant

parfois 250 mètres et des hauteurs de 45 mètres, réalisant les conditions types pour l'exploitation à ciel ouvert (Lazizi Malek., 2012)

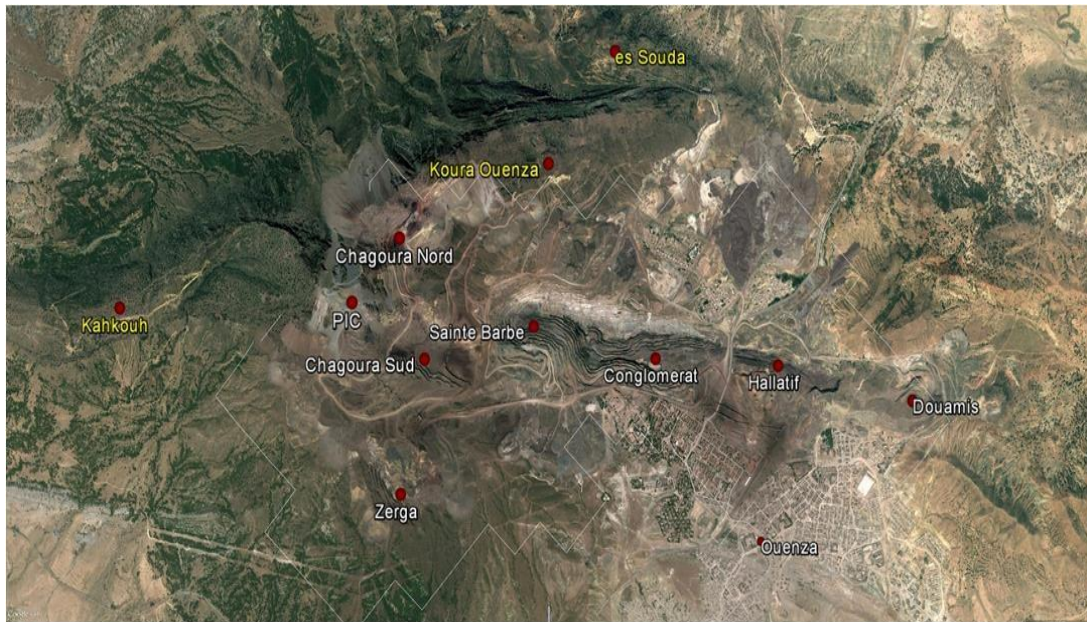


Figure II.2: Situation géographique de Gisements de fer de l'El-Ouenza. (Google Earth)

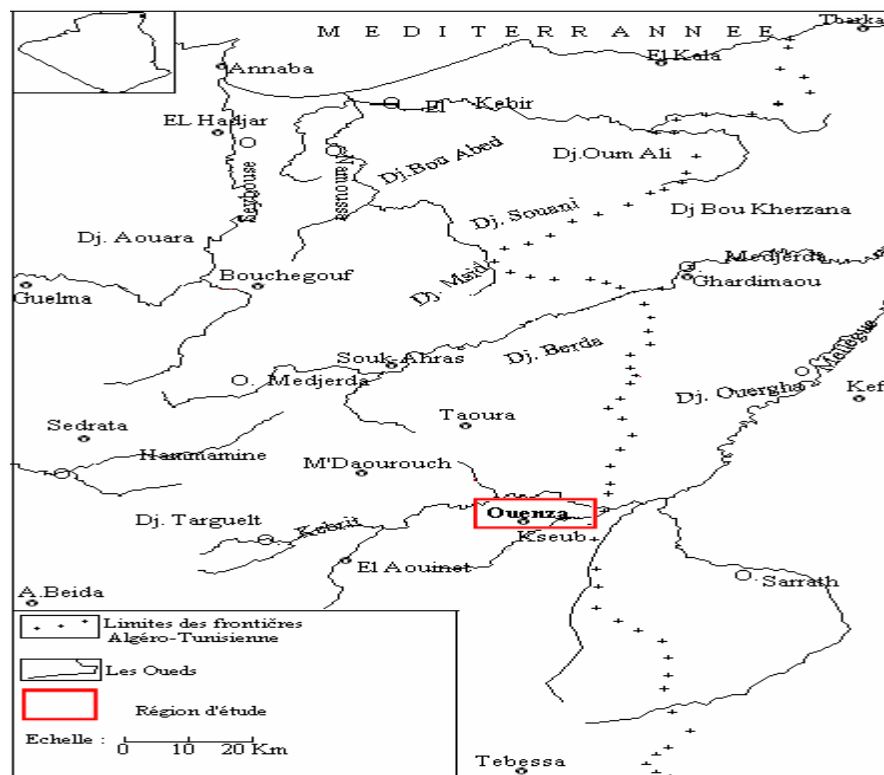


Fig. II.3 : Localisation de la région d'étude

II.4. Géologie Régionale

Le massif de l'El-Ouenza est compris entre le Tell et l'Atlas Saharien. Il appartient à la zone des hautes plaines, caractérisées par de gros massifs calcaires émergeant de 600 à 1200m. La géologie régionale du massif de l'El-Ouenza est présentée dans la figure.

Les Monts constitutifs de cette région, sont dits « Monts de Mellègue » (Dubourdieu G., 1956). Ce sont des anticlinaux ou des synclinaux perchés. Ils ne constituent pas de chaînons continus mais des reliefs isolés et souvent escarpés. Ils surgissent comme des îles au-dessus des régions basses faiblement ondulées ou rigoureusement uniformes. (Zerzour, O., Gadri, L., Hadji, R., Mabrouk, F., & Hamed, Y. 2020)

La région est caractérisée par des reliefs élevés. L'altitude maximale est observée au niveau du Djebel El-Ouenza qui culminait à 1288m avant l'exploitation. Elle avoisine actuellement les 1225m.

Le réseau hydrographique est assez dense, très développé, bien que peu abondant en eau. Les principaux cours d'eau sont Oued Mellègue qui limite la région au nord et Oued Kseub qui constitue la limite sud. Leurs débits en eau est très irréguliers et dépend beaucoup de la pluviométrie saisonnière.

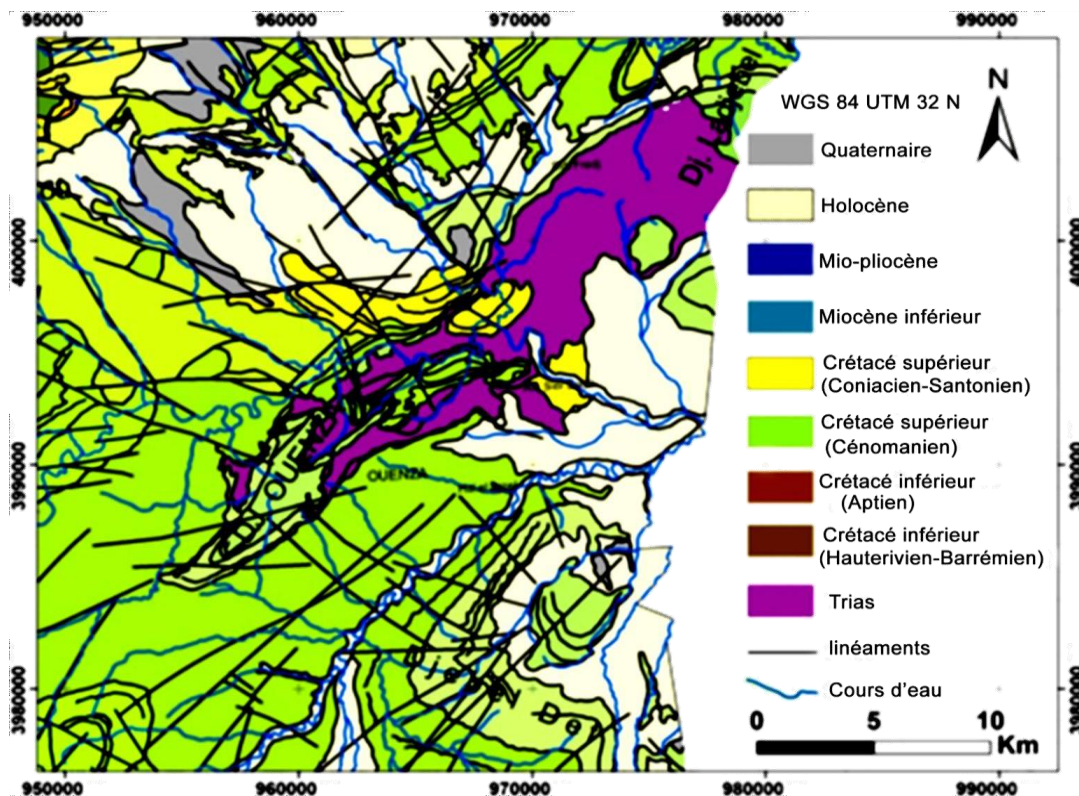


Figure II.4: Carte géologique simplifiée de la zone d'étude

II.4.1 Stratigraphie

- *Le Trias*

À l'El-Ouenza, la formation triasique est fortement déformée, elle comprend des masses chaotiques de marnes contenant du gypse multicolores, des dolomies, des calcaires, des grès et des fragments de roche (Sami. L., Kolli, O., & Boutaleb. A, 2017),

De nombreuses déformations tectoniques ne semblent en effet s'expliquer que par la mise en place des sédiments gypsifères par-dessous les terrains observables.

Le Trias des Monts Mellègue se rapporte uniquement à des diapirs qui n'ont pas partout atteint la surface du sol.

- *Le Barrémien*

Les seules formations rapportées au barrémien affleurent au NE de El-Ouenza (Djebel Harraba et son voisinage immédiat). Les mouvements d'effondrement ou les diapirs triasiques empêchent d'observer les sédiments antérieurs à l'Aptien.

Les sédiments barrémiens de la région de l'El-Ouenza sont donc essentiellement représentés par des marnes.

Aux environs de l'El-Ouenza, les sédiments rencontrés sont sans doute déposés sur un fond sous-marin assez proche de la surface.

- *L'Aptien*

D'une grande importance par la nature de ses dépôts, il occupe de vastes surfaces dans la région de l'El-Ouenza. C'est à ses énormes masses de calcaires récifaux que sont dus en effet les reliefs imposants et isolés qui constituent l'élément le plus caractéristique du paysage de la région.

La série aptienne de la région de l'El-Ouenza comporte de puissantes formations calcaires, qualifiées de récifales.

Les sédiments du sommet de l'Aptien sont parfaitement visibles à la terminaison périclinale SW du Djebel El-Ouenza où ils dessinent une auréole de petites collines autour des calcaires récifaux qui constituent l'ossature de la montagne.

La puissance totale de cette série aptienne, au-dessus des calcaires récifaux, est d'environ 150 m.

Une coupe en travers de la grande crête Nord de l'El-Ouenza, dans la partie centrale du Djebel, où la série est très redressée permet d'observer une succession aptienne presque complète.

La série est composée essentiellement de calcaires gris, compacts, parfois recristallisés, argileux à huîtres et Lamellibranches divers alternant avec des marnes peu apparentes.

- ***Le Clansayésien***

Les dépôts du Clansayésien montrent des séries lithologiques monotones, marnes grises par endroits gris verdâtre à quartz détritique, lesquelles sont intercalées avec des calcaires compactes à Orbitolines, ou bien des calcaires gréseux et des grès. La puissance du Clansayésien atteint 200 m au Djebel Boukhadra, 195 m au Djebel El-Ouenza.

- ***L'Albien***

Les dépôts de l'Albien sont variés et sont à dominante marneuse. L'Albien inférieur est représenté dans tous les affleurements de la région par une série de marnes argileuses jaunes.

L'Albien moyen est représenté par des calcaires noirs à Bélemnites. L'Albien supérieur est représenté par des marnes noires à petits lits de calcaires au niveau du Djebel Boukhadra et est très argileux au niveau du Djebel El-Ouenza.

- ***Le Cénomanién***

Les formations du Cénomanién sont représentées par d'épaisses séries de marnes verdâtres et des marnes intercalées avec de petites barres de calcaires, dans sa partie moyenne. Dans la partie supérieure, les formations deviennent carbonatées. Ces affleurements atteignent une épaisseur de 750 à 1100 m.

- ***Le Turonien***

Il affleure aux abords du Djebel El-Ouenza, à l'Ouest de Djebel Boujaber. Il est d'une épaisseur d'environ 270 m. Ce sont de puissantes formations de calcaire dur et compact, intercalées avec des marnes bleues. Comprend également des marno-calcaires gris et des calcaires noirs.

- ***Le Coniacien***

Il est déterminé par sa position entre les calcaires du Turonien, et de petites intercalations de calcaires argileux blancs d'âge Santonien. À l'Ouest de El-Ouenza, le Coniacien est constitué de marnes gris bleues de 280 m environ.

- ***Le Miocène***

Les formations du Miocène affleurent au Nord du Kef M'khiriga, au NW de Djebel Ouasta et de Djebel El-Ouenza, et à l'extrémité W du Koudiet el Hamra au voisinage du Djebel Boukhadra. Elles sont en contact avec le Trias, et sont représentées par des conglomérats de silex et des fragments de calcaires, de marnes, de grès ferrugineux à ciment carbonaté avec des intercalations marneuses renfermant du gypse. Elles ont une épaisseur d'environ 400 m.

- ***Le Plio-Quaternaire***

Les dépôts du Quaternaire sont représentés par des éboulis cimentés par une pâte calcaire riche en gravier aux fins éléments rocheux, de limons et cailloux dans les plaines. L'épaisseur est de 20 à 25 m et peut aller jusqu'à 200 m dans les fossés.

Les flancs du Djebel El-Ouenza et de la région déprimée du Djebel Boukhadra sont couverts

de conglomérats calcaires souvent très épais, formés d'anciens éboulis consolidés. Des alluvions anciennes et récentes s'observent par endroits dans le lit du Mellègue et du Kseub.

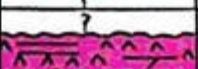
			Lithologie	Epaisseur (m)	Description lithologique
M E S O Z O I Q U E	C E N O Z O I Q U E	Quaternaire		⑥ 10-30	Dépôts clastiques d'origine continentale.
		Néogène		⑤ 10-150	Conglomérats à grains variés avec un ciment carbonaté, grès quartzeux et calcaire sableux avec intercalations d'argilites.
		Miocène			
	paléogène	Eocène		200	Calcaires marneux à silex et intercalations de phosphates par endroits dans le mur.
	C R E T A C E	I N F E R I E U R		250-300	Calcaires gris clairs, calcaires crayeux et marnes argileuses avec intercalation d'argiles dans la partie supérieure.
				500-600	Marnes argileuses gris-foncées et des calcaires blancs dans la partie moyenne et supérieure.
				500-600	Marnes argileuses grises et grises bleuâtres.
				④ 180-250	Calcaires en bancs, partiellement marneux à teinte noire et gris-foncée.
				900-1000	Marnes gris-verdâtres et grises dans la partie supérieure, avec intercalations de calcaires marneux.
				③ 500-600	Marnes et marnes-argileuses avec intercalations de calcaires argileux et argilites.
				② 480-600	Marnes grises et gris-foncées, noires dans la partie supérieure avec de minces intercalations de calcaires argileux.
				100-200	Marnes grises, gris-jaunes partiellement avec des intercalations de calcaires.
				300-600	1-Faciès clastique, marnes argileuses avec intercalations de marnes sableuses et grès calcaires. 2-Faciès carbonaté, calcaires organo-détritiques, bioclastes, ooclastes et interclastes.
				① < 250	Calcaires et dolomies, argilites et argiles dans la partie supérieure (Grès à Mesloulâ).
				?	?
		Jurassique		< 700	Formations marno-gypsifères bariolées avec peu d'intercalations de grès à grains fins, dolomies et calcaires marno-dolomitique.
		Trias		< 700	

Figure II.5: Coupe lithostratigraphique des monts du Mellègue [5]

II.5.Tectonique

Le Djebel d'El-Ouenza présente une structure en horst anticlinal d'axe Sud-Ouest-Nord Est interrompue au Nord par l'effondrement des BENI-BARBAR-OULED SOUKIES ; les irrégularités structurales du massif sont engendrées par l'effet de la rigidité des calcaires aptiens et leur opposition à l'accident de MRAH EL MAÏZ ou bien au phénomène du diapirisme. La structure est affectée par deux systèmes de failles, le premier système est représenté par des failles principales parallèles à l'axe de la structure. La faille I (faille du PIC) et la faille II qui passe entre CHAGOURA SUD et 6 MAI. Le deuxième système de failles est représenté par des failles secondaires perpendiculaires aux failles du premier système. Notons que ces failles jouent un rôle prépondérant dans la minéralisation ferrière de l'El-Ouenza.

II.6.Minéralisation:

Les minerais sont constitués essentiellement d'hématite qui résulte de l'oxydation des amas de sidérose et de pyrite (carbonates situés sous le niveau hydrostatique).Le carbonate provient lui-même de la métasomatose des calcaires récifaux de l'aptien par des venues minéralisantes sulfureuses. Les hydroxydes de fer sont le résultat de la désagrégation de l'hématite.

L'hématite exploitée se présente soit sous forme pulvérulente de couleur bleue ou noire rougeâtre, soit en masse terne sans cristaux apparents ou encore en masses homogènes mais laissant apparaître une trame rhomboédrique héritée du minerai carbonaté. Une série d'intermédiaire entre le minerai primaire et celui secondaire constitue une part importante dans les réserves de la mine. Outre, le minerai de fer, il faut signaler une faible présence de minéralisation poly métallique (Pb, Cu ...), le long de la faille du pic (Arcelor Mittal », 2007)

Notons enfin que les concentrations ferrières considérées comme les plus importantes en Algérie et le patrimoine minéralogique de la région de l'El-Ouenza est très riche et varié : Gypse (Saccharoïde et fer de lance), barytine (feuilletée et massive) Quartz (parfois d'une pureté exceptionnelle et offrant des cristaux d'une rare régularité), pyrite, Fluorine (en cristaux blancs ou violets) calcite et Aragonite sous diverses formes et particulièrement en stalactite et stalagmite), Azurite, malachite. La goethite forme des encroûtements à surface mamelonnée, La limonite (souvent associée à la goethite), la sidérite et l'ankérite qui montrent souvent un aspect bréchique.

Des minéralisations polymétalliques à Cu-Pb-Zn-Ba-F, d'ordre économique, sont signalées dans certains secteurs du massif (quartiers Hallatif et Douamis). Ces gîtes sont généralement encaissés dans les calcaires à caractère récifal de l'Aptien : "Calcaires à miliolites".

La liste sus citée ne pourrait pas être exhaustive et une étude microscopique généralisée sur tout le gisement en déceler d'autres. [8]

II.7.Aperçu géologique sur les quartiers de la mine de l'El-Ouenza

Selon la structure et la nature des roches, le gisement est divisé en sept (07) gîtes (quartiers) principaux sont :

II.7.1 Quartier Chagoura Nord

Les corps minéralisés les plus importants sont situés dans les calcaires récifaux de l'aptien et sont associés aux plis anticlinaux de deuxième ordre, orientés NE : Douamis, Chagoura Sud et Koura El-Ouenza - Chagoura Nord, en coupe transversale, la forme des plis est irrégulière.

D'après les coupes verticales et horizontales élaborées, le corps le plus important se présente sous forme d'un corps tubulaire de 650m de longueur, 150m de largeur et 300m de profondeur (aval pendage), avec des ramifications diverses de part et d'autre du corps.

La teneur moyenne en fer pour l'ensemble des corps minéralisés est pratiquement identique, soit en moyenne 48%. Quant à la teneur en silice, elle est pratiquement constante dans tous les corps, elle varie de 5 à 6% en moyenne.

