

République Algérienne populaire et démocratique
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Minier

Mémoire de Master en Génie Minier

**ETUDE DE L'ENRICHISSEMENT DU MINERAI DE FER PAR
CLASSIFICATION GRAVIMETRIQUE ET SEPARATION PAR
FLOTTATION**

Cas du Gisement de Gara Djebilet

Présenté par :

Mr. BATOU Mohammed.

Devant le jury :

Dr. BOUTRIA .s

Président

Dr. AKKAL .r

Examineur

Mr. OULD HAMOU .m

Rapporteur

Mme. MERCHICHI .a

Rapporteuse

Promotion juin 2015.

Dédicaces

Je dédie ce travail Aux prunelles de mes yeux, ceux qui m'ont soutenu jour et nuit pour qu'ils me voient toujours au sommet, A vous mes chers parents.

A mes frères Sofiane, Riadh et Billel et à mes sœurs Yakout, Omayma et Rawane.

A mes adorés : Mossaab et Sohaib et à toute la famille BATOU.

A Amel et tous les amis que j'ai eu la chance d'avoir : Sofiane, Ammar, Nacer, Missi, Wissam, surtout à toi « binomati » Namira.

A mon ami préféré Abdellah, A tous mes amis de la cité BOURAOUI et Taza

A tous ceux que j'aime et je respecte

Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier le Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et la foi et de m'avoir permis d'arriver à ce stade là, Au terme de ce travail, je tiens à remercier chaleureusement Monsieur **OULD HAMOU Malek** et **Mme MERCHICHI .a** qui ont assuré ma direction scientifique pour la qualité de leur encadrement, Je les remercie pour leurs nombreux conseils et leur disponibilité et leur soutien sans faille tout au long de ce travail, qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude. J'adresse mes vifs remerciements au docteur **Mme BOUTRIA**, pour le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. J'exprime également mes remerciements au docteur : **AKKAL .r** Pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir acceptés de faire partie du jury. Je tiens à remercier tous les enseignants du département Génie Minier de L'école nationale Polytechnique d'Alger. Je tiens à remercier mes camarades d'étude de la promotion en particulier.*

Résumé :

Le but derrière ce travail est d'essayer de trouver une méthode efficace pour valoriser le minerai de Fer de Gara Djebilet. Ce minerai contient des inclusions nocives comme la silice la magnésie le phosphate l'alumine, Sur l'ensemble du gisement, les teneurs moyennes sont les suivantes :

$Fe_2O_3 = 79,4\%$ ($Fe = 55,6\%$), $SiO_2 = 6,2\%$, $Al_2O_3 = 6,4\%$ $P_2O_5 = 1,38\%$

Pour ce faire on a opté à une séparation par gravimétrie avec une table à secousses suivie d'une séparation par flottation. Bien sûr avant d'entamer ces procédés, nous avons procédé à une préparation mécanique de notre minerai.

Mots clés :

Hématite, Gara Djebilet, , flottation, enrichissement, table à secousse.

ملخص:

الهدف من وراء هذا العمل هو محاولة إيجاد طريقة لمعالجة خام الحديد المستخرج من غار جبيلات. هذا

الخام يحتوي على شوائب ضارة مثل السيليس، المغنيزيوم، الفوسفات، على مجمل المنجم النسب المتوسطة هي كالآتي:

$Fe_2O_3 = 79,4\%$ ($Fe = 55,6\%$), $SiO_2 = 6,2\%$, $Al_2O_3 = 6,4\%$ $P_2O_5 = 1,38\%$

من أجل هذا قررنا استخدام الفصل الجاذبي باستعمال الطاولة الهزازة متبوع بطريقة الفصل بالتعويم، وقبل هذا بدأنا بالتحضير الميكانيكي للخام.

الكلمات المفتاحية:

الهيماتيت، غار جبيلات، التعويم، إثراء، الطاولة الهزازة.

Abstract:

The main behind this work is to try to find an effective method to enhance Gara Djebilet iron ore. This ore contains harmful inclusions such as silica magnesia alumina phosphate, Across the field, average grades are:

$Fe_2O_3 = 79.4\%$ ($= 55.6\% Fe$) = $6.2\% SiO_2$, $Al_2O_3 = 6.4\%$ = $1.38\% P_2O_5$

To do so we opted to separation by gravimetry with a shaker table followed by a flotation separation. Of course before starting these processes, we conducted a mechanical preparation of our ore.

Keywords:

Hematite, Gara Djebilet, flotation, enrichment, shaking table.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Notes techniques sur le minerai de Fer de Gara Djebilet.....	2
I.1. Composition du minerai de fer :.....	3
I.2. Identification des gisements :	4
I.2. 1. Localisation :.....	4
I.2.2. Réserves.....	4
I.2.3. Caractéristiques du minerai	4
I.3. Etudes de mise en valeur	5
I.3.1. Etudes d'exploitation et de transport.....	5
I.4. Infrastructures liées à la valorisation de ces gisements.....	5
I.4.1. Présence de ressources aquifères	6
I.4.2. Présence de gisements de gaz naturel.....	6
Chapitre II : Généralités sur les méthodes de séparation.....	7
II.1. Concentration gravimétrique.....	8
II.1.1. Méthodes en milieux denses	8
II.1.2. Méthodes par jig (accélération différentielle)	9
II.1.3. Mécanisme par nappe pelliculaire fluente.....	10
II.2. Concentration par la flottation.....	10
II.2.3. Réactifs de flottation	12
II.2.4. Paramètres influençant l'opération de flottation	13
Chapitre III : Partie Expérimentale.....	14
III.1. INTRODUCTION	15
III.2. CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET CHIMIQUE	15
III.2. 1. INTRODUCTION	15
III.2.2. PREPARATION MECANIQUE.....	15

III.2.3. Opération de quartage et homogénéisation	17
III.2.4. ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	18
III.2.4.1. But de l'essai.....	18
III.2.4.2. Principe de l'essai.....	18
III.2.4.3. Dimension de tamis utilisés	19
III.2.4.4. Résultats et interprétation	19
III.3. ESSAIS DE SEPARATION PAR GRAVIMETRIE	20
III.3.1. INTRODUCTION.....	20
III.3.4. Mécanisme de séparation	21
III.5. L'essai de Séparation.....	22
III.6. Résultats et discussions :	22
III.4. FLOTTATION	24
III.4.1. Le broyage	24
III.4.2. Les réactifs de flottation.....	25
III.4.3. Mode opératoire	26
III.4.4. Résultats et interprétations	27
Conclusions et Recommandations.....	31
Références bibliographiques :	33

Liste des figures :