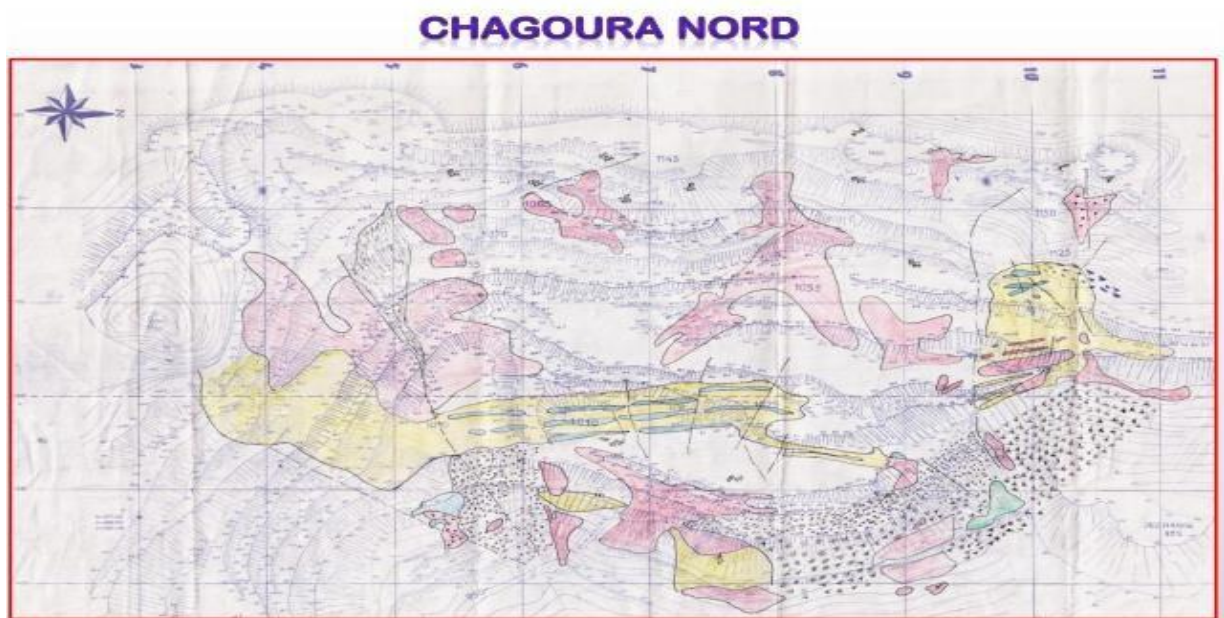


Figure II.7.:Carte géologique du Quartier Chagoura Nord. Rapport géologique 2019

II.7.2.Quartier Chagoura Sud-Pic

Les corps minéralisés sont localisés au sein des calcaires récifaux aptiens, en particulier au voisinage des grosses fractures (G. DUBOURDIEU) auxquelles est attribué le rôle de structure productive.

D'après les résultats de l'interprétation géologique des coupes verticales transversales et les observations de terrain, les corps sont disposés en général sous forme de lentilles irrégulières sub-concordantes à la stratification. Parfois, sur les coupes verticales et les plans

de niveaux élaborés, les corps miniers se présentent sous forme de nids ou corps tubulaires ramifiés et irréguliers.

L'interprétation des coupes verticales et les projections sur les plans ont permis de mettre en évidence six corps miniers moyennant une teneur en fer de 47.29% et 5.48% en SiO_2 .

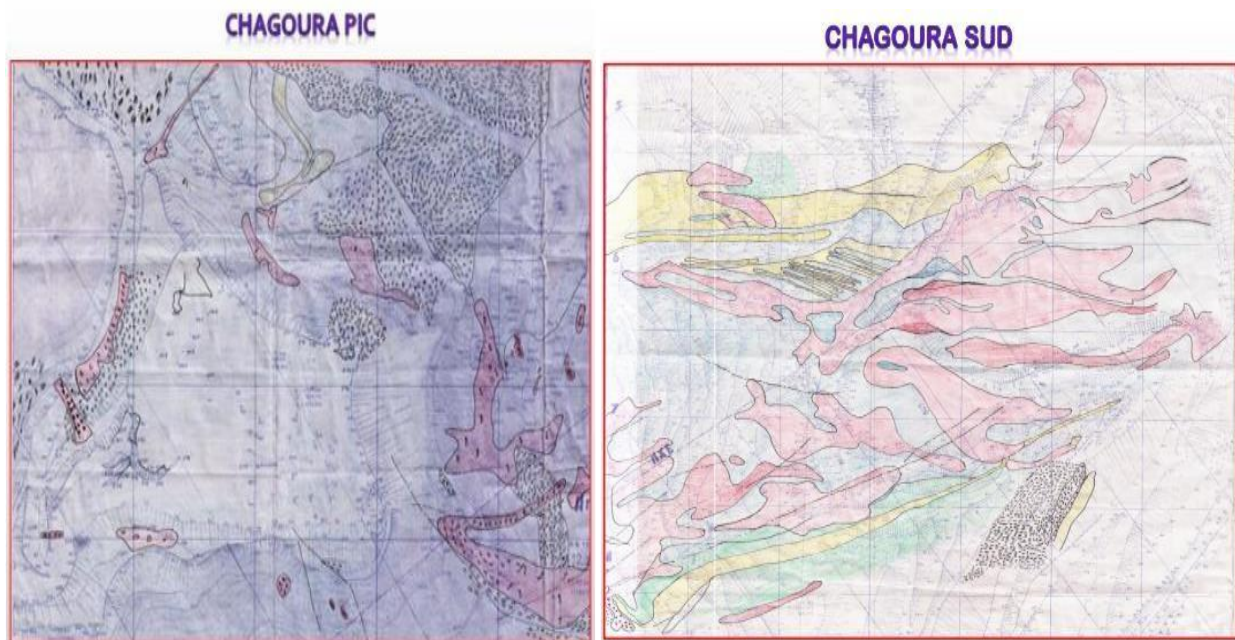


Figure II.8: Carte Géologique du quartiers Chagoura Pic-Sud (Rapport géologique, 2019)

II.7.3 Quartier 6 mai (îlot)

En se basant sur les résultats des expertises géologiques faites par le Bureau d'étude de la mine, concernant le quartier 6 Mai (Sainte Barbe et conglomérat), quatre (04) corps minéralisés ont été mis en évidence.

Le minerai caractérisant le gisement du 6 Mai est de type Hématite-Limonite.

Il est développé à partir de la surface jusqu'au niveau 552 m.

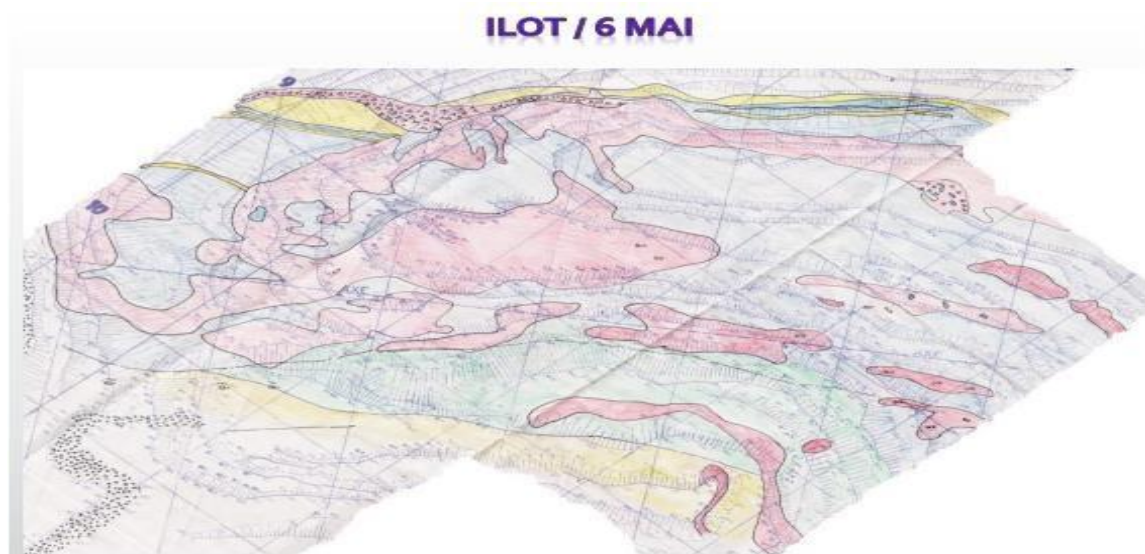


Figure II.9: Carte géologique du Quartier Sainte Barbe (Ilot) (Rapport géologique, 2019).

II.7.4.Quartiers Douamis et Hallatif

La minéralisation caractérisant les deux gisements est de type essentiellement hématitique, rarement limonitique. L'interprétation des données géologiques existante, a permis de mettre en évidence dans ces deux corps minéralisés localisés au sud et au nord de l'axe du gisement. L'allure générale des corps miniers de Douamis est très régulière et homogène.

La teneur moyenne en fer, contrairement aux autres quartiers est supérieure à 45% (riche).

Le gisement de Douamis se distingue des autres quartiers par la présence de minéraux de cuivre sulfureux (Chalcopyrite, Tétrahédrite...) et les carbonates de cuivre hydratés (Malachite et Azurite).

Pour ce qui est du quartier Hallatif, qui a une liaison directe avec les corps miniers de Douamis, plus de 80% des réserves sont déjà épuisées ce qui reste n'est que les dernières racines des corps principaux. La teneur moyenne en fer dans ce quartier « Hallatif » est quasi identique à celle de Douamis. Notons qu'au niveau de ce gisement existe de la baryte sous forme de filonnet.

II.7.5.Quartier Zerga

Toute la région est accidentée par un grand nombre de failles de faibles ampleurs et de différentes directions bien marquées par des plans de glissements bien dessinés sur les contacts des roches de types variés.

Pendant l'exploitation des affaissements ont été observés. L'affaissement le plus important s'est produit à la fin de 1978 dans la partie centrale du quartier, après quoi ce

quartier s'est vu presque hors exploitation pendant une longue période(Rapport géologique, 2019).

II.8.Nature de gisement

Le gisement fer de l'El-Ouenza est composé d'un minéral de type hématite actuellement en exploitation, mais il est à noter la présence d'un minéral de fer carbonaté la sidérite qui n'est pas encore mis en exploitation à ciel ouvert, par conséquent un avant-projet de sa mise en exploitation par la méthode souterraine a été établi.

II.8.1.Morphologie et structure de gisement

Le gisement de l'El-Ouenza se situe dans le Djebel El-Ouenza qui est un grand anticlinal de direction SW-NE. Si l'on s'éloigne de la partie périclinale SW qui se présente d'une manière spectaculaire pour aller vers le NE on verrait la masse énorme des calcaires récifaux de l'aptien qui forme l'ossature de la montagne.

Une grande faille longitudinale qui coupe le récif aptien dans une zone où il devait avoir tendance à s'amincir abaisse les terrains situés au SE du Djebel. Celle-ci se prolonge vers le NE en passant au pied du pic de l'El-Ouenza, et après avoir été éjecté par de petits accidents secondaires logent au Nord des parties minéralisées de la mine entre 06 Mai et Hallatif. Deux lames triasiques viennent s'injecter dans les marnes de l'albien au Nord et au Sud du Djebel. La lame Sud a fait remonter des lambeaux d'aptiens minéralisés (Quartier Zerga).

La présente structure du massif est due aux effets de la poussée diapirique du Trias.(DJAAFRI Hamza- ZERZOUR Oussama.)

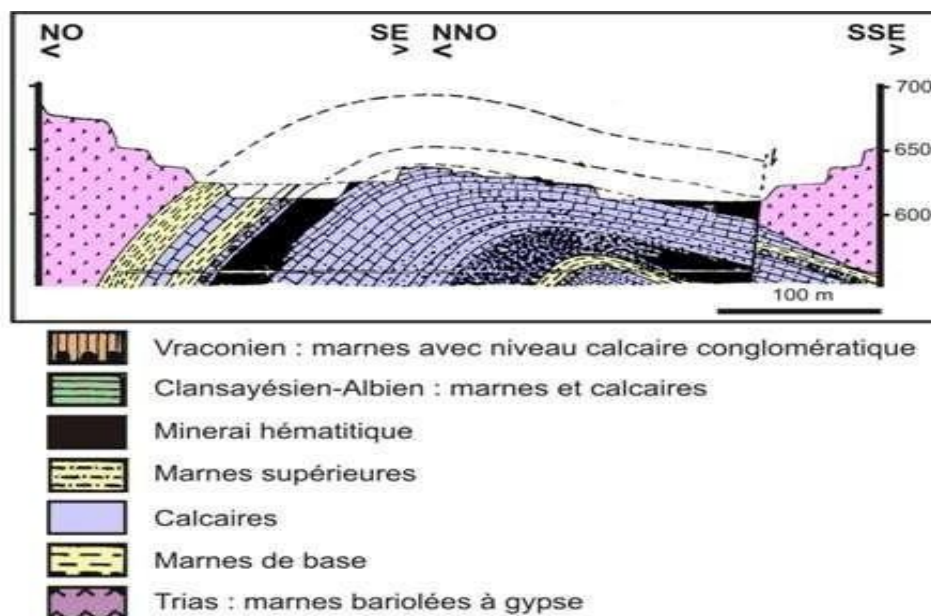


Figure II .11: Coupe dans la structure anticlinale du gisement de l'El-Ouenza (DJAAFRI Hamza- ZERZOUR Oussama.)

Une grande faille longitudinale qui coupe le récif aptien dans une zone où il devait avoir tendance à s'amincir abaisse les terrains situés au SE du Djebel. Celle-ci se prolonge vers le NE en passant au pied du pic de l'El-Ouenza, et après avoir été éjecté par de petits accidents secondaires logent au Nord des parties minéralisées de la mine entre 06 Mai et Hallatif. Deux lames triasiques viennent s'injecter dans les marnes de l'albien au Nord et au Sud du Djebel. La lame Sud a fait remonter des lambeaux d'aptiens minéralisés (Quartier Zerga).

La présente structure du massif est due aux effets de la poussée diapirique du Trias. Le diapir de l'El-Ouenza se compose de trois parties : une zone axiale où les formations triasiques sont enracinées et deux épaulements latéraux où elles sont extravasées. L'épanchement du trias a induit l'ébauche du double renversement des séries Albo-Aptiennes, tel qu'on peut l'observer aujourd'hui. Probablement avant le Vraconien. Le dispositif ainsi esquissé a été par la suite exagéré par les compressions néogènes. (Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. 1995).

Le gisement est divisé en sept (07) quartiers principaux dont Chagoura Sud-PIC, Chagoura Nord, Sainte-Barbe (Ilot), Conglomérats, Hallatif, Douamis et Zerga (figure.12).

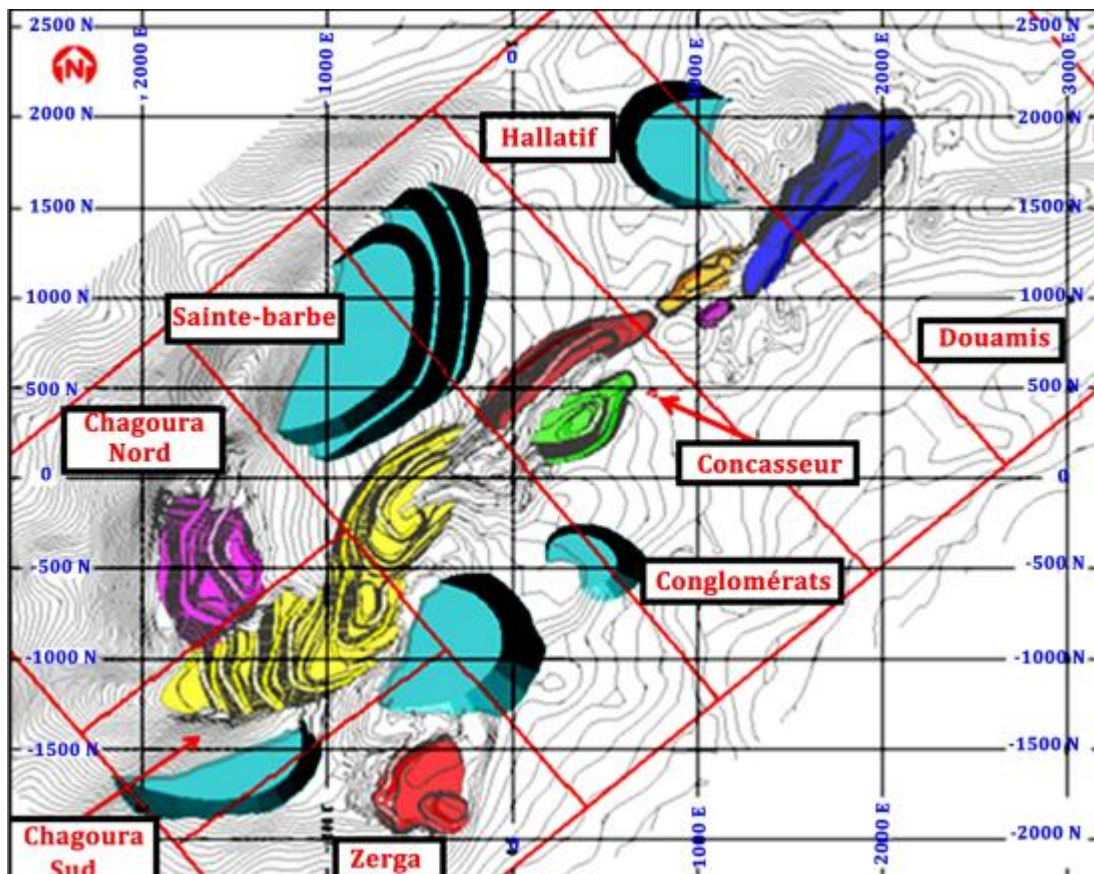


Figure II.12: Quartiers d'exploitation du gisement de l'El-Ouenza (Amec ,2011).

II.8.2.Caractéristiques chimiques et économiques du minerai

Les principales sources de minerai de fer pour la sidérurgie nationale sont les deux mines de l'El-Ouenza et Boukhadra, ces deux sources approvisionnent le complexe d'El Hadjar en minerai de fer avec une teneur de 45% en Fe.

Les différentes carrières de la mine de l'El-Ouenza fournissent en effet du minerai de composition hétérogène. En plus de cette disparité qualitative du minerai, ces différents gîtes se distinguent aussi par la qualité des réserves de minerai qu'ils renferment. Sur la base de la teneur en fer, ces réserves ont été regroupées en trois catégories (FERPHOS 1991) (Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. 2006):

- Minerai moyennement riche, dont la teneur en fer est supérieure à 45%.
- Minerai pauvre, dont la teneur en fer est comprise entre 40 et 45%.
- Minerai très pauvre, dont la teneur en fer est inférieure 40%.

L'oxydation du minerai primaire a en effet permis de passer d'une teneur moyenne de 40% dans le minerai sidéritique, à une teneur de 50% dans le minerai hématitique. En facilitant la percolation des eaux météoriques, la fracturation a dû jouer un rôle important dans cet enrichissement. Mais l'observation sur le terrain montre cependant quelques exceptions. En effet, à proximité des accidents majeurs (faille du pic, décrochement Chagoura-sainte barbe), les oxydés présents dans les calcaires Aptiens constituent souvent un minerai non marchand.

L'altération représente un phénomène indispensable pour l'exploitation des gisements de sidérite en série carbonatée, parce qu'elle détermine une coupure naturelle entre un minerai pauvre et un minerai riche, souvent seul exploitable. Cependant, l'altération n'est vraisemblablement pas seule responsable des disparités des teneurs en fer du minerai au sein du gisement. La composition minéralogique originelle joue également un rôle fondamental.

Le minerai carbonaté de l'El-Ouenza n'est pas homogène. Il est en effet constitué principalement par deux phases carbonatées : la sidérite et l'Ankérite dont les teneurs en fer moyennes sont respectivement de 42% et 19% (Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. 2006),.

Les proportions relatives des deux carbonates sont très variables. C'est cette inégalité dans la proportion des deux phases minérales, qui s'est traduite dans le minerai oxydé (Bouzenoune, A. 1993).

Le minerai oxydé pauvre en fer résulterait alors de l'oxydation d'un minerai carbonaté à forte teneur en ankérite, tandis que le minerai riche serait issu de l'oxydation d'un minerai à forte teneur en sidérite.

La composition chimique du minerai de fer de la mine de l'El-Ouenza est donnée dans le tableau suivant (Bouzenoune, A. 1993).:

Tableau II.1 : Composition chimique moyenne du minerai de fer de l'El-Ouenza

Elément	Fe	SiO ₂	CaO	Mgo	Al ₂ O ₃	BaSO ₄	S	Mn	Cu	P
Teneur %	49,8	4	7,10	2	2,25	trace	0,04	1,98	trace	0,02

II.9.Méthode d'exploitation du gisement de fer de l'El-Ouenza

La méthode d'exploitation est une succession de réalisation des travaux de creusement, de découverte et d'extraction du minerai dans un ordre bien déterminé. Le système d'exploitation se caractérise par le développement dans l'espace et dans le temps des travaux préparatoires, de découverte, et d'extraction du minerai.