Figure II. 1 : Principe de séparation par milieux denses.....	11
Figure II. 2 : séparation par nappe pelliculaire fluente	12
Figure II.3 : Fixation des particules à la surface hydrophobe aux bulles d'air	13
Figure II.4 : Principe de fonctionnement d'une cellule de flottation	14
Figure III.1 : concasseur à percussion	19
Figure III.2 : Broyeur à boulets	20
Figure III.3 : les différentes étapes de quartage.....	20
Figure III.4 : Tamiseuse.....	22
Figure III.5 : courbe granulométrique.....	23
Figure III.6 : Table à secousses.....	25
Figure III.7 : Rendement poids pour les différentes classes après séparation gravimétrique	27
Figure III.8 : séparation par table à secousse (tranche 0,800 – 0,630 mm)	27
Figure III.9 : séparation par table à secousse (tranche 0,630 – 0,400 mm).....	28
Figure III.10 : Broyeur à billes de type Retsch PM-100.....	29
Figure III.11 : Cellule de flottation.....	30
Figure III.12 : Mousse récupérée après l'essai de flottation.....	30
Figure III.13 : Différence de couleur obtenue par flottation pour la classe granulométrique (-160+80 μm)	34
Figure III.14 : Différence de couleur obtenue par flottation pour la classe granulométrique (-80 μm)	35
Figure III.15 : couleur de l'hématite pure	36

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau III.1 : Résultats de l'analyse granulométrique.....	23
Tableau III.2 : Résultats de la séparation gravimétrique.....	26
Tableau III.3 : Résultats de flottation (tranche +80 – 160 μm).....	32
Tableau III.4 : Résultats de flottation (tranche -80 μm).....	33

Introduction

Introduction

Pour l'industrie extractive, les techniques de traitement constituent un des principaux processus miniers. Surtout pour les gisements dont le minerai est a faible teneur en composant utile.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité, en vue d'exploiter un gisement prospecté et dont les réserves exploitables sont clairement établies, le cout de traitement doit être judicieusement évalué. Dans un projet minier, le cout total d'une tonne de minerai extraite et traitée est un paramètre économique selon lequel l'exploitabilité d'un gisement peut être effective ou annulée.

Dans le cas de la mine de Gara Djebilet, objet de cette étude, les réserves exploitables sont évaluées au environ 02 milliards de tonnes. Les caractéristiques du minerai de fer de la mine suscitée sont conformes pour une utilisation métallurgique. Néanmoins, le minerai de fer en question n'a pas fait l'objet d'études minéralurgiques détaillées. D'autre part, il y a lieu de noter que la teneur moyenne du minerai de fer du gisement de Gara Djebilet est estimée à 55,6 % en fer.

L'objectif de cette présente étude consiste à traiter le tout venant du minerai de fer de Gara Djebilet en utilisant une combinaison de deux méthodes de séparation : séparation gravimétrique suivie par la flottation pour enfin juger cette combinaison et déduire la meilleure maille de libération de notre minerai.

Pour cela on va suivre la chronologie suivant :

Chapitre I : sera consacré pour présenter quelques notes techniques sur le minerai de Fer de Gara Djebilet.

Chapitre II : ou nous allons aborder les méthodes physico-chimiques de séparation utilisées dans cette étude.

Chapitre II : nous allons détailler notre partie expérimentale. et enfin dévoiler les différentes conclusions concernant notre étude

Chapitre I :

Notes techniques sur le
minerai de Fer de Gara
Djebilet

Le bassin de Tindouf fait partie de la plate-forme saharienne. Il représente une puissante couverture sédimentaire d'âge Paléozoïque, reposant en discordance sur le socle, notamment le massif des Eglab vers le sud.

Les minéralisations de type oolithique sédimentaire, partiellement transformées en magnétite au contact de corps intrusifs, ont été découvertes dans les formations dévoniennes au début des années 1950. Depuis, elles ont fait l'objet de nombreux travaux de prospection, d'évaluation et d'essais pilotes.

Deux gros gisements de fer oolithique de taille mondiale, non encore exploités, sont encaissés dans les sédiments du Dévonien du bassin de Tindouf, en bordure nord de la dorsale Réguibat :

Le gisement de Gara Djebilet a été découvert en 1952. Les lentilles ferrifères, de type sédimentaire oolithique, sont encaissées dans les formations détritiques essentiellement gréseuses du Dévonien inférieur.

Elles correspondent à trois bassins de taille plurikilométrique (ouest, centre et est), dont la puissance peut dépasser 10 m et qui s'alignent suivant une direction stratigraphique SE-NO. Les couches sont sub-horizontales et régulières près de la surface, puis plongent assez fortement vers l'intérieur du bassin de Tindouf. La limite nord, en aval pendage, des lentilles ouest et centre n'est pas connue. D'autres lentilles oolithiques plus ou moins ferrugineuses sont localisées plus à l'est, mais n'ont pas fait l'objet de travaux de prospection (Gara Befraa, Mlehas Bou Bernous et Gour Jiffa).

I.1. Composition du minerai de fer :

Zone	Fe total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Centre	57,3	4,7	4,5	0,8
Ouest	58,3	4,9	4,1	0,8

Devant l'augmentation de la demande de minerai de fer et d'une croissance régulière depuis 1999 de la production d'acier dans le monde, et de son accélération de la consommation et de la demande mondiale à partir de 2003, le Ministère de l'Energie et des Mines et l'Agence

Nationale du Patrimoine Minier lancent un appel à manifestation d'intérêt pour le développement et la mise en valeur des gisements de fer de Gara Djebilet et Mechri Abdelaziz. Cette note permet de donner les informations globales et les éléments d'appréciation de base concernant ces deux gisements.

I.2. Identification des gisements :

I.2.1. Localisation :

Au sud ouest de l'Algérie, deux gisements de fer ont été identifiés dénommés Gara Djebilet et Mechri Abdelaziz.

Le gisement de Gara Djebilet est situé à 130 Km au Sud Est de la ville de Tindouf, près de la frontière algéro-mauritanienne, à 300 Km à vol d'oiseau de l'océan atlantique et à 1.600 Km au sud de la côte algérienne.

Le gisement de Mechri Abdelaziz est situé à 400 Km à l'Est de Tindouf et à quelque 250 Km du gisement de Gara Djebilet.

I.2.2. Réserves

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

Les réserves exploitables de Gara Djebilet sont de l'ordre de 1,7 milliards de tonnes à **57 %** de fer, localisées dans deux lentilles importantes : une lentille dite " ouest " avec 780 millions de tonnes et une lentille dite " centre " avec 900 millions de tonnes. Les réserves de Mechri Abdelaziz sont de l'ordre de 700 millions de tonnes de minerai pour une teneur moyenne de 52,45 % Fe.

Le gisement de Gara Djebilet a été reconnu par plus de 200 sondages carottés totalisant 7.000 mètres.

I.2.3. Caractéristiques du minerai

Les minerais de fer de ces deux gisements sont considérés comme des minerais acides contenant des teneurs en SiO₂ relativement élevées, d'Al₂O₃ (4 à 5%), de phosphore (0.8 %) et d'arsenic (0.03 %).

Depuis la découverte de ces gisements, de nombreux travaux de recherche et d'études ont été effectués par le BRMA (Bureau de Recherche Minière Algérien en 1953), par le BIA (Bureau d'Investissement en Afrique en 1959) et enfin le SERMI (Service d'Etudes et de Recherches Minières en 1961).

Après l'indépendance, plusieurs études ont été dirigées par la SONAREM avec des partenaires étrangers ayant une notoriété internationale dans le domaine minier (LKAB - Suède, IRSID - France, TEMPO & KAISER ENGINEERING - USA, INSC - Japon et KLOCKNER - RFA)

I.3. Etudes de mise en valeur

Les études de mise en valeur ont été principalement menées sur le gisement de Gara Djebilet.