Le choix de la méthode d'exploitation dépend des facteurs suivants :

- Caractéristiques géologiques du gisement.
- Nombre et puissance des engins qui prennent part à la chaîne technologique d'exploitation.
- Mode d'ouverture du gisement.
- L'allure des gisements et les propriétés physico-mécaniques du minerai et des roches à évacuer.
- Le relief de la surface, la puissance et l'angle de pendage des gîtes.

D'après les caractéristiques géologiques du gisement de la mine de l'El-Ouenza , la méthode d'exploitation est à ciel ouvert allant de haut vers le bas avec une exploitation combinée d'une manière à exploiter les filons et des amas de minerais, en découvrant le stérile. (Rapport géologique, 2019).

On générale dans cette mine l'exploitation comprend plusieurs étapes

- 1) La foration avec des sondeuses la hauteur des gradins 15m.
- 2) Chargement des trous forés avec l'explosif.
- 3) Tir des mines.
- 4) Le rechargement des masses abattues par des pelles et des chargeuses.
- 5) Alimentation par camion jusqu'à la station de concassage.
- 6) Criblage et concassage.
- 7) Reprise sous concasseur et amené au parc de stockage par le convoyeur à bonde.
- 8) Expédition vers Annaba les wagons de 60 Tonnes par SNTF.

II.9.1.Accès d'ouverture du gisement

La plate d'accès de gisement est tracée au du niveau 955 sur une longueur de 1400 m, avec une pente maximale de la pista reste praticable durant toute la durée d'exploitation de la carrière, donc il est raisonnable de l'entretenir afin d'assurer la bonne circulation des engins de la carrière.

A. La découverte

Le gisement est formé de calcaire massif à panneaux verticaux, il ne nécessite pas des travaux de découverte spécifiques.

B. Mise à terril

Les paramètres géologique aussi que le relief, nous permettant de réaliser la mise à terril que dans la partie sud du périmètre.

C. L'ouverture du gisement

L'ouverture du gisement est un ensemble de processus réalisés, dans le but de réaliser l'accès au champ de la carrière et d'assurer des communications de transport aux flux formés sur les gradins

Le mode d'ouverture du champ de la carrière est choisi en fonction des facteurs suivants :

- relief de la surface du sol.
- caractéristiques géologiques et hydraulique du gîte.
- méthode d'exploitation de gisement.
- rendement de la carrière.

L'ouvrage minier à ciel ouvert utilise des gradins qui sont dits "tranchés d'accès " l'ouverture est réalisée par des demis-tranchés.

Pour les gisements à relief montagneux tel que le gisement de l'El-Ouenza, le mode d'exploitation appliqué est par fonçage avec un seul bord exploitable, le contour de la mine n'étant pas fermé. L'exploitation de tels gisements, disposés sur un flanc de coteau de pente 35°, se fait de haut en bas. L'extraction du minerai est réalisée par gradin de 13 à 15 m de hauteur, un angle du talus de 75 à 80° et une largeur des bermes de 7 à 12 m avec un taux de découverte de 2,96. Selon le projet d'exploitation, la fosse finale aura une profondeur de 620 m, l'angle du bord inexploitable de la mine est de 32°.(BAIZID Mohamed - MESSAOUD Bilal,2017)

II.9.2.Travaux de forage et de tir

A.Abattage

Le choix de la méthode d'abattage des roches dépend:

- type de roches, et leur état naturel;
- les propriétés physico – mécaniques et technologiques des roches;
- de la productivité de l'entreprise minière;
- des paramètres techniques des engins et des équipements miniers disponibles et des exigences fixées à la qualité du minerai extrait.

B .L'Abattage à l'explosif

L'abattage des roches par explosion est très répandu dans les mines à ciel ouvert et c'est une méthode principale pour la préparation des roches dures.

L'abattage à l'explosif est pratiqué dans les milieux rocheux qui ont une densité supérieure à 2,5 et une résistance à la compression de plusieurs centaines de Kgf/m².

C.Travaux de Forage

Le forage c'est le processus de foration des trous d'une profondeur déterminée pour l'abattage du minerai renfermé dans le gradin. Ces travaux sont effectués par des sondeuses appropriées. Ces trous seront chargés d'explosif.

C.1.Sondage (Forage)

Le forage est une opération principale, effectué dans le but d'étudier et délimité les corps minéralisé en profondeur.

Ces sondages sont placés selon une maille sur des profiles perpendiculaire à la direction des corps minéralisé, sont de nature destructif réalisé à l'aide d'une sondeuse à circulation inverse (RC). (BAIZID Mohamed - MESSAOUD Bilal,2017).



Figure II.13: La sondeuse INGERSOLL-R(T4BH900HR4) en travail de mine de l'El-Ouenza. (BAIZID Mohamed - MESSAOUD Bilal, 2017)

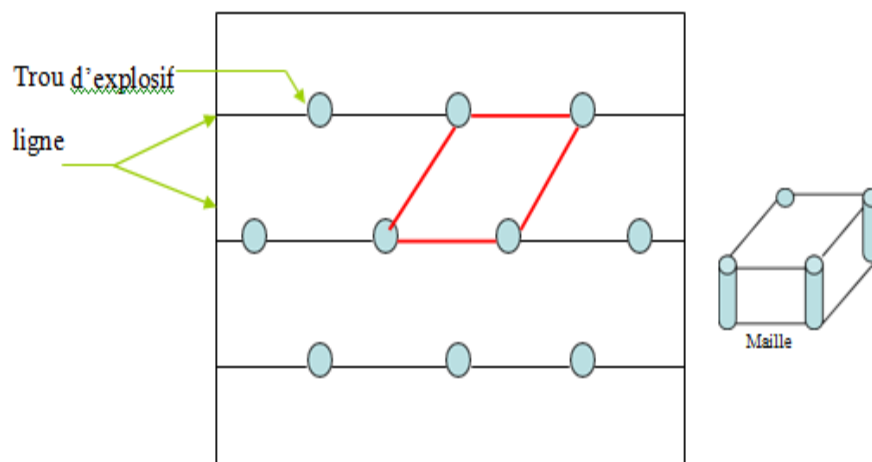
C.2. Le tir:

1. définition du tir: c'est faire fragmenter les roches (mineral + stérile) constitues un terrain à l'aide des explosifs, c'est une étape principale pour l'exploitation.

2. définition des explosifs: c'est une substance qui réagit ou se décompose sous l'action d'une simple flamme ou un choc violent, accompagné d'une grande énergie dégagé sous forme d'une grande quantité de gazes à très haut température

3. Les démarches à suivre pour réaliser le tir

► Le de la maille du tir



► Remplir les trous de forassions par les explosifs;

-

Introduire le premier sachet de Marmanite (Type I) dans le trou à l'aide d'un cordeau

- Introduire un deuxième sachet de Marmanite (Type II) par une chute libre.
- Remplir le vide entre les explosifs et la roche hôte par l'Anfomil.
- Fermer le trou et faire le bourrage à l'aide du gravier.

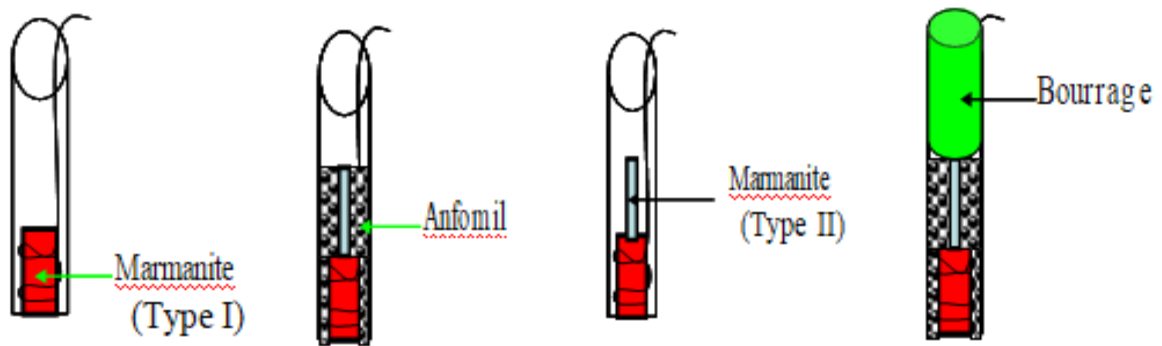


Figure II.14: Schéma des trous de la mine de l'El-Ouenza

Relier tous les trous d'explosifs à l'aide d'un cordeau, ainsi que les lignes par le même fil de tire.

La quantité d'explosif est déterminée par rapport à la dureté de la roche. L'éboulement ne doit pas dépasser le talus.

La tire est effectuée par des opérateurs qualifiés dans ce genre d'opération



Figure II.15: Le tir de la mine de l'El-Ouenza

II.9.3 Travaux de chargement et de transport

A. Travaux de chargement

Le choix des moyens de chargement dépend des facteurs suivants :

- Nature de matériaux
- Productivité planifiée
- Mode d'exploitation
- Hauteur du gradin (Rapport géologique, 2019).

Dans les conditions de la mine de l'El-Ouenza, les travaux de chargement s'effectuent à l'aide de deux types de chargeuses : Chargeuse sur pneu et pelles mécaniques (rétro) qui font deux opérations à la fois, l'extraction et le chargement de la masse abattue.



Figure II.16: Camion CATERPILLAR type775F

B. Travaux de transport

Le but principal du transport dans la carrière est le déplacement de la masse minière des chantiers au point de déchargement qui sont les terrils pour les roches stériles et les stocks ou les trémies de réception des usines de traitement pour les minéraux utiles.

Le transport des roches abattues dans carrière de l'El-Ouenza s'effectue par des camions (dumper) (CATERPILLAR) de 40 et 50 tonnes

Le transport des roches abattues dans carrière de l'El-Ouenza s'effectue par la combinaison suivante : Camions→Convoyeur→Train.(2)



Figure II .17: la chargeuse CATERPILLAR TYPE988 H

II.10.Traitement mécanique

Le minerai extrait du massif a une granulométrie qui ne répond pas aux exigences de transport par convoyeur ou par train, c'est pour cette raison que n'importe quelle type de minerai subi un traitement soit mécanique, chimique,...etc. Le traitement mécanique consiste à la réduction des dimensions du bloc afin d'obtenir une granulométrie favorable au transport.

On constate dans la plus part des mines ou des carrières, la présence d'une usine de traitement (enrichissement), au moins une station de concassage, broyage, ... etc. Dans la carrière de l'El-Ouenza la première station de concassage est située au niveau (803m). Elle est alimentée par des camions venant des quartiers, le déchargement se fait dans une trémie de réception de capacité de 450 tonnes. La deuxième station se située au niveau (660m) près de la gare d'expédition. (BAIZID Mohamed - MESSAOUD Bilal,2017)

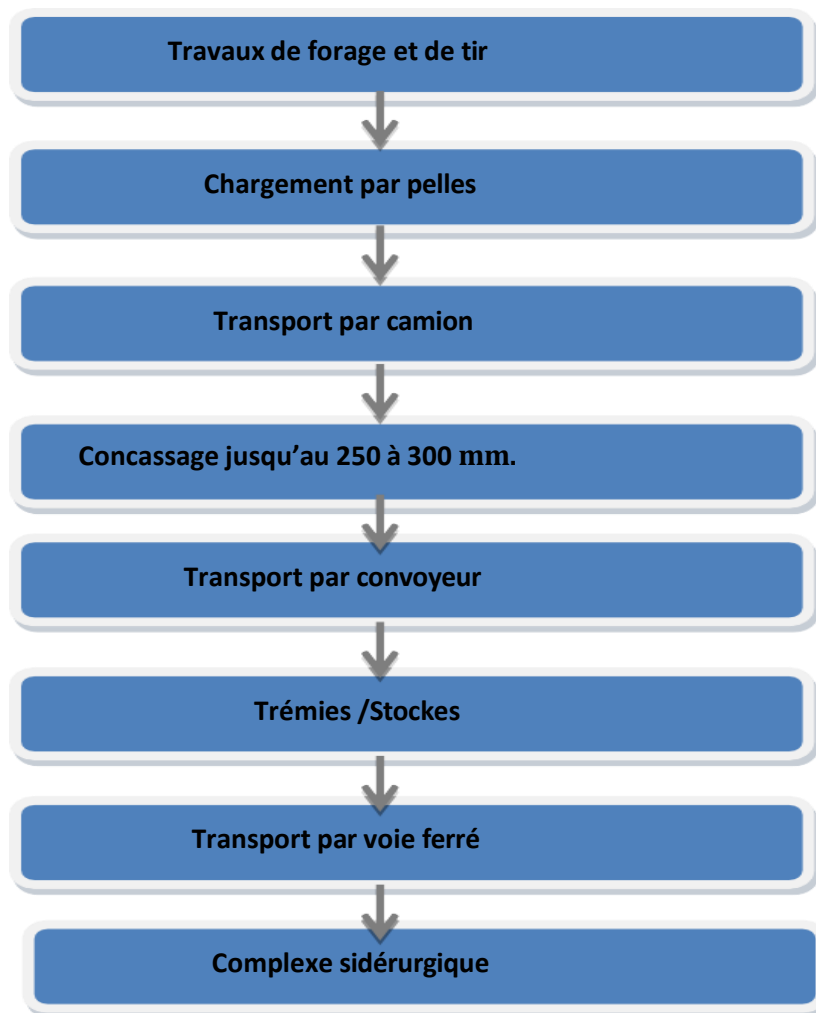


Figure II.18: Schéma technologique d'extraction et de préparation du minerai de fer de l'El-Ouenza.(BAIZID Mohamed - MESSAOUD Bilal,2017)

II.11.Préparation mécanique du minerai de fer de l'El-Ouenza

L'échantillonnage constitue une étape cruciale dans le processus de caractérisation d'une matière naturelle qui peut être en différents aspects dans la nature, dont les minerais représentent les sources les plus utilisées dans l'industrie, ce qui nécessite de disposer d'une information la plus fiable possible sur le minerai a étudié.

Le but de l'échantillonnage est de permettre l'estimation la plus fiable de la valeur inconnue et inaccessible d'une propriété d'un lot à partir d'un essai effectué sur un échantillon représentatif.

Après qu'ils ont subis un premier concassage par un concasseur à mâchoire de type laboratoire, jusqu'à moins de 30 mm, une première homogénéisation paraît nécessaire par effet de l'hétérogénéité de minerai altéré présenté à la surface , les échantillons subissent

un deuxième concassage jusqu'à moins de 10 mm suivi d'une homogénéisation avant leur broyage par un broyeur à boulets de type laboratoire. (voir schéma de préparation des échantillons ci-dessous).

Le produit issu du broyage est d'une granulométrie de ($< 3\text{mm}$) suit une série d'opérations d'homogénéisation et de quartage effectuée soigneusement pour éviter toute sorte d'erreurs systématiques qui peuvent fausser les résultats, et afin d'avoir un échantillon plus représentatif qu'il sera l'objet d'une analyse granulo-chimique et autres tests de séparation minéralurgiques.

II.12. Les réserves géologiques et exploitables du gisement d'El Ouenza

Les données du tableau ci-dessous (Tableau I.1) présentent les réserves géologiques et exploitables du gisement de l'Ouenza, actualisées au 30/06/2022.

Tableau II.2: Réserves géologiques et exploitables du gisement d'El Ouenza

Quartier	Réserves géologiques (t)	Fe (%) Géo	Réserves exploitables (t)	Fe (%) Expl.	Taux d'exploitation (%)
Chagoura Sud-Pic	19 119 351	50	9 738 188	50,85	50,93 %
Chagoura Nord	20 025 562	48,9	947 306	49,7	4,73 %
Sainte Barbe	12 813 168	47,8	4 602 653	48,4	35,92 %
Conglomérat	6 011 290	47,4	376 686	46,6	6,27 %
Hallatif	4 931 028	51	—	—	0 %
Douamis	11 327 458	53	8 425 289	53,9	74,38 %
Zerga	3 196 457	42,7	2 350 266	42,7	73,56 %
TOTAL	77 424 314	49,3	34 967 388	50,5	45,16 %

II.12.1. Réserve de minerai pauvre à l'Ouenza

Le gisement de fer de l'Ouenza constitue l'un des principaux gisements ferrifères d'Algérie, mais son intérêt ne réside pas uniquement dans les réserves à haute teneur. Il comprend également une quantité importante de minerai pauvre, c'est-à-dire un minerai dont la teneur en fer est insuffisante pour une utilisation directe en sidérurgie et qui nécessite donc un traitement préalable d'enrichissement. Cette fraction pauvre représente néanmoins une ressource stratégique, car elle permet d'augmenter le potentiel global d'exploitation du gisement si elle est correctement valorisée. (Chaouche, H. M. 2025)

Conclusion

Etant donné l'objectif de ce mémoire, nous nous sommes focalisés dans ce chapitre sur la présentation générale de la zone d'étude. La mine d'El-Ouenza caractérisée par des importantes réserves de minerai de fer, cette dernière contribue fortement dans l'industrie lourde en Algérie. Ce gisement est constitué essentiellement d'hématite et des carbonates et des hydroxydes de fer.

L'exploitation de la matière première est en mode à ciel ouvert engendre des rejets, se fait par plusieurs équipement de travaux d'abattage, chargement et de transport, qui peuvent atteindre plus de 60% et qui sont entreposé en décharge et aucune méthode de valorisation n'est proposée par l'entreprise.

Références

AZIMI .S, « flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Île-de-France ».Thèse de Doctorat de L'école Nationale des Ponts et Chaussées; France; (2004)

Lazizi Malek., (2012)., La Mine de l'Ouenza Histoire et Avenir., Division Etude et développement Service Géologie., ArcelorMittal Tébessa Mine de l'Ouenza.

Dubourdieu G. (1956) Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins Algéro-Tunisien).Bull Publ Serv Carte Géol Algérie 10(1):1–659

Zerzour, O., Gadri, L., Hadji, R., Mabrouk, F., & Hamed, Y. (2020). Semi- Vario grams and kriging techniques in iron ore reserve categorization: application at Jebel Wenza deposit. Arabian Journal of Geosciences, 13(16), 1-10.

Sami. L., Kolli, O., & Boutaleb. A, (2017), Fluids inclusions study of the Ba-F, Pb- Zn the Prospect at Ouenza (Mellegue monts, North eastern Algeria), 7th AAMRC Myanmar

Division Etude et Développement (DED), (2014). Rapport géologique de la mine de l'Ouenza.

Rapport géologique 2019, plan de développement 2014-2023 DED (Département Etude et Développement) mines de l'Ouenza.

Mines de l'Ouenza et de Boukhadra, « Document Arcelor Mittal », 2007.

Mémoire de fin d'étude 2015/2016 (Contribution à l'analyse du mode d'abattage dans les roches fissurées dans les conditions de la mine de l'Ouenza). DJAAFRI Hamza- ZERZOUR Oussama.

Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. (1995). Trias de l'Ouenza : contexte diapirique, zonation minéralogique et conséquences métallogéniques. Bull. Serv. Géol. Algérie, 6(1), 3-24.

Amec (2011). Estimation de ressources et planification minière ; Ouenza et Boukhadra

Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. (2006), Chronologie relative et conditions de mise en place des minéralisations du massif de l'Ouenza. Bulletin du service géologique de l'Algérie, 17(1), 3-27.

Bouzenoune, A. (1993). Minéralisations périidiapiriques de l'Aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale), Thèse de Doctorat. (Métallogénie). Université Pierre et Marie curie (Paris VI), France.

Bouzenoune, A., & Lécolle, P. (1997). Petrographic and geochemical arguments for hydrothermal formation of the Ouenza siderite deposit (NE Algeria). Mineralium Deposita, 32(2), 189-196.

Mémoire de fin d'étude 2016/2017 (Application d'un schéma technologique de traitement du minerai de fer de l'Ouenza). BAIZID Mohamed - MESSAOUD Bilal.

Chaouche, H. M. (2025). Contribution à l'amélioration de la qualité du minerai de fer, cas de la mine d'El Ouenza-Tébessa-Algérie. Thèse/Mémoire, École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie, Annaba.