Ce gisement est facile d'accès et l'extraction du minerai pourrait être menée à ciel ouvert sans problèmes particuliers. Concernant le gisement de Mechri Abdelaziz, les mêmes conditions minières que celles de Gara représentent un atout supplémentaire pour la valorisation de ces deux gisements. Si les conditions minières restent très intéressantes, la qualité du minerai et l'éloignement de ces gisements ont soulevé des interrogations. Afin de lever ces incertitudes un certain nombre de travaux et d'études ont été réalisés depuis.

I.3.1. Etudes d'exploitation et de transport

Les différentes études menées dans les années 1970 ont abouti aux conclusions suivantes :

- l'extraction du minerai sera menée à ciel ouvert,
- l'évacuation du minerai pourrait se faire avec plusieurs variantes à savoir :
 - par la méditerranée (1500 Km de voie ferrée à réaliser)
 - par l'atlantique ou plusieurs solutions avaient été envisagées

I.4. Infrastructures liées à la valorisation de ces gisements

En plus des conditions minières décrites plus haut, l'existence d'une documentation technique très détaillée ainsi que la possibilité de traiter ce minerai (in situ ou ailleurs) la région renfermant ces gisements offre d'autres possibilités de faciliter la valorisation de ces gisements.

On peut citer :

I.4.1. Présence de ressources aquifères

Des travaux ont été menés dans la région des gisements de Gara Djebilet et de Mechri Abdelaziz ou des potentialités aquifères importantes ont été mises en évidence. Ces travaux ont abouti à l'individualisation de six ensembles aquifères dont les débits varient de 2 à 30 l/s à des profondeurs moyennes d'une centaine de mètres. Plus d'une trentaine de sondages ont été effectués dans le cadre de cette opération.

Cet ensemble aquifère est situé dans le bassin de Tindouf et reste géographiquement peu éloigné des gisements de fer concernés.

I.4.2. Présence de gisements de gaz naturel

Plusieurs découvertes de gaz naturel ont été mises en évidence au sud ouest algérien, à quelques 550 Km des gisements de fer de Gara Djebilet et Mechri Abdelaziz. Ces sites potentiels découverts dans les années 1980 se situent :

- dans la cuvette de SBAA
- dans le bassin de REGGANE

La production de gaz naturel à proximité de ces gisements serait un élément d'appréciation important dans le cadre d'une vision globale d'un projet intégré visant à l'extraction du minerai de fer et son enrichissement sur place avant transport par le procédé de réduction directe.

Chapitre II :

Généralités sur les méthodes de séparation

II. Méthodes de séparation physico-chimiques

II.1. Concentration gravimétrique

La concentration par gravité ou gravimétrique est une voie importante de la minéralurgie.

En effet, certains minerais pondéreux, peuvent faire leurs concentrations par une technique gravimétrique. Les équipements de concentration gravimétrique exploitent la différence de masse volumique entre les matériaux pour accomplir la séparation grâce à l'action combinée de la gravité et de différentes forces. En réalité, la séparation est aussi affectée par le volume et la forme des particules comme dans le cas de la classification. Les effets de ces deux facteurs sont contrôlés en limitant la gamme de tailles de particules qui composent l'alimentation de ces équipements par tamisage ou classification.

La concentration gravimétrique est effectuée dans l'eau de préférence, l'air est utilisé dans certains cas (tables à air) mais grâce à sa masse volumique plus élevée, l'eau est un meilleur fluide pour effectuer la séparation.

Sous l'action de la gravité et/ou d'une autre force, les particules baignant dans le fluide (l'eau) entrent en mouvement les unes par rapport aux autres afin de créer deux couches distinctes celle rassemblant les particules de faible masse volumique et celle rassemblant les particules de masse volumique élevée. La concentration gravimétrique est possible en raison des différences de mouvement des particules dans un fluide en fonction de l'action simultanée de la gravité et d'une ou plusieurs autres forces.

La réussite d'une séparation gravimétrique repose sur la connaissance poussée des paramètres minéralogiques du minerai à traiter (maille de libération, masse volumique des divers constituants, présence de mixtes minéralogiques, répartition granulométrique des espèces minérales, etc.).

Les mécanismes de séparation pour la gravimétrie sont : Mécanisme par milieu dense, mécanisme par pulsation et stratification, et en ce qui concerne notre étude on va se baser sur le Mécanisme par nappe pelliculaire fluente.

II.1.1. Méthodes en milieux denses

Les méthodes de concentration en milieux denses sont les méthodes gravimétriques dont le principe de fonctionnement est le plus simple. Selon ce principe, toute particule située dans un fluide quelconque se positionne selon sa masse volumique ; si sa masse volumique est inférieure à celle du milieu, la particule monte à la surface de celui-ci, c'est-à-dire qu'elle flotte et fait partie du produit appelé flottant. Si au contraire sa masse volumique est

supérieure à celle du milieu, la particule descend jusqu'au fond de celui-ci, c'est-à-dire qu'elle plonge et fait partie du produit appelé plongeant. Le milieu a une masse volumique ou densité supérieure à l'unité (généralement entre 1,3 et 3,8).

Ces méthodes sont parmi les méthodes gravimétriques les plus efficaces. Elles sont utilisées pour enrichir entre autres les minerais de charbon, de fer, de titane, de chrome, de manganèse, d'étain, de tungstène.

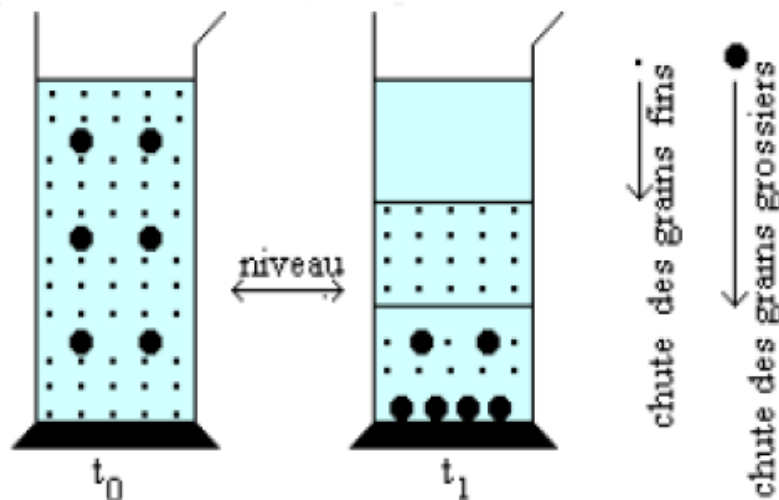


Figure II. 1 : Principe de séparation par milieux denses

II.1.2. Méthodes par jig (accélération différentielle)

Le procédé consiste à soumettre pendant des cycles très brefs les particules minérales à des courants ascendants et descendants assurés par un piston ou un diaphragme (jig à piston) ou par le mouvement alternatif d'un crible dans un fluide (jig à crible mobile). La séparation des grains lourds et légers s'obtient en trois phases par l'action combinée des courants ascendants et descendants :

- ✓ l'accélération différentielle : dans cette phase, les grains acquièrent une accélération ne dépendant que de leurs densités, à condition que le temps de chute soit très bref. En conséquence, un mélange binaire de particules lourdes et légères se comporte de tel sorte que les distances parcourues par les particules sont fonction de leurs accélération initiale, et partant de leur densité et donc possible d'obtenir théoriquement une stratification des particules lourdes et des particules légères.