CHAPITRE III

MATERIELS & METHODES EXPERIMENTALES

Introduction

Ce chapitre démontre en détail les méthodologies analytiques utilisées pour étudier les échantillons du gisement de fer d'El-Ouenza. Cette étude poursuivait deux objectifs principaux : premièrement, la caractérisation du minerai de fer d'El-Ouenza par la définition et l'identification de la granulométrie, l'évaluation de l'état de libération des minéraux selon le procédé normalisé, la composition chimique et minéralogique, et la quantification de leurs phases minérales. Deuxièmement, l'application de la lixiviation chimique qui permet de séparer et de valoriser le minerai de fer d'El-Ouenza afin d'obtenir un fer riche. L'influence des paramètres opératoires de la lixiviation sur l'enrichissement du minerai de fer d'El-Ouenza a été étudiée.

Les outils spécifiques utilisés pour cette étude sont décrits dans ce chapitre.

III.1 Échantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever des échantillons représentatifs de la surface totale de la zone étudiée, en veillant à leur bonne conservation afin d'éviter toute contamination (Matías Miguel Salvarredy Aranguren, 2008).

Le respect d'un protocole d'échantillonnage rigoureux vise à obtenir des échantillons représentatifs de l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques du site d'étude (J. L. Pineau, 1996). Les principales étapes d'un échantillonnage sont l'élaboration d'une stratégie de prélèvement, le prélèvement des échantillons sur site, leur conservation et leur préparation aux différentes analyses et méthodes de traitement. La qualité des résultats dépend de la bonne exécution de chaque étape. La stratégie de prélèvement est basée sur le volume et le nombre d'échantillons, ainsi que sur le choix des points de prélèvement (nombre et position). La représentativité des échantillons dépend largement des choix effectués (A. Gosselin et al., 1999). Les échantillons analysés dans cette étude proviennent de la zone de Chagoura, située au sein du gisement de minerai de fer d'El-Ouenza, dans le nord-est de l'Algérie. Le secteur de Chagoura représente un stock local de minerai de plus de 3 millions de tonnes, caractérisé par des teneurs en fer faibles à moyennes. Il a été choisi en raison de son potentiel sous-exploité et de l'intérêt croissant porté à la valorisation des minerais de fer à faible teneur pour un usage industriel.

Le contexte géologique de la zone d'échantillonnage correspond aux unités protérozoïques du gisement d'Ouenza, où la minéralisation en fer se présente principalement sous forme d'hématite, fréquemment associée à du quartz, de la goethite et à de faibles quantités de minéraux argileux.

Des échantillons de minerai représentatifs ont été prélevés en divers points accessibles du stock de Chagoura de la mine d'El-Ouenza. Le prélèvement a été effectué manuellement, en collaboration avec les ingénieurs du site, afin de couvrir l'ensemble des zones géologiquement distinctes. Ces échantillons, destinés à représenter la variabilité locale de la minéralisation en fer, ont ensuite été transférés au laboratoire d'El-Ouenza pour préparation et analyses.

III.2 Préparation du minerai de fer

La préparation des échantillons a suivi les procédures de laboratoire normalisées (NF EN 933-1) visant le broyage (réduction de la taille des particules et amélioration de la libération des minéraux) et l'application d'une séparation magnétique. Chaque échantillon pesait 30 g pour chaque essai.

Les principales étapes sont présentées dans le schéma de procédé suivant (figure III.1) :

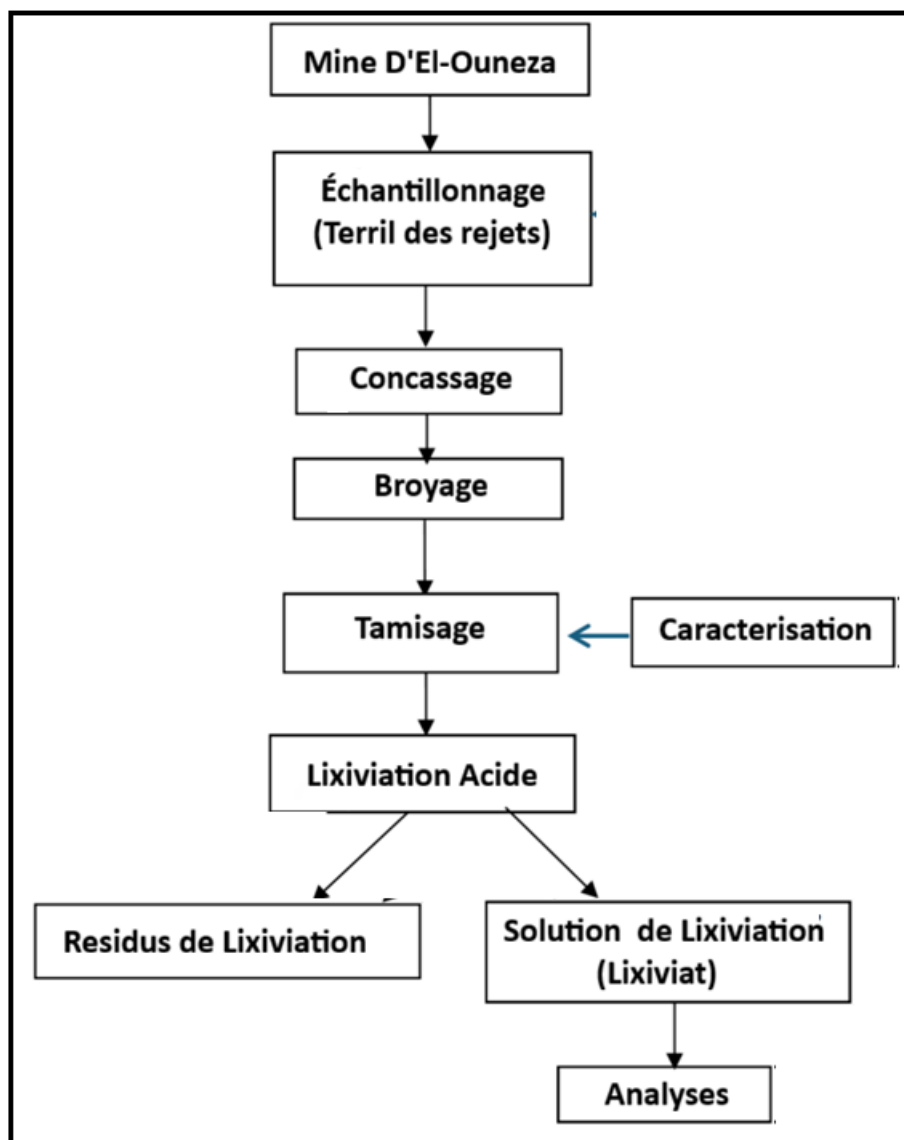


Figure III.1 : Schéma de traitement proposé pour le minerai de fer d'El-Ouenza

III.2.1 Concassage

La première étape du procédé de préparation du minéral consistait en un concassage à sec, réduisant le minéral à une granulométrie d'environ 4 mm. Cette réduction initiale est essentielle pour la manutention et les traitements ultérieurs. Le concassage ne produit généralement ni résidus ni pertes de matière (Office européen du PRIP, 2004). Pour réduire la taille du minéral de fer de l'échantillon sélectionné provenant de la mine d'El-Ouenza, un concasseur Retsch de laboratoire a été utilisé, réglé entre 20 et 1 mm (figure III.2).



Figure III.2 : Concasseur de laboratoire (El-Ouenza)

III.2.2 Broyage

Le matériau broyé (minéral de fer) a été soumis à une seconde étape de broyage. Un broyeur de laboratoire a été utilisé pour obtenir une granulométrie inférieure à 1 mm. Ce seuil de granulométrie a été choisi afin de favoriser la libération des minéraux, essentielle pour des analyses chimiques et minéralogiques précises ainsi que pour les procédés de séparation ultérieurs. Le broyeur utilisé est un Retsch RS100 (figure III.3).



Figure III.3 : Broyeur à disque du laboratoire de la mine d'El-Ouenza (type RS-100).

Après prélèvement, les échantillons bruts ont subi un concassage primaire suivi d'un broyage à l'aide d'un broyeur de laboratoire afin d'obtenir une granulométrie inférieure à 1 mm. Ce seuil granulométrique a été choisi pour permettre une libération optimale des minéraux de fer avant les étapes de caractérisation et de concentration. Le matériau broyé a ensuite été homogénéisé et subdivisé en portions pour analyse ultérieure.

III.2.3 Quartage

Afin de garantir la représentativité des échantillons, le matériau broyé a été découpé en quatre (également appelé cône et quartage). Cette étape consistait à homogénéiser l'échantillon et à réduire systématiquement son volume en le divisant en quatre parties égales, en éliminant deux quarts diagonalement opposés et en recombinaut les deux restants. Le processus a été répété autant de fois que nécessaire pour obtenir des sous-échantillons à l'échelle du laboratoire tout en préservant la composition minéralogique originale.

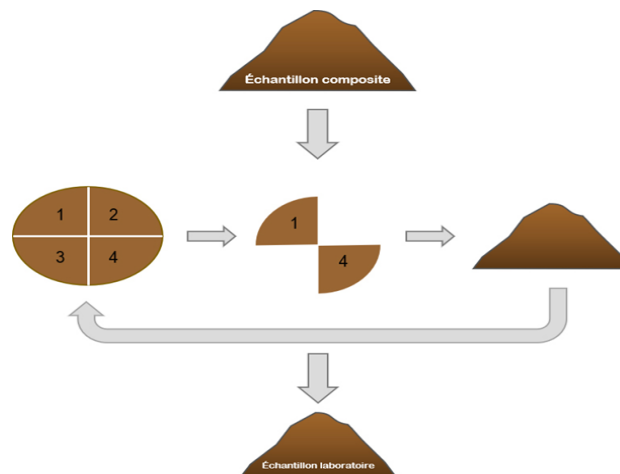


Figure III.4 : Méthode d'échantillonnage par quartage



Figure III.5 : Illustration de la méthode d'échantillonnage de quartage (1)

III.3 Méthodes analytiques

III.3.1. Granulométrie

Une analyse granulométrique a été réalisée afin d'évaluer la distribution granulométrique des particules de l'échantillon de minerai et d'identifier les différentes classes de taille au sein du matériau. Cette analyse est fondamentale pour comprendre la texture et la structure du minerai et fournit des données essentielles à l'interprétation de la libération minérale et de la distribution des espèces minérales selon les fractions granulométriques. Une analyse chimique peut ensuite être appliquée à chaque fraction pour évaluer les concentrations minérales spécifiques.

La granulométrie a été déterminée sur un échantillon sec de 3070 g de minerai de fer à l'aide d'un tamiseur à sec Control (Figure III.6) équipé de tamis de 200 mm × 50 µm. Cette analyse a été effectuée au laboratoire de l'Institut des Mines de l'Université Larbi Tebessi.

Le tamisage a été réalisé pendant 30 min à une amplitude de 60, conformément à la norme européenne NF EN 933-1 (voir les annexes). Cette norme définit la méthode de détermination de la granulométrie des agrégats par tamisage à sec ou par voie humide à travers une série de tamis d'essai de tailles d'ouverture définies.

La série de tamis comprenait des ouvertures de maille de : (2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm).



Figure III.6 : Les échantillons et la pile de tamis de laboratoire

Après tamisage, les fractions retenues sur chaque tamis ont été pesées à l'aide d'une balance de précision (précision : 0,01 g). Le poids relatif de chaque fraction a été calculé afin de déterminer la distribution granulométrique.

Cette analyse a révélé que la majorité de la masse de l'échantillon se situait entre 0,125 et 0,5 mm, ce qui suggère une texture fine et un bon potentiel de libération des minéraux ferrifères. Les données obtenues confirment également la pertinence de procéder à la séparation magnétique des fractions fines, notamment celles inférieures à 1 mm.

III.3.2 Analyse chimique (Détermination de la teneur en Fer)

Pour déterminer la teneur en fer des échantillons de minerai, une méthode de titrage volumétrique par oxydoréduction a été utilisée. Il s'agit de la même procédure que celle employée par la mine d'El-Ouenza pour les analyses de routine. Cette technique classique de chimie en solution permet la quantification précise des oxydes de fer, notamment Fe_2O_3 , par réduction des ions ferriques (Fe^{3+}) en ions ferreux (Fe^{2+}) et titrage avec un agent oxydant standardisé. La procédure a été réalisée au laboratoire de la mine d'El-Ouenza selon un protocole standard.

- Dissolution des échantillons

Pour chaque fraction granulométrique (-1 mm et $-0,063$ mm), 0,1 g d'échantillon a été pesé dans un bécher propre. 25 mL d'acide chlorhydrique (HCl) ont été ajoutés à chaque bécher (figure III.7). Le mélange a été chauffé doucement pour dissoudre les oxydes de fer, comme l'indiquait la disparition des particules brun-rougeâtre. Une fois la dissolution complète, la solution a été retirée du feu et de l'eau distillée a été ajoutée pour rincer les parois du bécher, le volume total étant ajusté à 100 mL.



Figure III.7 : Procédure de mesure et de chauffage

- Réduction et stabilisation du Fe^{2+} :

Pour réduire le Fe^{3+} en Fe^{2+} , du chlorure stanneux ($SnCl_2$) a été ajouté goutte à goutte jusqu'à ce que la solution passe de l'orange à l'incolore, indiquant une réduction complète. Ensuite, 10 mL de chlorure mercurique ($HgCl_2$) ont été ajoutés pour éliminer tout excès de Sn^{2+} par précipitation du $HgCl_2$. Cette étape est cruciale pour éviter toute interférence lors du titrage.

- Complexations acide :

Un mélange acide préparé au préalable a été ajouté à chaque échantillon. Ce mélange était composé des éléments suivants :

- 150 mL d'acide sulfurique (H_2SO_4)
- 150 mL d'acide phosphorique (H_3PO_4)
- Dilué avec de l'eau distillée à 1000 mL

Ce milieu acide améliore la visibilité du point d'équivalence du titrage et stabilise le complexe de Fe^{2+} .

- Procédure de titrage :

Après l'ajout de 10 gouttes d'indicateur coloré, chaque solution a été placée sur un agitateur mécanique. Une solution titrée de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) a été ajoutée goutte à goutte à l'aide d'une burette.

III.3.3 Analyse par DRX

Un diffractomètre à rayons X (DRX), modèle Bruker D8 ADVANCE, équipé d'une anticathode en cuivre en configuration optique Bragg-Brentano avec fentes fixes, filtre Ni et détecteur linéaire ultrarapide, a été utilisé pour l'analyse minéralogique.

Le rayonnement utilisé était un rayonnement $Cu\ K\alpha$ d'une longueur d'onde de 1,540598 Å, dans les valeurs de 2θ comprises entre 0 et 80° d'angle de Bragg (Khoshdast et Shojaei, 2012). La DRX a permis d'identifier les phases minérales présentes dans le minerai. La masse de l'échantillon requise était d'environ 3g, avec une granulométrie inférieure à 74 μm . L'échantillon a été pressé afin d'obtenir une surface plane et uniforme, puis placé dans l'appareil de DRX pour lancer la détection (Hasanizadeh et al., 2023).

L'échantillon prélevé et tamisé a été finement broyé puis analysé par la diffraction des rayons X (DRX). Les spectres, obtenus, sont composés de plusieurs pics. La loi de Bragg nous permet d'analyser les spectres obtenus de l'échantillon initial et les analyser par le logiciel HighScore. La figure III.8 présente l'appareil de DRX.



Figure III.8 : Appareil de diffraction des rayons X (2)

III.3.4 Analyse par XRF

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (communément appelée SFX, FX, fluorescence X ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse non destructive qui utilise des rayons X pour exciter la matière (*Figure III.9*). Ceci entraîne un phénomène de fluorescence X en émettant des photons avec des énergies caractéristiques des atomes présents dans l'échantillon. En analysant le spectre, on peut identifier et quantifier la composition élémentaire, majeurs et trace, d'un échantillon quelconque.

Elle permet l'analyse des éléments allant du béryllium (Be) à l'uranium (U) dans des gammes de concentrations allant de 100% à des niveaux inférieurs aux ppm, avec des résultats précis et reproductibles.

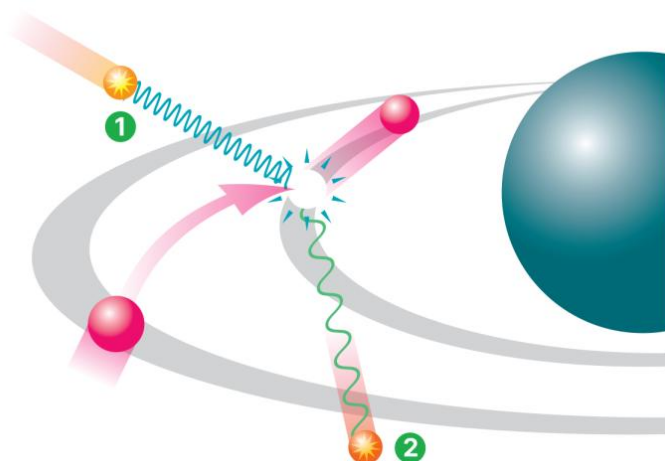


Figure III.9 : Procédé de fluorescence X (XRF) : 1) Photon entrant 2) Photon caractéristique.

L'analyse par spectrométrie de fluorescence X présente de nombreux avantages comparés à d'autres méthodes chimiques dont:

- l'aspect méthode non destructive.
- la préparation d'échantillons variés : tels que l'analyse de solide (pions), de poudre directe ou en pastille (laitier) voir même liquide (bains de traitement).
- et la stabilité de la calibration.

C'est une technique robuste qui combine haute précision et exactitude. Elle peut être facilement automatisée pour une utilisation dans des environnements industriels à rendement élevé. En outre, la fluorescence X fournit des informations qualitatives et quantitatives sur un échantillon (3).

III.3.5 Analyse par MEB-EDX

Le MEB-EDX est une technique d'analyse microscopique utilisant un canon à effet de champ (FEG en anglais pour Field Emission Gun) qui produit des images en très haute résolution de la surface d'un échantillon (résolution théorique de 1 nm). Cet outil d'analyse microscopique est particulièrement puissant et performant pour des diagnostics rapides (pollution, inclusion...) ou d'expertises plus complexes. Il est équipé d'un détecteur EDX (rayons X à Dispersion en Energie) qui permet de réaliser des analyses semi quantitatives et de réaliser des cartographies élémentaires afin d'observer la répartition des éléments présents, (voir figure III.10 et figure III.11)

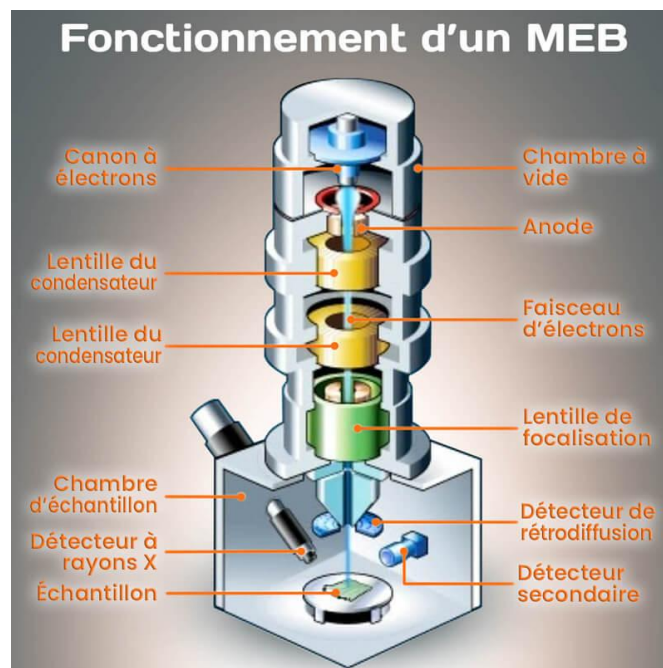


Figure III.10 : Principe du MEB-EDX (4)

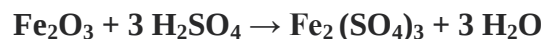


Figure III.11 : Appareil de MEB-EDX (Laboratoire d'ENSTI, Annaba) (5)

III.4 Lixiviation du minerai de fer pauvre de la mine d'El-Ouenza

La lixiviation du minerai de fer est un procédé hydrometallurgique intéressant. Il consiste à dissoudre le fer à l'aide d'un agent chimique.