- ✓ sédimentation gênée : le courant ascendant de liquide permet de réaliser un rapport de sédimentation élevé et d'augmenter le critère de TAGGART. En fait, le rôle principal du courant ascendant est d'écarter au maximum les particules, les unes des autres.

II.1.3. Mécanisme par nappe pelliculaire fluente

Sont basés sur l'action de percolation interstitielle à travers un lit de particules en écoulement sur un plan incliné. Les particules de masse volumique élevée ont tendance à traverser le lit pour former une couche de particules inférieure qui s'écoule lentement le long du plan incliné. La couche supérieure qui est composée des particules de faible masse volumique s'écoule plus rapidement puisque ces particules sont facilement entraînées par le courant liquide et ne subissent pas la friction occasionnée par la surface inclinée. Parmi les équipements de ce groupe, les spirales se distinguent grâce à un effet additionnel de force centrifuge engendré par leur configuration spécifique (Wills, B. A.1988).

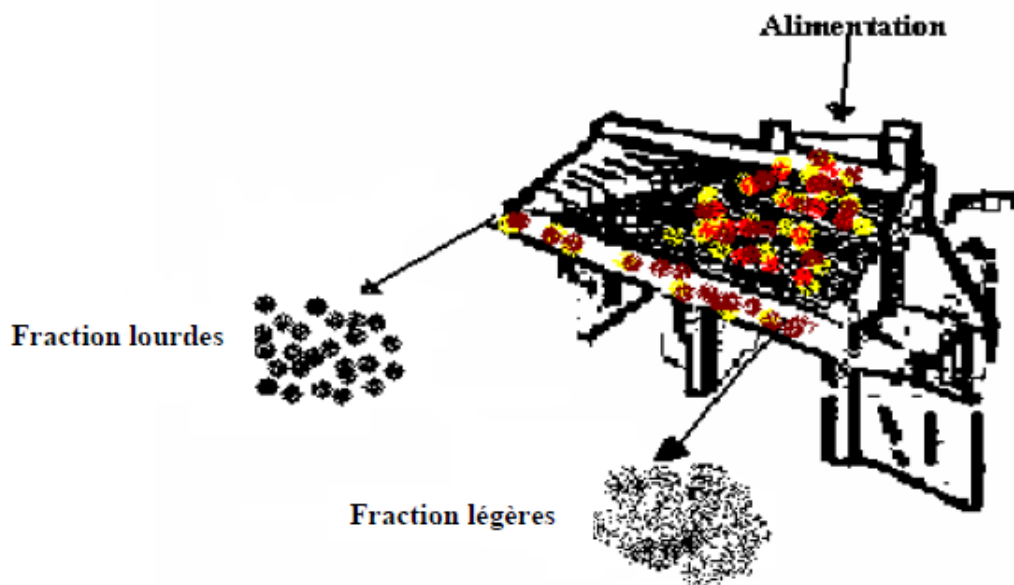


Figure II. 2 : séparation par nappe pelliculaire fluente

II.2. Concentration par la flottation

Le principe de la flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des solides. Ces propriétés peuvent être naturelles ou stimulées à l'aide d'un réactif approprié qui est ajouté dans l'eau ou baignent les particules solides. Lorsque de l'air est introduit sous forme de petites bulles dans un tel milieu, il se produit un transport sélectif des particules

hydrophobes. Les particules présentant des surfaces hydrophobes se fixent aux bulles d'air lorsqu'elles entrent en collision avec elles. Ce phénomène est dû à la grande affinité des surfaces hydrophobes pour l'air dont la nature est non-polaire. Les bulles d'air entraînent ces particules jusqu'à la surface de la pulpe ou elles forment une mousse chargée. Par contre, les particules présentant des surfaces hydrophiles ne se lient pas aux bulles d'air et restent en suspension dans la pulpe (Figure II.3).

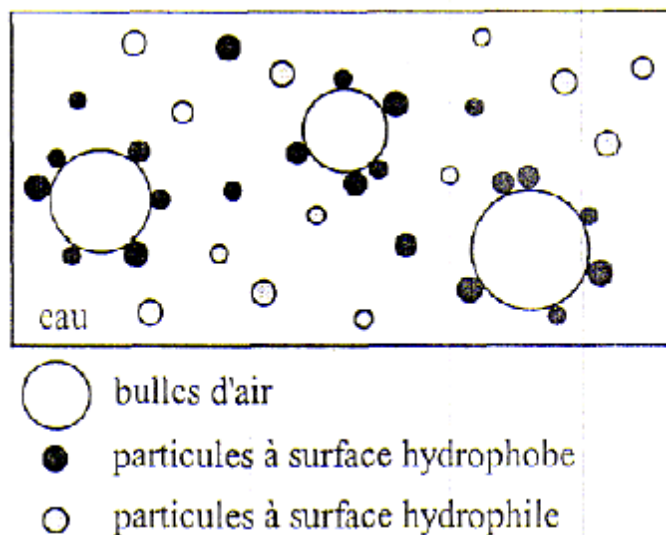


Figure II.3 : Fixation des particules à la surface hydrophobe aux bulles d'air

La pulpe doit être préparée adéquatement en fonction des substances à concentrer et cette préparation repose principalement sur l'ajout de différents agents. Les moussants, les collecteurs, les déprimant et les activants sont des réactifs de flottation. La stabilité de la mousse est assurée par les moussants. Les collecteurs ont pour fonction d'adhérer aux surfaces afin de les rendre hydrophobes alors que les déprimants rendent les surfaces hydrophiles. Les activants altèrent les surfaces des particules afin de les rendent plus susceptibles à l'action d'un collecteur. L'activité de la plupart de ces réactifs dépend du pH du milieu, il est donc important de corriger la valeur du pH en fonction des réactifs utilisés.

L'utilisation de la flottation est appropriée pour le traitement de particules dont la taille est comprise entre 5 et 212 μm . Cependant, pour les minéraux légers comme le charbon la limite supérieure est élevée à 1,70 mm. La limite supérieure est dictée par la capacité limitée d'une bulle à soulever un pois. A masse volumique égale, la flottation des grosses particules nécessite des bulles plus volumineuses que la flottation de petites particules.

En conséquence, il est important de procéder à la classification de la pulpe avant d'accomplir la séparation par la flottation.

La valeur optimale de pH dépend de la nature du minéral (ou substance contaminante) qui doit être concentré par flottation ainsi que du collecteur utilisé. Les conditions optimales de pH sont habituellement prescrites par les fabricants de collecteurs. Une telle précaution a souvent pour conséquence de diminuer considérablement la consommation de collecteur.

II.2.3. Réactifs de flottation

➤ Les collecteurs :

Les collecteurs sont des substances organiques qui se fixent sur la surface de certains minéraux et augmentent leur flottabilité. Leur action consiste à diminuer la mouillabilité des minéraux par la formation sur leur surface d'une pellicule hydrophobe qui contribue à l'adhésion des minéraux aux bulles d'air.