L'oxyde de fer (Fe_2O_3) se dissout facilement dans les acides forts tels que l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique. Il se dissout également très bien dans les agents de chélation tels que l'EDTA et l'acide oxalique. Sa réaction chimique s'écrit comme suite :



L'objectif principal de ce travail était d'étudier la dissolution de poudre du minerai de fer pauvre d'El-Ouenza (hématite) en utilisant un agent lixiviant. Des essais de lixiviation ont été réalisés à différents paramètres opératoires. Tous les essais de lixiviation de cette étude ont été réalisés au niveau de laboratoire des mines et de chimie de l'université de Tébessa.

III.4.1 Choix des paramètres opératoires

Le choix des paramètres opératoires dans la lixiviation de fer et plus particulièrement pour l'Hématite (Fe_2O_3) ne se fait pas au hasard.

Vehmaanperä, P., et al., (2021) a déterminé qu'une augmentation en concentration d'acide rend la cinétique de dissolution de l'hématite plus rapide et une solubilité plus élevée.

Xiaohua Peng, (2024) dans son étude intitulée « Dissolution behavior of hematite in H_2SO_4 solution: A kinetic analysis and its importance on the zinc hydrometallurgical hematite process » a constaté que la température et la concentration en H_2SO_4 influencent significativement l'efficacité de dissolution du fer (Fe) contenu dans l'hématite. En dessous de 363,15 K, l'efficacité de dissolution du Fe augmente avec la température, tandis qu'au-dessus de 363,15 K, elle diminue. L'augmentation de la concentration en H_2SO_4 favorise la dissolution de l'hématite. Le rapport liquide/solide et la granulométrie ont peu d'effet sur la

CHAPITRE III MATERIELS & METHODES EXPERIMENTALES

concentration en Fer après 180 min de dissolution, mais influencent fortement l'efficacité de dissolution du Fer. (J.E. Dutrizac, 1987).

Kui Liu, et al, (2012), ont constaté que la température, la concentration en acide et la granulométrie ont un impact significatif sur la vitesse de lixiviation, tandis que l'influence du rapport solide/liquide est négligeables. De plus, l'hypothèse est que des températures plus élevées entraînent une cinétique accélérée ainsi qu'un niveau de solubilité plus élevé. (Panias et al., 1996b; Salmimies et al., 2011; Salmimies et al., 2012).

En revanche, des températures plus élevées peuvent favoriser des réactions secondaires indésirables susceptibles d'empêcher, voire d'interrompre, la solubilité du fer. Par exemple,

Ma et al. (2013) ont constaté qu'une augmentation de température de 140 °C à 200 °C diminuait la solubilité du fer en raison de la précipitation d'hématite. De plus, la sensibilité de la dissolution à la température renseigne sur l'étape limitante de la vitesse de dissolution : si la dissolution est contrôlée par une réaction chimique, elle est plus sensible à la température (Levenspiel, 1999).

L'influence des paramètres opératoires sur la cinétique de la lixiviation est établie en basant sur la littérature dans le domaine de l'hydrométallurgie (Levenspiel, 1999 ; Hasnshi, 1999 ; Dutrizac, 1990...etc.). Une synthèse des principaux paramètres opératoires et leur influences est illustrée sur la figure III.12.

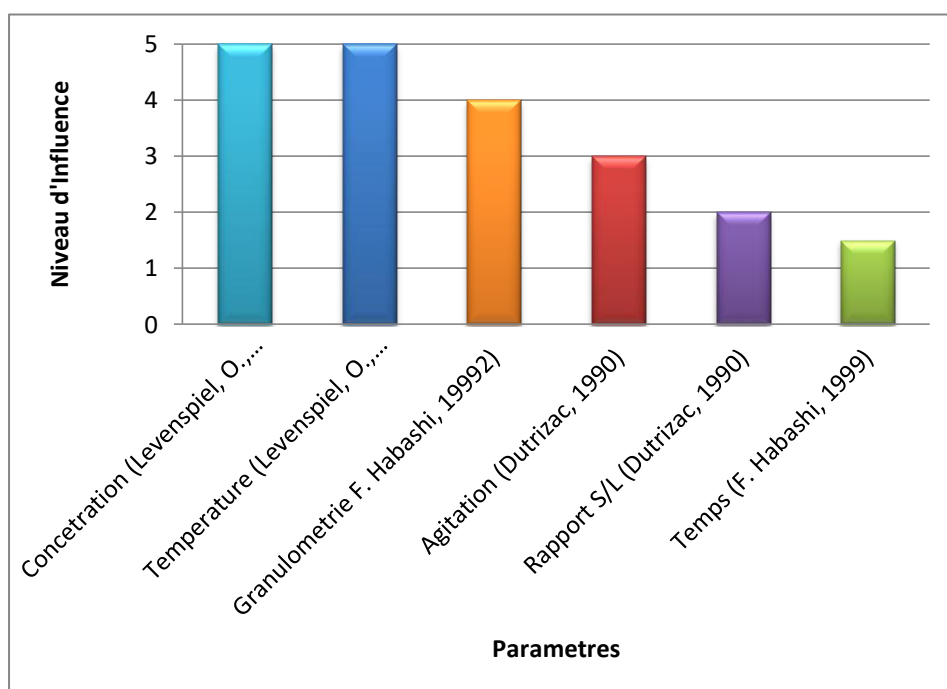


Figure III.12 : Principaux paramètres opératoires et leur influence sur la cinétique de la lixiviation

D'après la figure ci-dessus, les paramètres les plus influents sont : la **concentration en acide, la température et la granulométrie**. Les autres paramètres sont moins influents.

Selon les auteurs Wills, (Wills' Mineral Processing Technology 2016, Kui Liu, et al., 2012, C. L. Lawrence, A. A. Mular et G. J. Dreisinger , 1993, Levenspiel, O., 1999), la vitesse d'agitation pendant la lixiviation (transfert solide/liquide) doit être suffisante pour éliminer la résistance au transfert de masse externe.

Pour cela, la plupart des procédés hydrométallurgiques sont adaptés à une vitesse d'agitation entre 500 et 700tr/min, au-delà, la vitesse de dissolution devient indépendante de la vitesse d'agitation, c.-à-d. négligeable et elle n'a pas d'influence sur la cinétique de la lixiviation.

Pour nos essais, la vitesse d'agitation choisie a été fixée à **600tr/min**.

Pour le temps d'agitation, la cinétique de lixiviation révèle une dissolution rapide et complète à une durée de **60min**. au-delà, l'effet de ce dernier devient négligeable et que cette durée est optimale pour lixivier le fer (Wills' Mineral Processing Technology 2016, Kui Liu, et al., 2012, C. L. Lawrence, A. A. Mular et G. J. Dreisinger , 1993, Levenspiel, O., 1999).

III.4.2 Choix de l'agent lixiviant

Le choix de l'agent de lixiviation est une décision cruciale qui dépend de plusieurs facteurs. La minéralogie du minerai détermine les produits chimiques qui réagiront efficacement avec les métaux cibles. La sélectivité souhaitée influence le choix du lixiviant qui dissoudra les métaux précieux tout en retenant les substances indésirables. Les considérations environnementales jouent également un rôle majeur, car certains agents de lixiviation présentent des risques écologiques plus importants que d'autres (6).

La compréhension de ces réactions chimiques permet aux métallurgistes d'optimiser les conditions de lixiviation. En contrôlant des facteurs tels que la température, la concentration et le pH, l'efficacité d'extraction peut être considérablement améliorée. Par exemple, l'augmentation de la température accélère généralement les réactions, tandis que l'ajustement du pH peut accroître la solubilité de certains composés métalliques. Ce contrôle précis de la chimie des réactions rend les procédés de lixiviation modernes économiquement viables, même pour les minerais à faible teneur qui ne seraient pas rentables avec les méthodes traditionnelles (7).

Plusieurs critères doivent être satisfaits pour un réactif de lixiviation, le choix de l'agent lixiviant dépend essentiellement des facteurs ci-après (M. Jacob-Duliere, 1980). Les caractéristiques chimiques et physiques de la matière à dissoudre.

- Le coût du réactif.

CHAPITRE III MATERIELS & METHODES EXPERIMENTALES

- La réactivité avec le constituant utile à dissoudre.
- La possibilité de régénération du réactif.
- La corrosion limitée du réacteur de lixiviation.

Selon le tableau III.1, l'acide choisi pour nos essais de lixiviation est l'**acide sulfurique (H₂SO₄)**. Ce dernier est l'agent le plus approprié car son coût est faible, moins volatil, une réactivité élevée et plus stable par rapport aux autres acides.

Tableau III. 1: Principaux acides de lixiviation et leurs caractéristiques (Free, M.L., 2013).

Acide	Formule	Réactivité	Coût	Avantage	Inconvénient
Acide sulfurique	H ₂ SO ₄	Élevée	100 -180 \$/t	Très utilisé, bon marché, moins volatil et stable	Corrosif, génère de sulfates
Acide chlorhydrique	HCl	Très élevée	120 -250	Dissolution rapide nombreux métaux	Vapeurs toxiques, corrosion élevée, plus risqué à manipuler sans hotte
Acide nitrique	HNO ₃	Très élevée (oxydant fort)	300 -600	Dissout métaux nobles et sulfures	Cher, dangereux, émissions NOx
Acide phosphorique	H ₃ PO ₄	Moyenne	500 -900 \$/t	Moins corrosif, sélectif	Très cher, Réactivité plus faible
Acide citrique	C ₆ H ₈ O ₇	Faible à moyenne	700-1500 \$/t	Écologique, biodégradable	Trop cher, Lent, coûteux à grande échelle
Acide oxalique	H ₂ C ₂ O ₄	Moyenne	600-1200 \$/t	Bon pour certains métaux (Fe, terres rares)	Très cher, Peut former des précipités
Acide acétique	CH ₃ COOH	Faible	400-800 \$/t	Moins dangereux	Très lent, faible efficacité industrielle

III.4.3 Technique de Lixiviation utilisée

Les essais de lixiviation du fer pauvre d'e-l'Ouenza représentent la grande partie de cette étude dans le but de valoriser ce fer en utilisant l'acide sulfurique comme agent lixiviant (**lixiviation acide**) ainsi que d'étudier l'influence des paramètres opératoires sur la cinétique de la lixiviation

III.4.3.1 Matériels utilisés

- Une étuve ;
- Une balance analytique de précision ;
- pH mètre ;
- Pipettes ;
- Fioles de 250ml (figure III.13)
- Eau déminéralisée ;
- Un agitateur magnétique chauffant jusqu'à 340°C, numérique, MS-H-ProT, 20L a été utilisée pour la réalisation des essais nécessitant la variation dans la température ;
- Filtre a porosité de <0,45mic ;
- Acide sulfurique (H_2SO_4) à 98% de pureté (il est préparé à des différentes concentrations selon les essais de lixiviation) ;
- L'eau distillée pour la préparation des réactifs et des solutions étalons.



Figure III.13 : Fioles utilisées

III.4.3.2 Préparation des échantillons de fer

Pour les essais de lixiviation de minerai de fer, plusieurs échantillons (d'environ 2kg) ont été collectés à partir du terril de stockage des rejets de fer dans la mine d'El-Ouenza. Ces échantillons ont été broyés, homogénéisés (méthode de quartage), afin d'assurer la représentativité des échantillons.

Dans la lixiviation, le choix des tranches granulométriques est déterminant, puisque les dimensions des grains contrôle directement la surface spécifique, et par conséquent la cinétique de la dissolution du fer. Pour cela ; un tamisage a été effectué pour l'obtention des fractions nécessaires pour notre étude dont : 0.063 mm, 0.12 mm, 0.25 mm et 0.5 mm. Ces derniers ont été analysés pour déterminer la teneur moyenne en fer.

III.4.3.3 Procédé de lixiviation

Pour chaque essai de lixiviation, **5gramme** de fer pauvre (Figure III.14) pour chaque tranche granulométrique (**0,063 à 0,5mm**) a été introduite dans une fiole conique de 250 ml contenant 100 ml de l'acide sulfurique (H_2SO_4) suivant les différentes concentrations de 1 - 4M.

Chaque mélange a été agité à l'aide d'un agitateur magnétique et chauffé à différentes températures de **25 à 95°C** suivant un plan d'expérience en utilisant le logiciel Design-Expert -13. Durant tous les essais, la vitesse d'agitation et le temps de lixiviation ont été fixés à **600tr/min** et **60min** respectivement.

Pendant les essais, chaque fiole a été couverte par pour minimiser tous pertes due à l'évaporation de solution. Après la lixiviation, laisser décanter le solide pour faciliter la filtration. La solution a été refroidie et filtrée à l'aide d'un papier filtre ayant une porosité de 0,45 μm et Buchner dans un flacon standard. En fin toutes les solutions ont été analysées pour déterminer le taux de fer dans chaque solution.



Figure III.14 : Pesage des échantillons du fer pauvre.

Plans d'expérience (Design of Expérience, DOE)

Dans cette étude, trois facteurs ont été sélectionnés et modifiés dans tous les essais selon un plan factoriel. Les variables considérées dans le procédé de la lixiviation étaient la concentration en acide (**X1**), la température (**X2**) et la granulométrie du minerai de fer (**X3**).

CHAPITRE III MATERIELS & METHODES EXPERIMENTALES

Les niveaux des variables codées sont présentés dans le Tableau 1. Les effets des variables indépendantes sur le procédé de lixiviation ont été étudiés.

La planification factorielle des expériences (DOE) est fréquemment utilisée pour identifier les effets primaires et interactifs entre deux variables de procédé ou plus. Un plan factoriel complet permet aux chercheurs d'analyser et de comprendre l'influence de chaque facteur sur la variable de réponse, ainsi que les effets des interactions entre les facteurs sur cette même variable. Cette approche est couramment utilisée dans les applications pratiques (Nekouei R. K., et al., 2013). Le nombre requis d'expériences a été représenté par un plan factoriel $N = k^2 + k + cp$ (Souzaa et al., 2005, Massart et al., 1997, Neto et al., 2001, Sérgio, et al., 2004) :

Où :

k : numéro du facteur variable

cp : nombre de répétitions des essais rapportés au point central des niveaux choisis.

Les données du plan d'expériences (DOE) ont été traitées à l'aide du logiciel Design-Expert13. 8 essais expérimentaux (Tableau 2) ont été nécessaires pour le plan factoriel de trois niveaux.

Tableau 1. Niveaux des variables indépendantes de la lixiviation

Variables (paramètres opératoire)	Symboles	Variables codées		
		-1	0	+1
concentration en acide M	X_1	1	2,5	4
Température °C	X_2	25	60	95
Granulométrie (mm)	X_3	0,063	0,31	0,5

Tableau 2. Tests expérimentaux avec variables de lixiviation selon un plan d'expériences

N° de test	Paramètres opératoires		
	Concentration (M)	Température (°C)	Granulométrie (mm)
1	4	25	0,31
2	2,5	60	0,31
3	4	95	0,31
4	4	60	0,063
5	2,5	95	0,063
6	1	60	0,063
7	2,5	25	0,5
8	2,5	25	0,063
9	1	60	0,5
10	4	60	0,5
11	2,5	95	0,5
12	1	25	0,31
13	1	95	0,31

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR), initiée par Box et Wilson (Sarabia & Ortiz, 2009), regroupe un ensemble de méthodes mathématiques et statistiques conçues pour analyser des problèmes similaires à celui présenté par la modélisation empirique. La MSR s'impose comme l'approche optimale et la plus appropriée dans le domaine de l'ingénierie. L'utilisation de graphiques de surface pour la prédiction permet de discerner l'influence de chaque paramètre d'entrée sur l'efficacité du séparateur, ainsi que les effets interactifs des paramètres sur chaque variable de réponse. Cette analyse améliore l'évaluation de la pertinence du modèle développé et facilite la prédiction des résultats optimaux (Khuri & Mukhopadhyay, 2010). La MSR quantifie également la corrélation entre les paramètres d'entrée contrôlables et la surface de réponse (Routray & Rao, 2013).

Les variables optimales peuvent être déterminées grâce à la MSR. Étant donné que toutes les variables sont mesurables, la surface de réponse peut être représentée comme indiqué dans l'équation (1) (Martinez et al., 2003 ; Majumder et al., 2007) :

$$y = f(X1, X2, X3) \quad (1)$$

Où :

y : paramètre dépendant du système
x1, x2, x3 : variables explicatives.

Pour approcher avec précision la corrélation entre les facteurs sélectionnés (variables indépendantes) et la surface de réponse, la méthodologie des surfaces de réponse utilise un modèle du second ordre, noté par l'équation (2) :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Où :

x1, x2, x3 : sont les variables d'entrée qui influencent la variable de réponse y ;
 $\beta_0, \beta_{ii}, \dots, \beta_{ij}$: où $i=1, 2, \dots, k$ et $j=1, 2, \dots, k$ sont les paramètres inconnus
 ε : représente une erreur aléatoire (négligeable dans cette recherche).

Conclusion

Ce chapitre a présenté les matériaux et les méthodes expérimentales utilisés pour la caractérisation et la valorisation du minerai de fer d'El-Ouenza. Les échantillons ont été préparés selon des protocoles normalisés comprenant le concassage, le broyage, le quartage et le tamisage afin d'assurer leur représentativité.

Les analyses granulométriques, chimiques et minéralogiques (DRX, XRF et MEB-EDX) ont permis de déterminer les principales caractéristiques du minerai étudié.

Par ailleurs, les essais de lixiviation acide réalisés à l'aide de l'acide sulfurique ont permis d'étudier l'influence des principaux paramètres opératoires, tels que la concentration en acide, la température et la granulométrie, sur la dissolution du fer. L'utilisation d'un plan d'expériences (DOE) et de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) a permis d'optimiser les conditions expérimentales et d'évaluer les interactions entre les différents facteurs influençant la cinétique de lixiviation.

Ainsi, l'ensemble des procédures expérimentales mises en œuvre constitue une base méthodologique solide pour l'interprétation des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant, consacré à l'analyse et à la discussion des performances de valorisation du minerai de fer d'El-Ouenza.

Références

Nekouei Rasoul Khayyam, Fereshteh Rashchi, Ahmad Ali Amadeh, Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis, Powder Technology, Volume 237, 2013, Pages 165-171, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.032>.

Sérgio, L.C. F., Walter, N. L. dos Santos, Cristina, M. Q., Benício, B. N. & Juan, M. B.-S. (2004). Doehlert matrix: a chemometric tool for analytical chemistry—review, *Talanta*, (63) 4, 1061-1067, ISSN 0039-9140, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.01.015>.

Khuri, A. I. & Mukhopadhyay, S., (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*, 2: 128–149. <https://doi.org/10.1002/wics.73>

Routray, S. & Rao, R.B. (2013). Optimization of some parameters of rougher spiral concentrator for preconcentration of total heavy minerals from beach sand. *World Metall.-ERZMETALL* 66(1), 5–12 https://www.researchgate.net/publication/287304806_Optimization_of_some_parameters_of_rougher_spiral_concentrator_for_preconcentration_of_total_heavy_minerals_from_beach_sand

M. Jacob-Duliere, (1980), cours de métallurgie spéciale destiné aux étudiants de 5eme Mines de la faculté polytechnique de Mons, 198.

Free, M.L. (2013), Hydrometallurgy: Fundamentals and Application. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781118732465>

Vehmaanperä, P., Salmimies, R. & Häkkinen, A. Thermodynamic and Kinetic Studies of Dissolution of Hematite in Mixtures of Oxalic and Sulfuric Acid. *Mining, Metallurgy & Exploration* 38, 69–80 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00308-4>

Xiaohua Peng, Bo Yang, Xingbin Li, Xingzheng Dai, Chang Wei, Zhanqing Lu, Zhigan Deng, Minting Li, Gang Fan, Dissolution behavior of hematite in H_2SO_4 solution: A kinetic analysis and its importance on the zinc hydrometallurgical hematite process, *Minerals Engineering*, Volume 215, 2024, 108811, ISSN 0892-6875, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108811>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687524002401>

Kui Liu, Qiyuan Chen, Zhoulan Yin, Huiping Hu, Zhiying Ding, Kinetics of leaching of a Chinese laterite containing maghemite and magnetite in sulfuric acid solutions, *Hydrometallurgy*, Volumes 125–126, 2012, Pages 125-136, ISSN 0304-386X, <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.06.001>.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X12001338>

Levenspiel, O. (1999) *Chemical Reaction Engineering*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, New York, 54. <http://dx.doi.org/10.1021/ie990488g>

Ma, B., Wang, C., Yang, W., Yang, B. Zhang, Y. (2013). Selective pressure leaching of Fe(II)-rich limonitic laterite ores from Indonesia using nitric acid. *Minerals Engineering*, 45, 151-158.

Panias, D., Taxiarchou, M., Paspaliaris, I., Kontopoulos, A. (1996b). Mechanisms of dissolution of iron oxides in aqueous oxalic acid solutions. *Hydrometallurgy*, 42, 257- 265.

Salmimies, R.; Mannila, M.; Kallas, J.; Häkkinen, A. Acidic dissolution of magnetite: Experimental study on the effects of acid concentration and temperature. *Clays Clay Miner.* 2011, 59, 136–146. [\[CrossRef\]](#)

Salmimies, R.; Mannila, M.; Kallas, J.; Häkkinen, A. Acidic dissolution of hematite: Kinetic and thermodynamic investigations with oxalic acid. *Int. J. Miner. Process.* 2012, 110–111, 121–125. [\[CrossRef\]](#).

J.E. Dutrizac, An Overview of Iron Precipitation in Hydrometallurgy, Editor(s): GL STRATHDEE, MO KLEIN, LA MELIS, *Crystallization and Precipitation*, Pergamon, 1987, Pages 259-283, ISBN 9780080357515, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-035751-5.50038-6>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080357515500386>

L. Tao , L. Wang , K. Yang , X. Wang , L. Chen and P. Ning , Leaching of iron from copper tailings by sulfuric acid: behavior, kinetics and mechanism *RSC Adv.*, 2021, **11** , 5741 — 5752, DOI: 10.1039/d0ra08865j

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ra/d0ra08865j#!divCitation>

KHOSHDAST, H., SHOJAEI, V., 2012. Ash removal from a sample coal by flotation using rhamnolipid biosurfactants. *Journal of Mining World Express*. 1(2), 39–45.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91853763>

Hassanzadeh-Tabrizi, S.A. (2023) Precise Calculation of Crystallite Size of Nanomaterials: A Review. *Journal of Alloys and Compounds*, 968, Article 171914.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171914>

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Elsevier.

Lawrence, L., Mular, A. A., & Dreisinger, G. J. (1993). In *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME).

Matías Miguel Salvarredy Aranguren. 2008, Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers

Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique.. Planète et Univers [physics]. Université Paul Sabatier - Toulouse III,

J. L. Pineau, Nathalie Valentin, Isabelle Barale. L'application de la représentativité à l'aide à la décision. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 1996, N°2 - 2ème Trimestre 1996, pp.39-43. <10.4267/dechetssciences-techniques.615>. <hal-03183196>

L. Gosselin, R. Jobidon, L. Bernier, Biological Control of Stump Sprouting of Broadleaf Species in Rights-of-Way with *Chondrostereum purpureum*: Incidence of the Disease on Nontarget Hosts, *Biological Control*, Volume 16, Issue 1, 1999, Pages 60-67,

ISSN 1049-9644, <https://doi.org/10.1006/bcon.1999.0736>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1049964499907363>)

Majumder, A. K., K. S. Bhoi, & Barnwal, J. P. (2007). Multi-gravity separator: An alternate gravity concentrator to process coal fines. *Minerals & Metallurgical Processing* (24), 133-138. <https://doi.org/10.1007/BF03403207>

Martinez, A. L., A. S. Uribe, F. R. P. Carrillo, J. A. Coreno, & J.C. Ortiz. (2003). Study of celestite flotation efficiency using dodecyl sulfonate collector: Factorial experiment and statistical analysis of data. *International Journal of Mineral Processing* (70), 83-97. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00152-7).

Sarabia, L.A. & Ortiz, M.C. (2009), Response Surface Methodology, Steven D. Brown, Romá Tauler, Beata Walczak, Comprehensive Chemometrics, Elsevier, Pages 345-390, ISBN 9780444527011, <https://doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00083-1>.

Neto, B.B., Scarminio, I.S., & Bruns, R.E. (2001). Como fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria. – Editora da Unicamp, São Paulo. https://www.google.dz/books/edition/Como_Fazer_Experimentos_4_ed/FDnT9ygeOccC?hl=fr

Massart, D. L., Vandeginste B. G. M., Buydens L. M. C., Jong S. De, Lewi P. J., & Smeyers-Verbeke J., (1997). Handbook of chemometrics and qualimetrics Part A, *Data Handling in Science and Technology* (20A), 1-867, ISBN 0-444-89724-0. <https://www.sciencedirect.com/bookseries/data-handling-in-science-and-technology/vol/20/part/PA>

Souzaa, A.S., Dos Santos, W.N.L. & Sergio F. L.C. (2005). Application of Box-Behnken design in the optimization of an on-line pre-concentration system using knotted reactor for cadmium determination by flame atomic absorption spectrometry, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, (60)5, 737-742. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.02.007>

F. Habashi, “A Textbook of Hydrometallurgy,” 2nd Edition, Métallurgie Extractive Québec, Québec City, 1999. www.zone.ul.ca

Dutrizac, J.E. Converting jarosite residues into compact hematite products. *JOM* 42, 36–39 (1990). <https://doi.org/10.1007/BF03220521>

Website:

- (1) <https://wiki.aurea.eu/index.php?title=L%27%C3%A9chantillonnage>
- (2) <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Diffraction-rayons-X-techniques-determination-structure.xml>

- (3) <https://www.malvernpanalytical.com/fr/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence#:~:text=La%20spectrom%C3%A9trie%20de%20fluorescence%20des,X%20pour%20exciter%20la%20mati%C3%A8re.>
- (4) <https://www.gemaddis.com/blog/article-blog-microscope-electronique-a-balayage>
- (5) <https://www.materianova.be/fr/nos-equipements/analyse-caracterisation/caracterisation-morphologique/meb/>
- (6) <https://www.okonrecycling.com/industrial-scrap-metal-recycling/specialty-metals/leaching-process-hydrometallurgy/>
- (7) <https://www.okonrecycling.com/industrial-scrap-metal-recycling/specialty-metals/leaching-process-hydrometallurgy/>

CHAPITRE IV
RESULTATS &
INTERPRETATIONS

Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons les différents résultats de la caractérisation du minerai de fer d'El-Ouneza et les analyses des produits issus de la lixiviation acide, incluant l'analyse granulométrique, la microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie de dispersion d'énergie (MEB-EDS), la fluorescence X (XRF) et la diffraction des rayons X (DRX).

Dans la seconde partie, nous présenterons les résultats des analyses statistiques réalisées avec le logiciel Design-Expert-13 afin d'étudier l'influence des paramètres de lixiviation sur la récupération du fer d'El-Ouneza, ainsi que leur optimisation.

IV.1 Résultats de la caractérisation du fer d'El-Ouenza

IV.1.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est une méthode permettant de déterminer la distribution granulométrique d'un matériau tel que les minerais. C'est une étape cruciale dans plusieurs domaines scientifiques et industriels, notamment dans le traitement des minéraux.

L'étude granulométrique a été réalisée à l'aide d'une série de tamis normalisés, conformément à la norme NE-NF 933-2. Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Résultats de l'analyse granulométrique du fer d'El-Ouenza

Tranche, mm	Poids, (g)	Cumulative (%)	Refus (%)	Passant (%)
> 1	31.6	1.03	1.03	98.97
-1 + 0,5	168.7	5.49	6.52	93.48
-0.5 + 0.250	255.2	8.33	14.85	85.15
-0.250 + 0.125	1237.2	40.39	55.24	44.76
-0.125 + 0.063	1162.2	37.94	93.18	6.82
-0.063	208.15	6.80	99.98	0.02
Total	3063.05	99.98	--	--

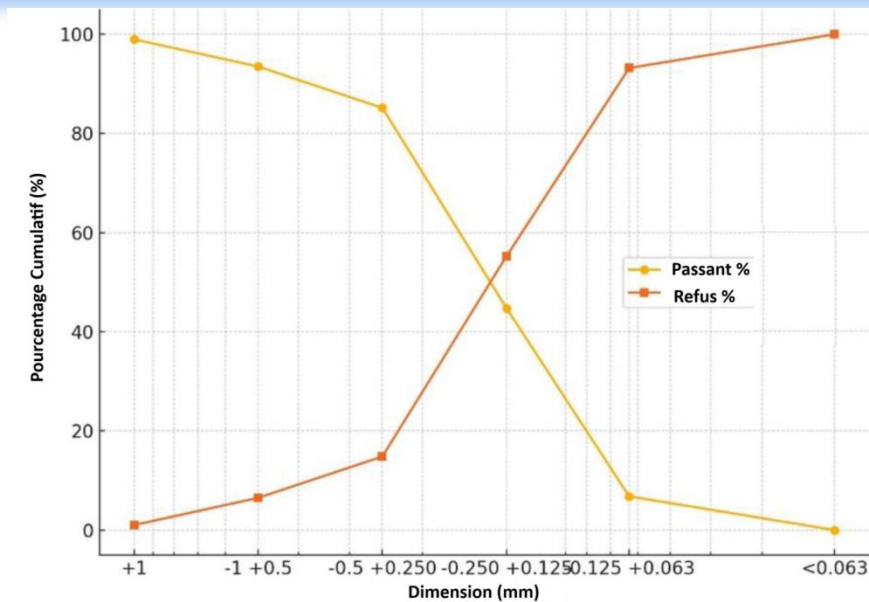


Figure IV.1 : Courbe granulométrique du minerai de fer de la mine d'El-Ouneza

D'après la courbe granulométrique (Figure IV.1), toutes les particules supérieures à 1 mm sont passées au travers du tamis, ce qui indique que le minerai de fer d'El-Ouneza contient très peu de particules grossières.

Concernant la finesse du minerai, la courbe cumulative présente une diminution et un changement de direction à partir de 0,250 mm, ce qui indique que le minerai de fer est principalement composé de particules fines inférieures à 0,250 mm.

À partir de cette courbe cumulative, on peut déterminer les valeurs D10, D50 et D80 :

- D10 : dimension à laquelle passe 10 % du minerai, correspondant à la fraction fine (D10 = 0,08 mm) ;
- D50 : dimension à laquelle passe 50 % du minerai, correspondant à la fraction moyenne (D50 = 0,25 mm) ;
- D80 : dimension à laquelle passe 80 % du minerai, correspondant à la fraction grossière (D80 = 0,35 mm).

IV.1.2 Analyse granulo-chimique

L'analyse granulo-chimique est une méthode qui combine l'analyse granulométrique classique avec l'analyse chimique de différentes fractions afin de déterminer la distribution des éléments chimiques et/ou des minéraux en fonction de la taille des grains. Elle permet également d'identifier les fractions les plus riches ou les plus pauvres en minéraux utiles, optimisant ainsi les procédés de récupération par la sélection des fractions les plus appropriées.

CHAPITRE IV RESULTATS & INTERPRETATIONS

Les résultats de l'analyse granulo-chimique du minerai de fer à faible teneur de la mine d'El-Ouenza sont présentés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Résultats de l'analyse granulo-chimique du minerai de fer à faible teneur de la mine d'El-Ouenza

Tranche, mm	poids, g	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	MnO	LOI
> 1	31,6	17,30	1,40	40,09	16,75	1,63	0,07	0,05	1,13	20,49
-1 + 0,5	168,7	16,47	1,58	42,82	17,04	1,75	0,08	0,08	1,22	20,82
-0.5 + 0.250	255,2	16,63	2,01	41,89	18,34	2,17	0,20	0,09	1,30	19,21
-0.250 + 0.125	1237,2	21,13	2,74	42,56	14,67	1,79	0,22	0,15	1,29	18,57
-0.125 + 0.063	1162,2	24,91	3,11	44,28	11,69	1,69	0,20	0,18	1,26	13,12
-0.063	208,15	26,89	4,15	43,18	11,34	1,58	0,20	0,21	1,24	13,20
Moyenne	--	21,69	2,50	42,47	15,29	1,70	0,16	0,15	1,35	17,24

D'après ces résultats, on peut conclure que l'oxyde de fer (Fe₂O₃) est l'oxyde dominant dans toutes les fractions des échantillons de minerai (avec une teneur moyenne de 42 à 47 %). La présence de CaO en quantité relativement élevée (15 à 29 %) est bénéfique, car le CaO est utilisé comme fondant dans le haut fourneau (S. Bensaada, 2010).

La présence d'une perte au feu (LOI) élevée indique la présence de :

- Minéraux hydratés tels que les argiles, la goethite et la gibbsite, etc.
- Carbonates tels que la calcite (CaCO₃) et la dolomite
- Matière organique

IV.1.3 Analyse minéralogique (DRX)

L'analyse minéralogique a été réalisée sur l'échantillon de minerai de fer sélectionné par diffraction des rayons X (DRX). Le diffractogramme a été identifié à l'aide du logiciel HighScore-Plus. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures IV.2. (Hadjer A, 2025)

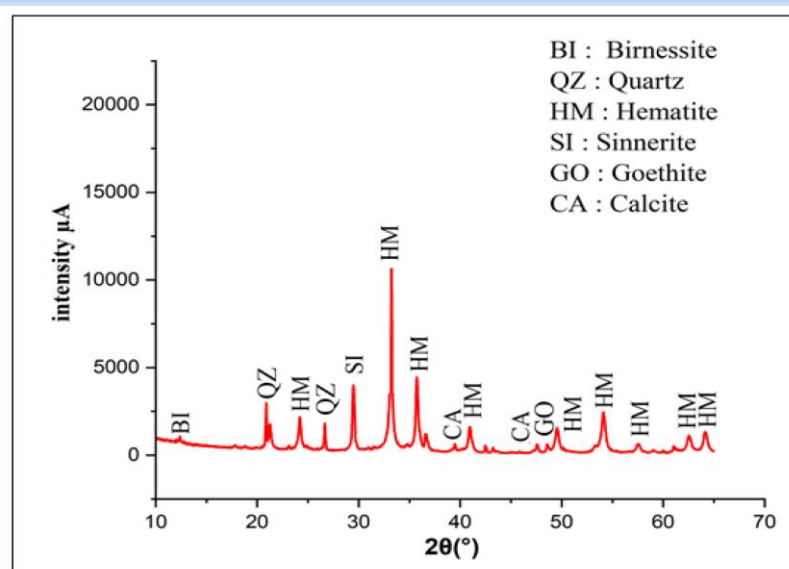


Figure IV.2 : Diffraction des rayons X du minerai de fer d'El-Ouneza (Hadjer A, 2025)

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la prédominance de l'hématite dans le minerai de fer de d'El-Ouneza, ainsi que la présence de quartz, de sinnérite (formule : $\text{Cu}_6\text{As}_4\text{S}_9$), de birnessite, de calcite, de quartz et de goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par microscopie électronique à balayage (MEB), confirmant la présence de phases riches en fer et de silicates/carbonates. L'identification du quartz et de la calcite corrobore les teneurs élevées en SiO_2 et CaO observées. La birnessite (avec un pic de sillage) : ce minéral (nominalement $\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), également connu sous le nom de $\delta\text{-MnO}_2$, est un dioxyde de manganèse hydraté de formule chimique $\text{Na}_{0,7}\text{Ca}_{0,3}\text{Mn}_7\text{O}_{14} \cdot 2,8\text{H}_2\text{O}$ (Jones, L. H. P. et al., 1956). Ces analyses minéralogiques sont en accord avec les analyses chimiques.

IV.1.4 Analyse par MEB-EDS

L'imagerie MEB et la microanalyse EDS associée ont permis d'obtenir des informations détaillées sur la microstructure et la distribution chimique du minerai. La zone analysée était représentative de l'échantillon entier et a été analysée sous une tension d'accélération de 25 kV et un grossissement de 1202x.

Les résultats de l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) de l'échantillon de minerai de fer à faible teneur sont illustrés dans la figure III.2. Différentes phases sont distinguées en fonction de leur densité : les phases de haute densité apparaissent plus claires. Certains minéraux apparaissent sombres, tandis que d'autres sont blancs ou gris. Les cristaux minéraux varient en taille, en forme et en orientation. D'après la composition minéralogique de l'échantillon et les densités correspondantes, on constate que les minéraux ferrières (hématite et goethite) sont plus brillants sur les images MEB. La présence de quartz, d'un gris foncé à noir, est également notée comme composé dominant associé aux oxydes de fer, ainsi que celle de calcite, également grise.

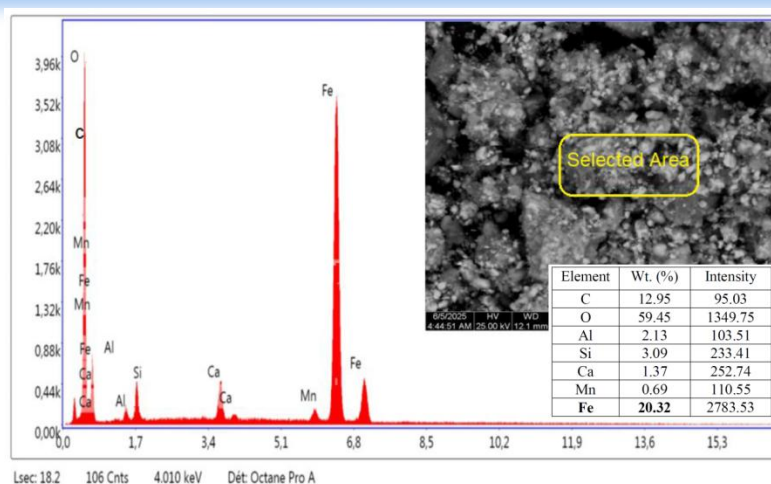


Figure IV.3 : Analyse MEB-EDS du minerai de fer d'El-Ouenza (Hadjer A, 2025).

L'analyse EDS d'un échantillon de minerai de fer à faible teneur provenant de la mine d'El-Ouenza révèle un pic principal, composé essentiellement du fer (hématite et/ou goethite). En revanche, les autres éléments présents dans l'échantillon, tels que le calcium et le silicium, présentent des pics plus faibles, pouvant indiquer la présence de la calcite et du quartz respectivement. Ces résultats concordent avec l'analyse chimique du minerai de fer précédemment citée.

IV.2 Résultats de l'approche statistique

IV.2.1 Plan d'expériences pour les essais de lixiviation

Les résultats des expériences factorielles sont présentés dans le tableau IV.3.

Tableau III.3 : Résultats des essais (DOE)

N° de test	Paramètres opératoires			Reponses	
	Concentration (M)	Température (°C)	Granulométrie (mm)	Dissolution (%)	Rendement (%)
1	4	25	0,31	82,15	98,46
2	2,5	60	0,31	83,41	98,65
3	4	95	0,31	85,81	98,53
4	4	60	0,063	89,42	98,28
5	2,5	95	0,063	82,13	94,85
6	1	60	0,063	80,81	93,26
7	2,5	25	0,5	76,18	90,38
8	2,5	25	0,063	82,44	95,91
9	1	60	0,5	74,23	95,15
10	4	60	0,5	81,74	95,54
11	2,5	95	0,5	81,72	94,70
12	1	25	0,31	77,58	95,48
13	1	95	0,31	81,95	96,11

D'après le tableau III.3, la dissolution du fer la plus élevée est remarquée dans le test 4 (89,42 %) dont la concentration est de 4M, la température est de 60°C, et une granulométrie de 0,063mm. Un rendement élevé a été observé dans le test n° 2 avec une concentration de 2,5M, une température de 60°C, et une granulométrie de 0,31mm.

IV.2.2 ANOVA

L'ANOVA est l'abréviation d'analyse des variances (Analyse of Variances). Développée par le statisticien britannique Sir Ronald Aylmer Fisher au début du XXe siècle, l'ANOVA combine différents modèles statistiques, dont le test F (test de Fisher) et la p-valeur. La méthode ANOVA est utilisée pour étudier la relation entre une variable quantitative et une ou deux variables qualitatives (Anaïs Annereau, 2023).

Le tableau ANOVA est le résultat final d'une série de calculs complexes. Il présente trois types de données numériques exploitables :

- Les degrés de liberté noté df.
- Le résultat, noté F.
- La significativité, notée p.