➤ Les déprimants :

Les déprimants jouent un grand rôle dans la flottation des minéraux ayant les propriétés de flottation proches. Les minéraux de la même classe (ex : les sulfures) sont flottés par le même collecteur. L'utilisation des déprimants permet d'augmenter la sélectivité d'action des collecteurs par rapport à ces minéraux. Ils assurent la dissolution de la couche du collecteur qui se trouve sur la surface du minéral à dépression et la création des conditions qui empêchent la formation d'une telle couche.

Le rôle du déprimant est d'annuler l'effet du collecteur sur certaines surfaces minérales précises, et ainsi de faire plonger les minéraux que l'on ne veut pas flotter, en évitant par-là leur piégeage dans le produit de mousse.

➤ Les activants :

Ils réagissent avec la surface des minéraux contribuent à une meilleure fixation du collecteur. Ils forment sur la surface du minéral une combinaison superficielle qui active la fixation du collecteur.

➤ Les régulateurs du milieu :

Les collecteurs, les déprimants et les activants agissent par voie directe sur la surface des minéraux tandis que les régulateurs sont employés pour changer les propriétés de la pulpe de flottation à fin de créer les conditions favorables à la flottation. Ils modifient la composition ionique de la pulpe (réglage du PH) et influent sur la formation de la mousse, sur la taille et la stabilité des bulles d'air.

➤ Les moussants :

Un moussant doit avoir un pouvoir collecteur négligeable, rendant la mousse juste suffisamment stable pour que celle-ci puisse être isolée de la pulpe. Les moussants sont généralement des molécules organiques hétéro-polaires, qui abaissent la tension superficielle de la phase aqueuse et augmentent donc la stabilité et la durée de vie des bulles générées. Leur mode d'action est similaire aux

collecteurs; c'est-à-dire que la partie polaire s'oriente vers l'eau, alors que celle non polaire s'oriente à l'intérieur des bulles d'air.

II.2.4. Paramètres influençant l'opération de flottation

L'efficacité du procédé de flottation dépend des conditions suivantes :

- ✓ La grandeur du minerai à flotter
- ✓ La densité de la pulpe de flottation
- ✓ La gamme des réactifs de flottation utilisés
- ✓ L'intensité de l'aération et de l'agitation de la pulpe
- ✓ La température de la pulpe
- ✓ Influence du pH
- ✓ La durée de flottation, le schéma de flottation, le débit de la pulpe.

Chapitre III :

Partie Expérimentale

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre de notre recherche, nous allons utiliser les techniques d'enrichissement du minerai de Fer et ce, pour éliminer le plus possible les impuretés comme la silice, le phosphore et les argiles (Al_2O_3).

Selon les propriétés physico-chimiques des principaux minéraux de composition du Fer, et d'après les résultats des études qui sont faites auparavant sur le même minerai, nous allons essayer de faire une séparation combinée (séparation gravimétrique – séparation par flottation), et en ce qui concerne la première méthode on a choisi trois tranches granulométriques qui correspondent respectivement les fractions 1.25-0.800 mm ; 0.800-0.630 mm ; 0.630-0.400 mm, ces tranches représente une meilleur libration de minerai de valeur, pour objet d'enrichir la silice et éliminer les impuretés de la silice, d'argile...etc. Puis, le concentré venant de cette opération sera traité par flottation en vue de l'élimination des impuretés restantes. Ces essais sont effectués au niveau de laboratoire de minéralurgie de département Génie Minier à l'école nationale polytechnique.

III.2. CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET CHIMIQUE

III.2. 1. INTRODUCTION

Les technologies minéralurgiques offrent un potentiel remarquable pour extraire le minerai utile Malheureusement, les méthodes actuelles de caractérisation et d'analyses granulométriques et chimiques nous renseignent très peu sur le potentiel et les limites de ces technologies quant au traitement ou à la valorisation possible des matrices minérales

La caractérisation minéralurgique repose principalement sur la connaissance de la granulométrie, de la distribution du minerai de valeur dans les différentes fractions granulométriques, de l'identification de leur composition minéralogique et du degré de libération (minerai utile-gangue).

III.2.2. PREPARATION MECANIQUE

Concassage

Le concassage a été effectué à l'aide d'un concasseur à percussion du laboratoire de minéralurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ce concasseur permet de réduire un échantillon de 0-40 mm jusqu'à 0-3 mm.



Figure III.3 : concasseur à percussion

Vu que la grandeur des tout venants ramenés de la mine était entre 0 à 500mm, alors il fallait commencer par un concassage préalable, en utilisant un concasseur à mâchoires, des échantillons avant de les faire passer par le concasseur à percussion.

Broyage

A la sortie du concasseur, et après avoir réduit la taille des tous venants des trois quartiers ainsi que celle des stériles jusqu'à moins de 3,15mm, l'étape suivante consiste à réduire encore la grandeur des grains jusqu'à une certaine granulométrie afin de pouvoir effectuer les essais de flottations qui exigent une certaine granulométrie.

Dans le but d'atteindre la grandeur voulue, le broyage a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets du laboratoire de minéralurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ce dernier permet d'avoir des granulométries allant jusqu'à moins de 80 μ m.



Figure III.4 : Broyeur à boulets

III.2.3. Opération de quartage et homogénéisation

Cette opération consiste à mélanger le minerai concassé sous forme d'un tas, puis tasser ou bien Platter ce dernier est divisé en quatre parties. Après, mélanger la 1ere portion avec la 3eme portion (les deux parties opposées), on répète la même opération. Comme le montre le schéma (Figure III.3).

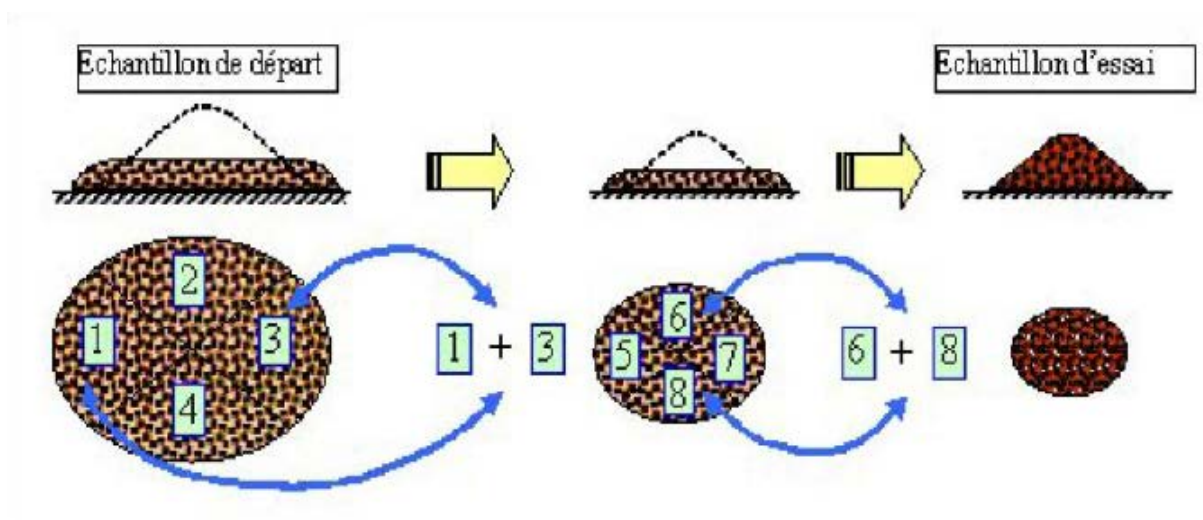


Figure III.3 : les différentes étapes de quartage.