La p-valeur est obtenue à partir des **df** et du test **F** ; elle correspond au rapport de variance qui confirme ou infirme l'hypothèse testée. Si la valeur P est inférieure à $\alpha=0,05$ (seuil de signification qui est le même dans notre cas), c'est-à-dire que les variables qualitatives (facteurs variables) ont un effet significatif sur la variable quantitative (réponses), (Anaïs Annereau, 2023).

Un diagramme de Pareto présente généralement les valeurs absolues des effets normalisés (standardisés), classés par ordre décroissant. Il comporte également une ligne de référence indiquant les effets statistiquement significatifs. Cette ligne de référence dépend du seuil de signification (noté α) (Minitab-19). Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été utilisée pour estimer la significativité du modèle ($p < 0,05$) (Nayak et Pal 2011, Ahmad et al. 2019b, Patel et al. 2017).

IV.2.2.1 ANOVA pour la dissolution du fer

Le tableau IV.4 représente les résultats de l'analyse de variance (**ANOVA**) concernant la dissolution de Fer en fonction des trois facteurs expérimentales et leurs interactions (AB, AC et BC). Les valeurs de F et p sont les valeurs les plus importantes.

- **F-value**

CHAPITRE IV RESULTATS & INTERPRETATIONS

Dans une régression linéaire, le F-value teste si le modèle global explique significativement la variable dépendante.

- F élevé + p faible : explique que le modèle est significatif.
- F faible : le modèle n'explique pas bien.

Le F est calculé par la formule suivante :

F = Carré moyen entre groupes / Carré moyen à l'intérieur des groupes (erreur)

Chaque carré moyen se calcule comme suit :

Carré moyen entre groupes = Somme des carrés (Sum of Squares) / Degré de liberté (df) [1].

- *p-value*

Dans un test statistique, la **valeur-p** (p-value : probability value), est la probabilité pour un modèle statistique donné sous l'hypothèse nulle d'obtenir une valeur au moins aussi extrême que celle observée.

L'usage de la valeur-p est courant dans de nombreux domaines de recherche comme la physique, la psychologie, l'économie et les sciences de la vie.

La valeur-p est utilisée pour quantifier la significativité statistique d'un résultat dans le cadre d'une hypothèse nulle. L'idée générale est de déterminer si l'hypothèse nulle est ou n'est pas vérifiée car dans le cas où elle le serait, le résultat observé serait fortement improbable. Il s'agit à ce titre d'une extension du principe de preuve par l'absurde. [2]

La procédure généralement employée consiste à comparer la valeur-p à un seuil préalablement défini (traditionnellement 5 %). Si la valeur-p est inférieure à ce seuil, on rejette l'hypothèse nulle en faveur de l'hypothèse alternative et le résultat du test est déclaré « statistiquement significatif » (Larry Wasserman, 2004).

L'interprétation de cette valeur peut être résumée comme suit (Larry Wasserman, 2004):

Si:

- p-value >0,05 : non significatif
- p-value <0,05 : significatif
- p-value <0,01 : très significatif
- p-value <0,001 : hautement significatif

Le but principal de cette analyse est d'identifier l'influence des facteurs expérimentaux sur la réponse étudiée (dissolution).

Tableau IV.4: ANOVA pour la dissolution du fer en fonction des trois facteurs

Source	Sum of Squares	df	Mean of Squares	F-value	p-value	Effect
Modèle	161,06	6	26,84	7,03	0,0159	Significatif
A-Concentration	75,34	1	75,34	19,74	0,0044	Très Significatif
B-Température	21,98	1	21,98	5,76	0,0533	Significatif
C-Granulométrie	54,76	1	54,76	14,35	0,0091	Très Significatif
AB	0,1260	1	0,1260	0,0330	0,8618	Pas significatif
AC	0,3025	1	0,3025	0,0793	0,7878	Pas significatif
BC	8,56	1	8,56	2,24	0,1850	Pas significatif
Résiduel	22,90	6	3,82			
Total	183,96	12				

La valeur **F** du modèle (7,03) est élevée indique que le modèle est significatif. Les valeurs **p** inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A et C sont des termes significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs. Si le modèle comporte de nombreux termes non significatifs (sans compter ceux nécessaires au maintien de la hiérarchie), une réduction de modèle peut l'améliorer.

Ce modèle avec un **F** de 7,03 et un **p** de 0,016 ($p < 0,05$) : significatif) est globalement significatif, ce qui signifie que les variables étudiées expliquent correctement les variations de la réponse expérimentale.

- Effets des facteurs (paramètres opératoires) sur la dissolution

Ce modèle présente une somme des carrés de 75,34, un **F** de 19,74 et un **p** de 0,0044, ce qui explique que la concentration a un effet très significatif sur la dissolution du fer. Donc la variation de la concentration en acide sulfurique influence fortement le procédé de lixiviation du fer. La valeur élevée du **F** représente que la contribution de la concentration en acide est largement supérieure à l'erreur expérimentale.

En ce qui concerne la température, le modèle présente une somme des carrés de 21,98, un **F** de 5,76 et un **p** de 0,0533 (légèrement $> 0,05$), donc ce facteur a un effet faiblement significatif.

L'effet de la granulométrie avec une somme des carrés de 54,76, un **F** de 14,35 et un **p** de 0,0091 ($< 0,01$) est très significatif. Cela indique fortement que la granulométrie joue un rôle majeur dans la lixiviation du fer. Cependant une granulométrie fine augmente

CHAPITRE IV RESULTATS & INTERPRETATIONS

généralement la surface spécifique des particules ce qui favorise les échanges réactionnels entre l'agent de lixiviation et le fer, et par conséquent augmente également l'efficacité du traitement.

En conclusion l'ANOVA de la dissolution du fer présente un modèle statistiquement valide. La concentration et la granulométrie ont effets fort et significatif sur la dissolution du fer, tandis que la température a un effet secondaire. Les interactions entre les facteurs sont négligeables.

IV.2.2.2 ANOVA pour le rendement du fer

Le tableau IV.4 représente les résultats de l'analyse de variance (**ANOVA**) concernant le rendement de Fer en fonction des trois facteurs expérimentales et leurs interactions (AB, AC et BC).

Le but principal de cette analyse est d'identifier l'influence des facteurs expérimentaux sur la réponse étudiée (rendement).

Tableau IV.4: ANOVA pour le rendement du fer en fonction des trois facteurs

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	Effect
Modèle	28,32	6	4,72	5,58	0,0276	Significatif
A-Concentration	6,14	1	6,14	7,26	0,0358	Significatif
B-Temperature	2,83	1	2,83	3,35	0,1170	Pas significatif
C-grain size	7,09	1	7,09	8,38	0,0275	Significatif
AB	6,86	1	6,86	8,12	0,0292	Significatif
AC	5,36	1	5,36	6,34	0,0455	signifiant
BC	0,0361	1	0,0361	0,0427	0,8432	Pas significatif
Résiduel	5,07	6	0,8458			
Total	33,40	12				

La valeur F du modèle (5,58) indique que le modèle est significatif. Les valeurs p inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, C, AB et AC sont des termes significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

- Effets des facteurs (paramètres opératoires) sur le rendement

D'après le tableau IV.4, la concentration en acide sulfurique a une influence significative sur le rendement de la lixiviation du fer. Les valeurs du $F=7,26$ et $p=0,036$, indique que son effet est réel, mais il est moins que dans le tableau IV.3.

En ce qui concerne la température, le modèle présente un F de 3,35 et un p de 0,12, cela indique que la température un effet non significative sur le rendement de la lixiviation, tandis que pour la granulométrie, le modèle indique un F de 8,38 et un p de 0,027, ce qui signifie que la granulométrie a une influence très significative sur le rendement de la lixiviation.

Pour les interactions, ($F=8,12$ et $p=0,029$) il est évident de constater qu'il existe une interaction entre la concentration (A) et la température (B). Cela indique que la concentration dépend de la température ou inversement, donc les 2 facteurs ne peuvent pas être étudiés séparément en ce qui concerne l'influence significative sur le rendement de la lixiviation.

Le modèle présente un $F=6,34$ et un $p=0,045$, cela indique qu'il existe une interaction significative entre les 2 facteurs opératoires (la concentration (A) et la granulométrie (C)),

La valeur de $p=0,84$, indique que l'interaction entre la température (B) et la granulométrie (C) est nulle.

IV.2.3 Réponses observées et prédites du Fer (dissolution et rendement)

Les graphiques des figures IV.4 A et B des valeurs prédites (calculées) et actuelles (expérimentales) de la dissolution et du rendement complètent généralement les tableaux précédents de l'analyse ANOVA ; ils permettent de vérifier la qualité d'ajustement du modèle entre les actuelles et celles calculées par le modèle.

La courbe des valeurs prédites (droite diagonale de 45°) représente la courbe de régression. Plus les points sont proches de cette courbe, plus l'ajustement du modèle est meilleur et l'erreur est faible

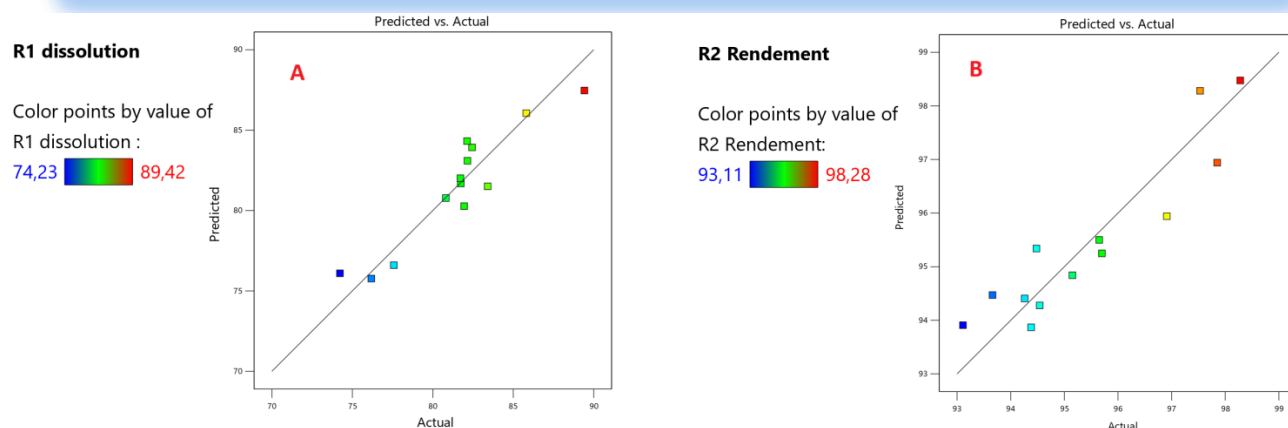


Figure IV.4 : Courbes de régression des valeurs prédites et actuelles de la lixiviation du fer: A) la dissolution, B) le rendement.

Dans la figure IV.4, A ; il est noté que le nuage des points suit généralement la diagonale (pas de points éloignés), cela indique que les valeurs prédites sont proches des valeurs expérimentales, ainsi que le modèle décrit correctement la dissolution du fer dans le procédé de lixiviation, donc le modèle est considéré comme fiable et stable.

Dans la figure IV.4, B ; il est noté que des points suivent également la courbe (mais la dispersion est moins que dans la figure IV.4, A), cela indique que un bon ajustement, une bonne précision et un excellent pouvoir prédictif

Les valeurs prédites sont proches des valeurs expérimentales, ainsi que le modèle décrit correctement la dissolution du fer dans le procédé de lixiviation, donc le modèle est considéré comme fiable et stable. La variation des rendements (93,11 à 98,28%) représente une plage plus resserrée, ce qui signifie que le rendement reste élevé dans tous les essais de lixiviation.

IV.3 Effet des paramètres opératoire sur la dissolution

La figure IV.5 représente les cartes des contours (réponse surfaces contour plots) de la dissolution du fer dans le procédé de lixiviation en montrant l'influence combinée des facteurs (paramètres opératoires) sur la dissolution du fer. Elles permettent l'identification des zones favorables et présenter les interactions entre les facteurs (concentration en acide, température et granulométrie).

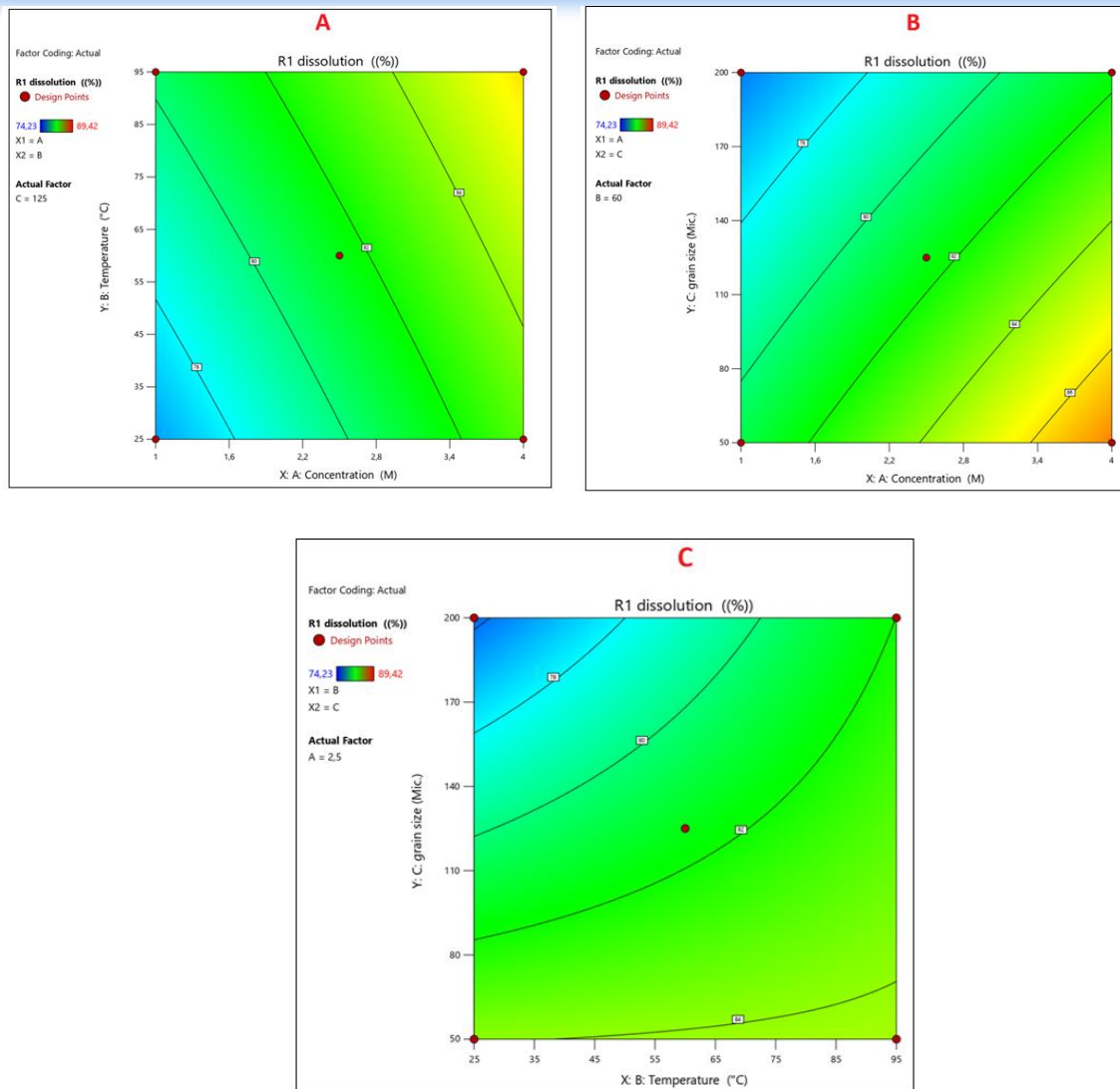


Figure IV.5 : Cartes des contours (Response Surfaces Contour plots) de la dissolution du fer.

- Effet de la concentration et de la température

La figure IV. 4 (A) ; représente effet simultané de la concentration et de la température sur la dissolution du fer a une granulométrie fixée par le modèle de 125 μ m. il est bien évident que lorsque la concentration en acide passe de 1 à 4M, donc ; l'accélération de l'attaque des phases minérales ce qui favorise la dissolution du fer. Dans ce contour, la concentration est le facteur dominant. On constate que lorsque la température augmente, la cinétique de la lixiviation devient rapide, cela aussi augmente la dissolution progressivement.

- Effet de la concentration et de la granulométrie

La figure IV. 4 (B) ; présente que lorsque la concentration augmente et la granulométrie diminue ; la dissolution augmente, puisque les particules fines présente une surface spécifique élevée et un meilleur contact solide/liquide, ce qui favorise généralement une réactivité entre acide et particules du fer.

L'interaction entre ces deux paramètres est non significative, cela indique qu'ils sont indépendants (comme il est indiqué dans l'analyse du tableau ANOVA)

- *Effet de la température de la granulométrie*

Dans la figure IV.4 (C) ; on remarque que lorsque la température augmente et la granulométrie diminue, la dissolution augmente. L'effet de la granulométrie est plus visible que celui de la température.

IV.4 Effet des paramètres opératoire sur le rendement

La figure IV.6 représente les cartes des contours (réponse surfaces contour plots) du rendement du fer dans le procédé de lixiviation en montrant l'influence combinée des facteurs (paramètres opératoires) sur le rendement du fer. Elles permettent l'identification des zones favorables et présenter les interactions entre les facteurs. Les couleurs bleu et vert correspondent aux valeurs du rendement les plus faibles, par contre les couleurs jaune, orange et rouge indiquent les rendements les plus élevés.

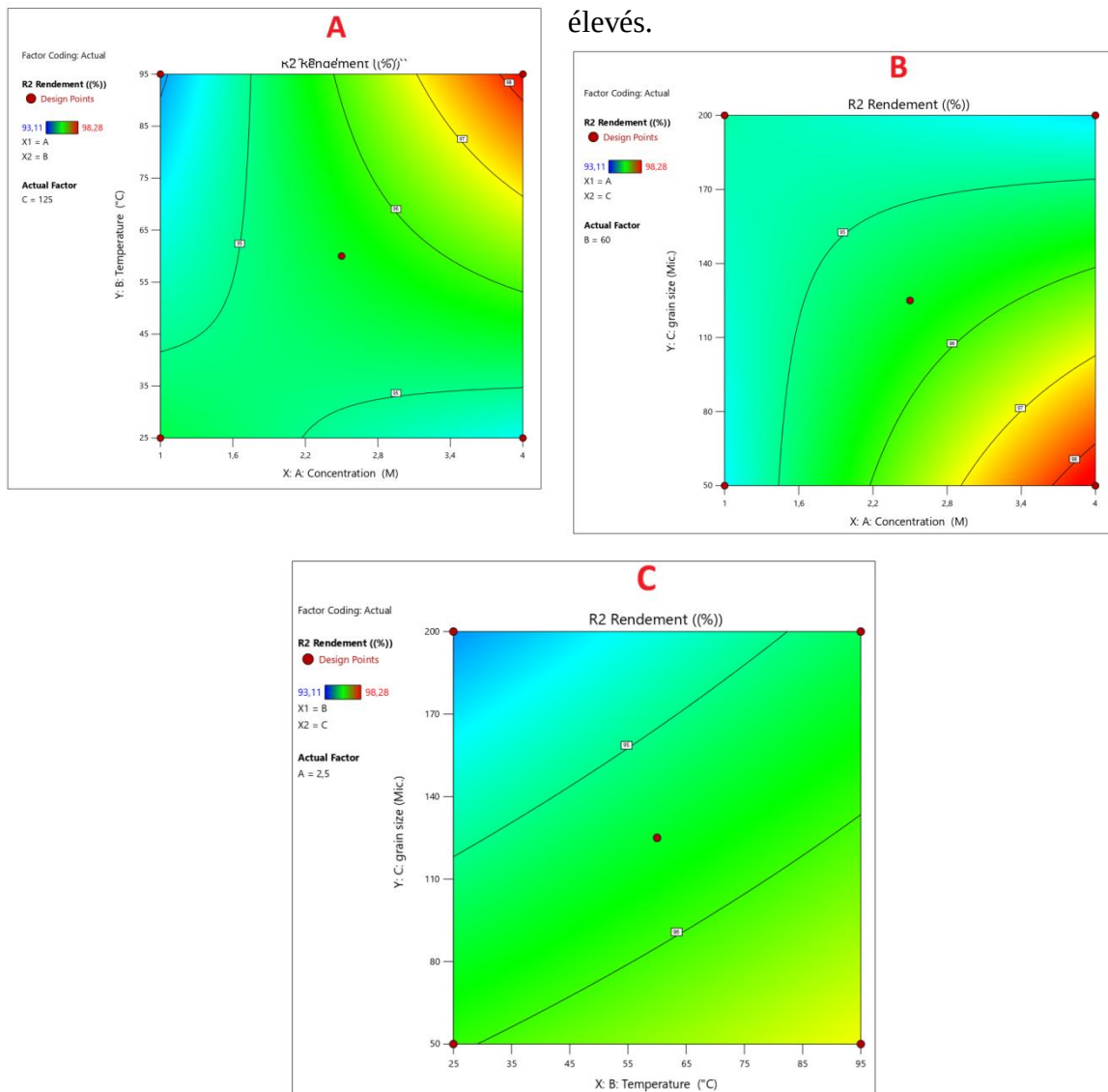


Figure IV.6 : Cartes des contours (Response Surfaces Contour plots) du rendement du fer.