III.2.4. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant la population. Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres, cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes. L'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc.)

III.2.4.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un échantillon.

III.2.4.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis (Figure III.4).

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture dans notre cas le temps de tamisage est égale à 15min avec une amplitude de vibration = 60.



Figure III.4 : Tamiseuse

III.2.4.3. Dimension de tamis utilisés

Le produit obtenu Après cancanage et broyage de la roche du grès on considéré comme un sable donc, on utilisera en général les tamis qui correspond respectivement les mailles suivantes : 3,15 mm ; 2,5 mm ; 1,6 mm ; 1,25 mm ; 0,800 mm ; 0,630 mm ; 0,400 mm, 0,315 mm, 0,200mm 0,160 mm, 0,100mm, 0,080 mm.

III.2.4.4. Résultats et interprétation

Tableau III.1 : Résultats de l’analyse granulométrique

Classe (mm)	poids total de la classe (g)	Poids des Passants	poids des refus	% Passants	% Refus
2,5-3,15	1212	7483	1212	86%	14%
1,6--2,5	2000	5483	3212	63%	37%
1,25--1,6	800	4683	4012	54%	46%
0,8--1,25	1100	3583	5112	41%	59%
0,630--0,8	800	2783	5912	32%	68%
0,4--0,630	300	2483	6212	29%	71%
0,315--0,4	500	1983	6712	23%	77%
0,2--0,315	724	1259	7436	14%	86%
0,160--0,200	645	614	8081	7%	93%
0,100--0,160	167	447	8248	5%	95%
0,080--0,100	80	367	8328	4%	96%
<0,08	367	0	8695	0%	100%

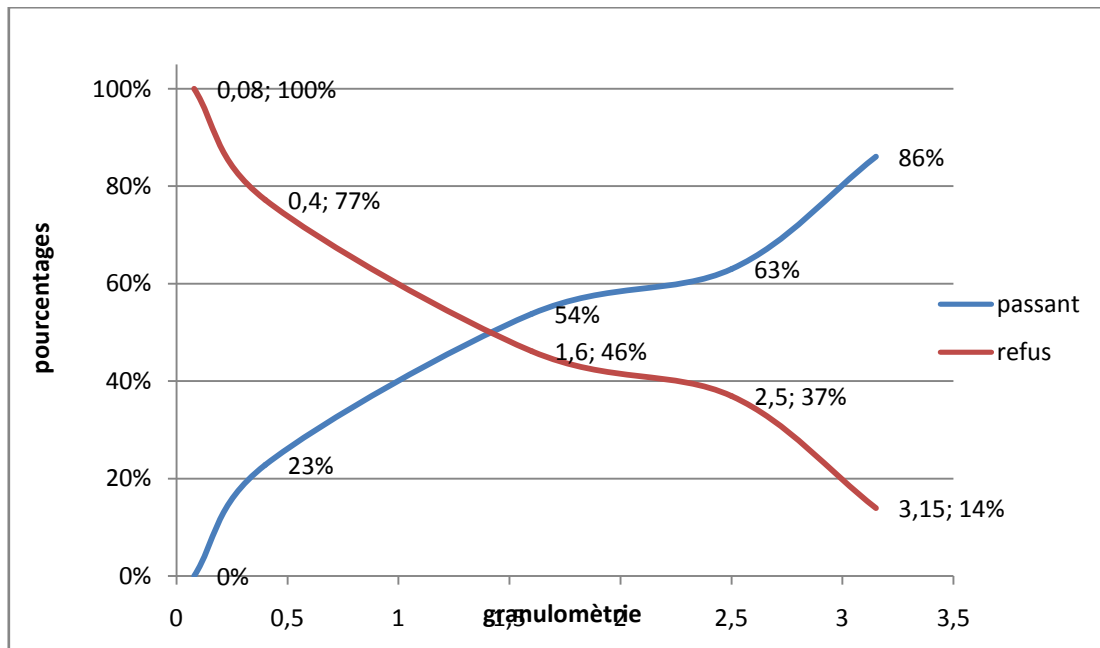


Figure III.5 : courbe granulométrique

Interprétation des résultats :

La première remarque peut être expliquée par la génération des fines particules suite à l'utilisation de concasseur à percussion qui a cette particularité

III.3. ESSAIS DE SEPARATION PAR GRAVIMETRIE

III.3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre de notre recherche, nous allons utiliser les techniques d'enrichissement des du minerai de fer, pour éliminer le plus possible les impuretés comme l'oxyde de magnésium MgO, le titane (TiO₂) et les argiles (Al₂O₃), la silice (SiO₂) et le phosphore (P₂O₅). Lesquelles impuretés influent négativement sur la qualité du fer. Et ça en utilisant la méthode de séparation gravimétrique.



Figure III.6 : Table à secousses

III.3.4. Mécanisme de séparation

il en a beaucoup de procédés pour la séparation gravimétrique mais en ce qui concerne notre cas on va se limiter sur la table à secousse (la nappe pelliculaire fluente) :

III.3.4.1. Mécanisme par nappe pelliculaire fluente

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

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

III.5. L'essai de Séparation

Pour chaque essai on va mettre une masse du minerai (200 g) dans la boîte d'alimentation puis on introduit un débit d'eau suffisant pour avoir un arrosage suffisant et bien couvrir toute la table, et enfin on récupérera les produits arrivants à chaque zone .

Après avoir fixé un débit d'eau de 2.3 l/min, on a varié les paramètres suivants :

- La pente ; pente 01 (4°), et pente 02 (5.5°).
- Les tranches granulométriques : 1.25-0.800 mm ; 0.800-0.630 mm ; 0.630-0.400 mm.
- Le but était d'avoir une bonne répartition de minerai sur la table et donc une meilleure récupération dans les zones (01+02), qui vont recevoir le concentré, tandis que les zones (03+04) vont recevoir le rejet.

III.6. Résultats et discussions :

Tableau III.2 : Résultats de la séparation gravimétrique

Classe (mm)	Pente	Zone 01+02 (concentré en g)	Zone 03+04 (rejet en g)	Perte (g)	Rendement poids
1,25 - 0,8	pente 2 = 4°	112	71	17	56%
	pente 3 = 5,5°	7	182	11	4%
0,8 - 0,63	pente 2 = 4°	104	91	5	52%
	pente 3 = 5,5°	12	181	7	6%
0,63 - 0,4	pente 2 = 4°	47	135	18	24%
	pente 3 = 5,5°	5	172	23	3%