- Effet de la concentration et de la température

La figure IV.6 (A) montre que le rendement augmente avec l'augmentation simultanée de la température et de la concentration en acide. Cette dernière entraîne une amélioration progressive du rendement.

L'influence de la température est bien remarquable lorsque la concentration en acide augmente. L'angle supérieur droit (zone rouge), présente une forte concentration en acide et une température élevée, où les valeurs optimales atteignent leur maximum. Cela indique un effet synergique positif et significatif entre la concentration et la température. La combinaison des 2 facteurs accélère les mécanismes responsables de l'amélioration du rendement de lixiviation du fer.

- Effet de la concentration et de la granulométrie

La figure IV. 6 (B) ; présente une influence plus marquée des 2 paramètres sur le rendement de la lixiviation du fer. Une augmentation de la concentration favorise l'augmentation de l'agent actif du H_2SO_4 . Une granulométrie fine favorise l'augmentation de la valeur de la surface spécifique, alors les réactions entre les particules deviennent faciles. Les meilleures valeurs du rendement de la lixiviation sont obtenues avec une augmentation de la concentration en acide et une diminution de la granulométrie.

- Effet de la température et de la granulométrie

La figure IV. 6 (C) ; présente l'influence de la température et de la granulométrie plus sur le rendement de la lixiviation du fer.

Les lignes de la courbe sont quasi parallèles (isolignes), cela signifie que chaque variable agit d'une manière indépendante et que la granulométrie a un effet remarquable, ainsi qu'une interaction entre la température et la granulométrie limitée. La température améliore le rendement mais avec un effet plus modéré. Une température élevée améliore légèrement le rendement de la lixiviation du fer, tandis que l'augmentation des dimensions des particules entraîne aussi sa diminution.

IV. 5 Optimisation de paramètres opératoires

La figure IV.7 présente le module d'optimisation numérique par désirabilité (en anglais ; desirability ramp). Elle indique directement les conditions optimales des paramètres opératoires donnant le meilleur compromis pour atteindre les réponses cibles (la dissolution et le rendement).

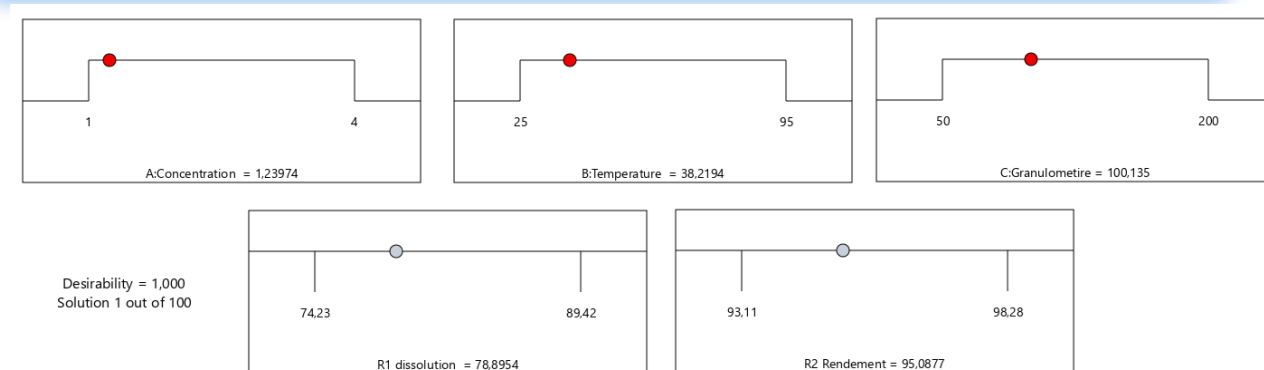


Figure IV.7 : Module d'optimisation numérique par désirabilité du procédé de lixiviation

Cette figure montre les résultats de l'optimisation numérique de lixiviation, abstenus à partir du modèle de surface de réponse, dont le but de déterminer les conditions expérimentales qui permettent de donner les valeurs maximales des réponses étudiées (dissolution et rendement).

Les points rouges représentent les valeurs optimales des paramètres opératoires, tandis que les points gris montrent les réponses prédites par le modèle numérique.

IV.6.1 Condition expérimentales optimales

Les valeurs expérimentales calculées par le modèle sont illustrées dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Valeurs paramètres opératoires optimaux calculés par le modèle.

Facteur	Symbole	Valeur optimale
Concentration en acide	A	1,24M
Température	B	38,22 °C
Granulométrie	C	100,14µm

- **Concentration**

La valeur optimale de la concentration (1,24M) se situe dans la partie basse du domaine expérimentale (1-4M). Cela indique que cette valeur est suffisante pour réaliser et assurer l'efficacité de la lixiviation du fer pauvre et une augmentation de la quantité d'acide sulfurique n'apporte pas de gain significatif pour la dissolution et le rendement.

De point de vue économique, cette valeur permette de limiter la consommation de l'acide sulfurique, de réduire les coûts et d'améliorer la faisabilité industrielle.

- **Température**

La température à 38,22 °C est la valeur optimale calculée par le modèle pour maximiser la dissolution et le rendement de la lixiviation. Cette valeur indique que la lixiviation reste efficace sans un chauffage élevé, la cinétique est satisfaisante ainsi que la consommation

énergétique reste limitée. Cette valeur de température présente est un avantage technico-économique important.

- *Granulométrie*

La valeur de la granulométrie calculée par le modèle est de 100,14 μ m. A partir de cette valeur moyenne, il est possible de déduire que la surface spécifique est suffisante pour favoriser les réactions entre l'acide et les particules de fer pauvre, une bonne circulation du liquide entre les particules du fer, d'éviter un compactage et/ou une agglomération des particules du fer qui, généralement observée avec les particules très fines.

La granulométrie peut être considérée comme un paramètre important pour la stabilité du procédé de lixiviation.

IV.6.2 Réponses optimales prédites

Sous les conditions expérimentales (tableau IV.5), le modèle prédit les valeurs des réponses suivantes :

Tableau IV.6 : Valeurs des réponses prédites

Réponse	Symbole	Valeur prédite
Dissolution	R1	78,90
Rendement	R2	95,09

- *(R1)*

La valeur prédite de la dissolution est de 78,90%, cette valeur se situe entre l'intervalle du domaine expérimental de 74,23 à 89,42%, et indique que les conditions choisies permettent une dissolution efficace du fer.

- *Rendement (R2)*

La valeur prédite de la dissolution est de 95,09% (valeur élevée), cette dernière se traduit : une excellente récupération du fer, une bonne stabilité du procédé de lixiviation du fer.

- *Désirabilité globale*

La désirabilité globale (composite) (D) évalue dans quelle mesure les paramètres optimisent un ensemble de réponses globalement. La désirabilité est comprise entre zéro et un. Un représente le cas idéal; zéro indique qu'une ou plusieurs réponses se situent en dehors des limites acceptables [3].

La figure IV.7 indique une désirabilité globale (D=1), cette valeur est maximale, cela signifie que les objectifs fixés pour toutes les réponses (dissolution et rendement) sont

CHAPITRE IV RESULTATS & INTERPRETATIONS

entièrement satisfaits, la combinaison proposée par le modèle est la meilleure parmi les solutions testées.

La motion (solution 1 out of 100) indique que parmi les 100 solutions testées, cette combinaison est la meilleure désirabilité proposée par le logiciel.

Conclusion

L'optimisation des paramètres influençant la lixiviation du fer pauvre a permis d'identifier les conditions expérimentales les plus favorables à l'amélioration du procédé. L'application de la méthodologie des surfaces de réponse, à travers le logiciel Design-Expert13, a permis d'évaluer l'influence des différents facteurs étudiés et de déterminer leur combinaison optimale en tenant compte simultanément du taux de dissolution et du rendement.

Les résultats obtenus montrent que les conditions optimales prédites par le modèle conduisent à une dissolution de **78,90 %** ainsi qu'à un rendement de **95,09 %**, ce qui traduit une récupération efficace du fer et une bonne stabilité du procédé de lixiviation. Par ailleurs, la valeur maximale de la désirabilité globale (**D = 1**) confirme que la combinaison retenue satisfait pleinement les objectifs fixés et représente la meilleure solution parmi l'ensemble des essais réalisés.

L'analyse des paramètres optimaux, notamment la température, la concentration de l'acide ainsi que la granulométrie, met en évidence leur rôle déterminant dans l'amélioration des performances de la lixiviation. Ces résultats démontrent également l'intérêt de l'approche statistique dans la compréhension et l'optimisation des procédés hydrométallurgiques.

En définitive, cette étude a permis de proposer des conditions optimales fiables pour la lixiviation du fer pauvre, tout en apportant une base scientifique et technique pouvant servir de référence pour des travaux futurs visant l'amélioration du traitement et de la valorisation des minerais de fer à plus grande échelle.

Références

Larry Wasserman, All of Statistics : A Concise Course in Statistical Inference, New York, [Springer-Verlag](#), 15 septembre 2004, 461 p. [ISBN 978-0-387-40272-7](#), [DOI 10.1007/978-0-387-21736-9](#), définition 10.11.

Hadjer A, 2025, Characterization and Optimization of Iron Ore Beneficiation Parameters: El-Ouenza Mine Case, Mémoire de master, université de Tébessa

Jones, L. H. P.; et al. (1956). "Birnessite, a new manganese oxide mineral from Aberdeenshire, Scotland". *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*. **31** (235): 283–288. Bibcode:1956MinM...31..283J. <https://doi.org/10.1180/minmag.1956.031.235.01>

Anaïs Annereau, 2023, <https://blog.hubspot.fr/marketing/anova-test>

Nayak, A.K. and Pal, D., 2011. Development of pH-sensitive tamarind seed polysaccharide-alginate composite beads for controlled diclofenac sodium delivery using response surface methodology. *International journal of biological macromolecules*, 49 (4), 784–793.

Ahmad, N., et al., 2019b. Preparation of a novel curcumin nanoemulsion by ultrasonication and its comparative effects in wound healing and the treatment of inflammation. *RSC advances*, 9 (35), 20192–20206.

Patel, G.M., Shelat, P.K., and Lalwani, A.N., 2017. QbD based development of proliposome of lopinavir for improved oral bioavailability. *European journal of pharmaceutical sciences: official journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences*, 108, 50–61

Siteweb

[1] <https://blog.minitab.com/fr/blog/comprendre-lanalyse-de-la-variance-anova-et-le-test-f>

[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Valeur_p

[3] <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/using-fitted-models/supporting-topics/response-optimization/what-are-individual-desirability-and-composite-desirability/>

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de cette étude consacrée à la valorisation du minerai de fer pauvre du gisement d'El-Ouenza par lixiviation, il ressort que cette méthode constitue une voie de traitement intéressante pour améliorer la qualité des minerais à faible teneur et favoriser leur valorisation industrielle.

L'étude bibliographique et l'analyse du contexte géologique ont permis de mieux comprendre les caractéristiques du minerai ainsi que les facteurs influençant son comportement au cours du traitement. Les travaux expérimentaux réalisés, depuis la préparation des échantillons jusqu'aux essais de lixiviation, ont mis en évidence l'efficacité de cette technique dans le traitement de minerai traité.

La phase expérimentale a constitué l'élément central de cette étude. Après le prélèvement des échantillons représentatifs dans la zone étudiée, ceux-ci ont été soumis à une préparation en laboratoire comprenant les opérations de concassage, de broyage et de caractérisation. Ces étapes ont permis d'obtenir des échantillons adaptés aux essais et d'identifier les principales propriétés physiques et minéralogiques du minerai traité.

Les essais de lixiviation réalisés ont permis d'évaluer le comportement du minerai vis-à-vis de l'agent lixiviant (H_2SO_4) utilisé et de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires sur l'efficacité du traitement. L'évolution observée au cours des essais confirme que le rendement du procédé dépend fortement des conditions expérimentales mises en œuvre, notamment la granulométrie, la concentration en acide.

Les résultats obtenus montrent que les conditions optimales définies par le modèle permettent d'atteindre une dissolution de 78,90 % et un rendement de 95,09 %, confirmant l'efficacité du procédé de lixiviation. La valeur maximale de la désirabilité globale ($D = 1$) valide également cette combinaison comme la meilleure parmi l'ensemble des essais réalisés.

En définitive, ce travail constitue une contribution à l'étude de la valorisation du minerai de fer d'El-Ouenza et confirme l'intérêt de la lixiviation comme méthode de traitement dans une perspective d'optimisation des ressources minières nationales. Les résultats obtenus renforcent l'intérêt scientifique et industriel porté à ce gisement et ouvrent la voie à des approches de valorisation plus adaptées aux exigences actuelles du secteur minier en Algérie.

ANNEXES

Annexe 1

Design-Expert 13

File Edit View Display Options Design Tools Help

Change View Round Columns Augment Design Hide/Show Columns

Navigation Pane

Design (Actual)

Information

Notes

Summary

Graph Columns

Evaluation

Constraints

Analysis [+]

R1 dissolution (Analyzed)

R2 Rendement (Analyzed)

Optimization

Numerical

Graphical

Design Properties

Run 1

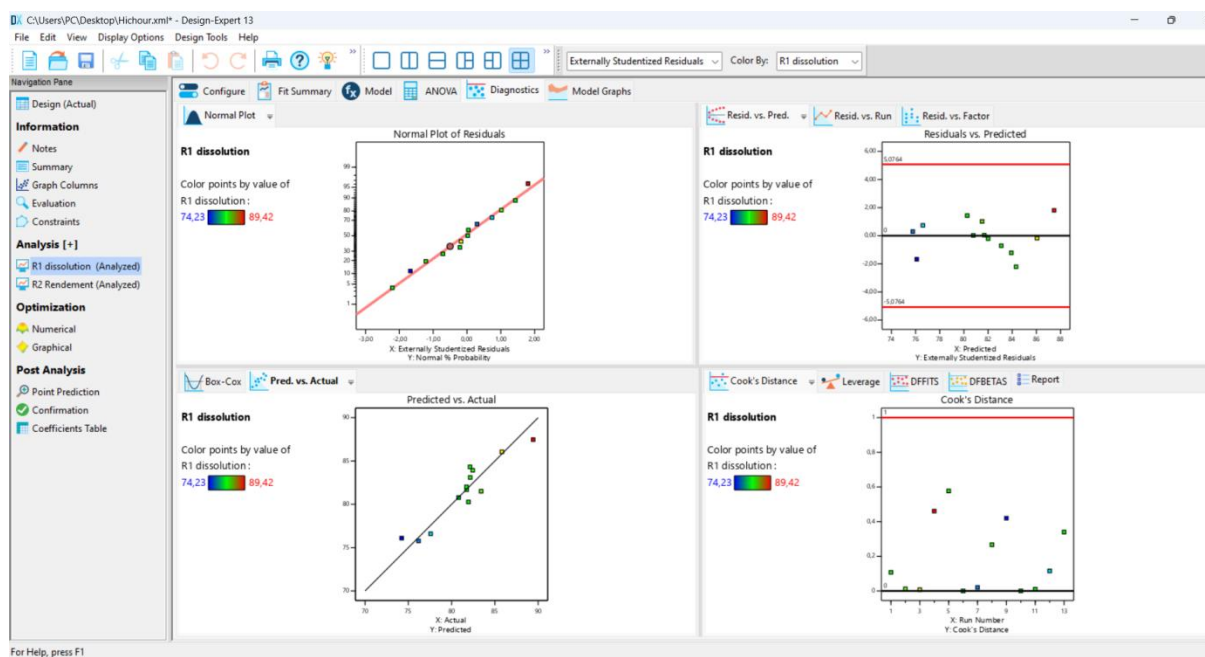
Comment

Row Status Normal

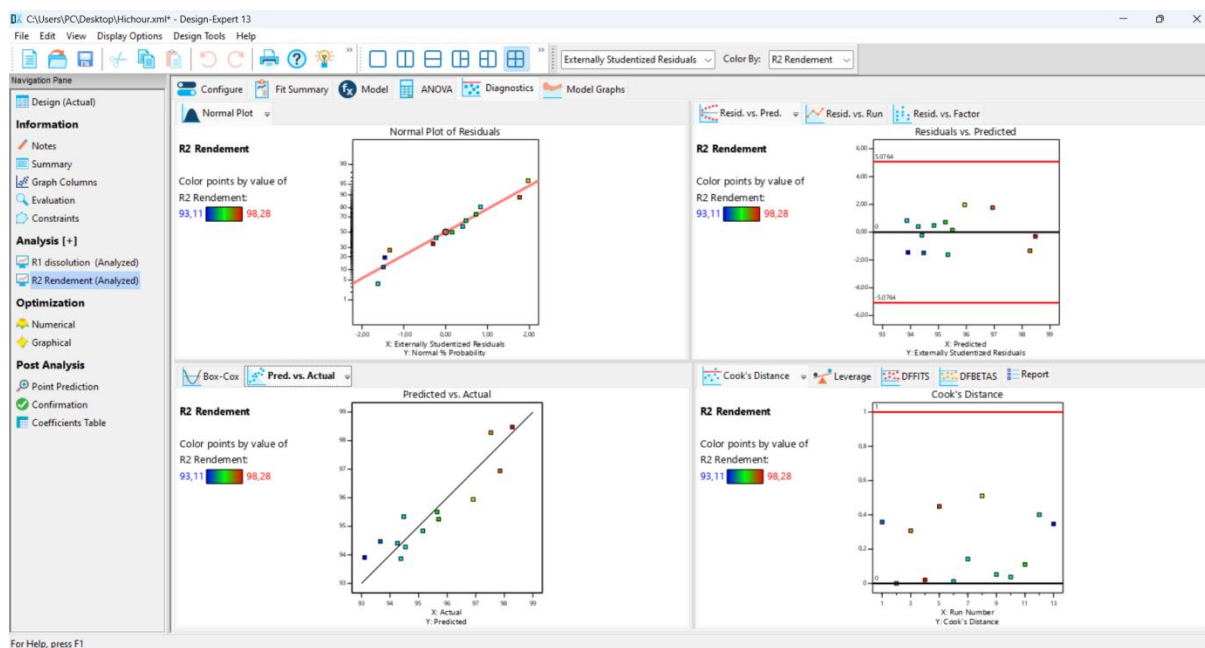
Std	Run	Factor 1 A:Concentration M	Factor 2 B:Temperature °C	Factor 3 C:grain size Mic.	Response 1 R1 dissolution (%)	Response 2 R2 Rendement (%)
2	1	4	25	125	82,15	98,46
13	2	2,5	60	125	83,41	98,65
4	3	4	95	125	85,81	98,53
6	4	4	60	50	89,42	98,28
10	5	2,5	95	50	82,13	94,85
5	6	1	60	50	80,81	93,26
11	7	2,5	25	200	76,18	90,38
9	8	2,5	25	50	82,44	95,91
7	9	1	60	200	74,23	95,15
8	10	4	60	200	81,74	95,54
12	11	2,5	95	200	81,72	94,7
1	12	1	25	125	77,58	95,48
3	13	1	95	125	81,95	96,11

For Help, press F1

Annexe 2



Annexe 3



Annexe 4