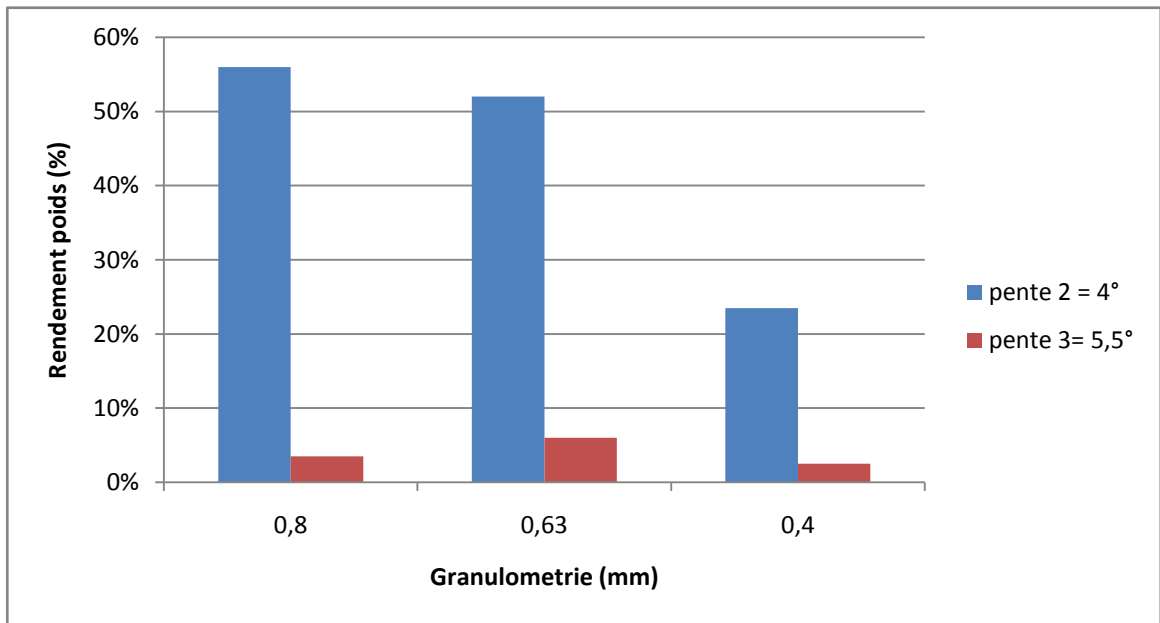


Figure III.7 : Rendement poids pour les différentes classes après séparation gravimétrique

Les figure III.8 montrent que la table à secousse sépare d'une manière efficace les différentes particules qui constituent notre minerai, ou on voit dans la partie gauche de la table des grains de couleur sombre (brune) qui correspond bien à notre minerai de Fer (lourd) tandis qu'à la partie droite on ne voit que des particules de couleur clair qui ont une densité faible par rapport à ceux du côté gauche.

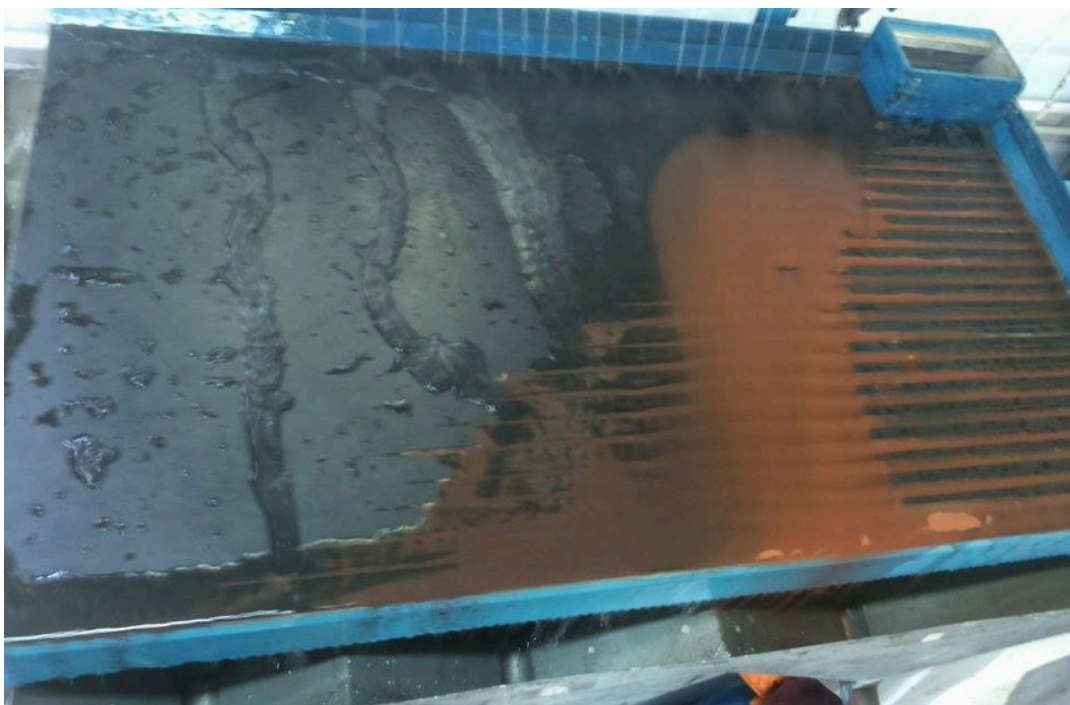


Figure III.8 : séparation par table à secousse (tranche 0,800 – 0,630 mm)



Figure III.9 : séparation par table à secousse (tranche 0,630 – 0,400 mm)

III.4. FLOTTATION

La flottation est une technique de séparation des solides basée sur les différences existant entre leurs propriétés superficielles dans une solution aqueuse et dans l'air. Pour ce faire, on disperse des bulles d'air dans une suspension aqueuse de particules solides (pulpe) pour récupérer l'espèce minérale à séparer, rendue préalablement hydrophobe par un ajout de collecteur (surfactant). L'ensemble eau-bulles-particules hydrophobes est rassemblé sous forme d'une écume surnageante stabilisée par un moussant.

Notre objectif dans ce chapitre est d'enrichir le minerai de fer de Gara Djebilet par l'élimination de la gangue telle que la silice (SiO_2).

Typiquement, le minerai doit subir une phase de préparation avant d'entrer dans la phase de flottation, mais pour nos essais on va se limiter sur les classes granulométriques $80\mu\text{m}$ et $80 - 160\mu\text{m}$ du produit résultant de la séparation mécanique.

III.4.1. Le broyage

Le broyage est effectué à l'aide d'un broyeur à billes de type Retsch PM-100 (Figure III.10) sur le produit obtenu à partir de la séparation gravimétrique. Ce type de broyeur automatique est muni d'un afficheur qui nous a permis de régler la vitesse et le temps de broyage de telle façon à obtenir les produits suivant :

- Un échantillon broyé finement à $80\mu\text{m}$.
- Un échantillon broyé à la dimension $80 - 160\mu\text{m}$.



Figure III.10 : Broyeur à billes de type Retsch PM-100

III.4.2. Les réactifs de flottation

- Pour le bon déroulement de l'opération de flottation, des réactifs chimiques spécifiques ont été choisis avec des quantités précises selon les essais effectués auparavant sur le minerai de Fer. Ces réactifs sont indiqués comme suit :
 - **Collecteur** : on a utilisé l'acide oléique comme collecteur pour tous les essais effectués. Grâce à ses propriétés, l'acide oléique permet de flotter les oxydes.
 - **Déprimant** : nous avons choisi Silicate de sodium pour faire déprimer la silice, au fond du récipient de flottation.
 - **Régulateur du milieu** : pour fixer le PH entre 4 et 6, on utilise l'acide chlorhydrique (HCL) comme régulateur du milieu.
 - **La densité de la pulpe (rapport solide-liquide) :**
 - ✓ Pour que la récupération du concentré de flottation soit optimale, on a fixé le rapport solide-liquide à 50 % ($r = 1/2$) c.-à-d. : pour 250 g du minerai on met 500 ml d'eau.

III.4.3. Mode opératoire

On a utilisé une cellule de flottation (figure III.11), elle doit être remplie d'eau distillée, puis on ajoute le minerai de façon à obtenir une pulpe d'environ 50% en solide. Dans notre cas, l'essai comprend 250g de minerai pour 500ml d'eau distillée.

- ✓ On pèse une quantité de 250g du minerai brut broyé, et on la met dans un récipient contenant 500ml d'eau.
- ✓ On place le récipient dans la cellule de flottation, et on laisse le mélange sous une agitation pendant 10 minutes pour la formation d'une pulpe homogène.
- ✓ On ajoute au fur et à mesure le régulateur du milieu (HCL) doucement jusqu'à obtenir un PH compris entre 4 et 6 (on vérifie à chaque fois en utilisant le PH mètre).
- ✓ Une fois le PH du milieu atteint une valeur entre 6 et 4, On laisse le mélange toujours sous agitation pendant 2 minutes.
- ✓ On ajoute le Silicate de sodium Na_2SiO_3 à 2%, destiné à déprimer la silice (SiO_2)
- ✓ On ajoute l'acide oléique (collecteur). Ce réactif se colle sur la surface des oxydes et flotte avec la gangue à la surface après l'injection de l'air (il les rend hydrophobes). Ce processus se déroule pendant 5 minutes.
- ✓ On laisse agiter encore pendant 2 min et on ajoute le moussant huile de pin (2 à 3 gouttes)
- ✓ Après l'ajout de tous les réactifs chimique, on ouvre le bouton responsable de l'injection de l'air. En insufflant de l'air dans le mélange, nous provoquons la formation d'une mousse à la surface qui a la propriété de se mélanger aux oxydes (hématite Fe_2O_3).
- ✓ La cellule de flottation va effectuer automatiquement l'opération de raclage pendant une durée variable (un des paramètres qu'on va varier). On considère la quantité récupérer par raclage comme un concentré.



Figure III.11 : Cellule de flottation



Figure III.12 : Mousse récupérée après l'essai de flottation

III.4.4. Résultats et interprétations

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux suivants :

Pour la classe granulométrique (+80 – 160 μm) :

Tableau III.3 : Résultats de flottation (tranche 80 – 160 μm)

N° d'essais	collecteur	Déprimant (ml)	temps	PH	concentré (g)	rejet (g)	perte (g)	Rendement Poids
Essai 1	2,3 ml	20	12 mn	5	90	126	34	36%
Essai 2	3 ml	20	12 mn	5	63	163	24	25%
Essai 3	2,3 ml	20	9 min	5,2	83	147	20	33%

Dans cette série d'essais concernant cette classe granulométrique, on a remarqué un rendement poids moyen. Parmi les essais qu'on a réalisé nous avons noté qu'en utilisant une quantité du collecteur de 2.3ml nous obtenons les meilleurs résultats en terme de rendement poids. Ce qui nous mène à dire que la quantité du collecteur qui nous donne le rendement de poids optimum est aux alentours de 2.3 ml.

Notons qu'en variant le paramètre du temps le meilleur rendement poids est obtenu lorsque la durée de la flottation est maximale (qui est de 12 min) ce qui est logique.

Concernant la couleur, la figure III.13 montre bien la différence qui existe entre la couleur du concentré qui est assez rougeâtre (même couleur que l'hématite) comparé à celle du rejet qui est sombre.

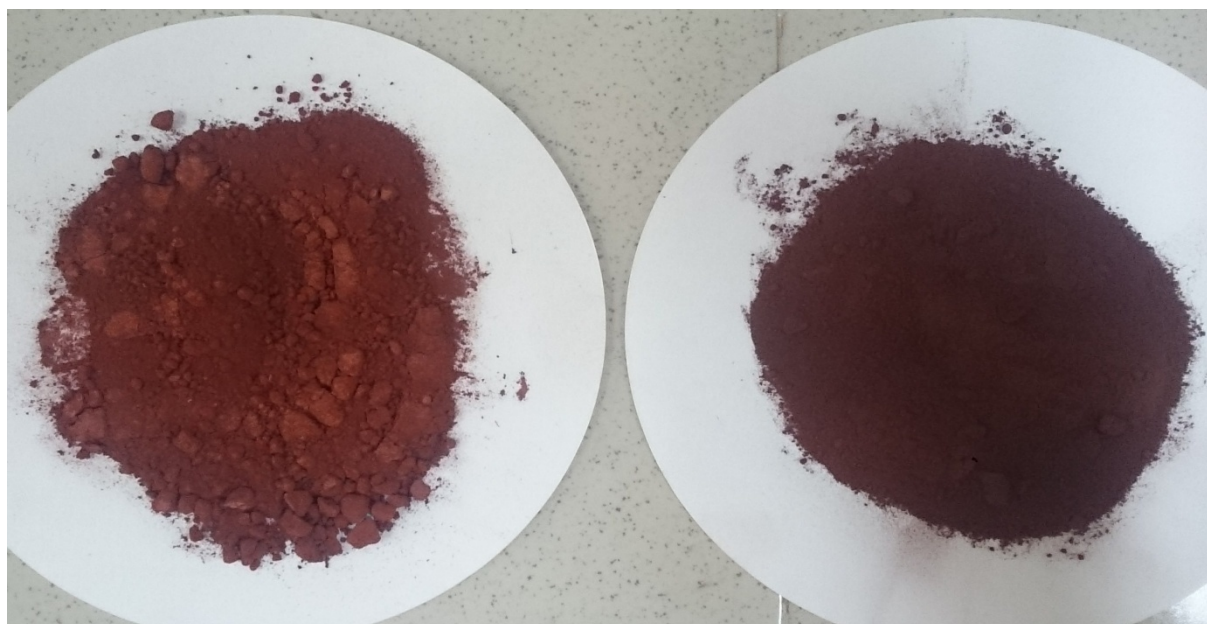


Figure III.13 : Différence de couleur obtenue par flottation pour la classe granulométrique (-160+80 μm)

Pour la classe granulométrique (- 80 μm) :

Tableau III.4 : Résultats de flottation (tranche 80 μm)

N° d'essais	collecteur	Déprimant (ml)	temps	PH	concentré (g)	rejet (g)	perte (g)	Rendement Poids
Essai 1	2,3 ml	20	12 mn	5	96	138	16	38%
Essai 2	3 ml	20	12 mn	5	66	159	25	26%
Essai 3	2,3 ml	20	9 min	5,2	77	153	20	31%

Pour cette Tranche granulométrique on a constaté une amélioration en termes de rendement poids, par rapport à la classe précédente.

Parmi les essais qu'on a réalisés nous avons remarqué la même chose concernant la quantité du collecteur utilisé (aux environs de 2.3 ml), qui nous a permis d'obtenir les meilleurs résultats en termes de rendement poids.

Dans la figure III.14 ; on constate une différence de couleur assez distincte entre le produit de mousse qui est rougeâtre comparé à celle du produit de cellule qui est sombre.

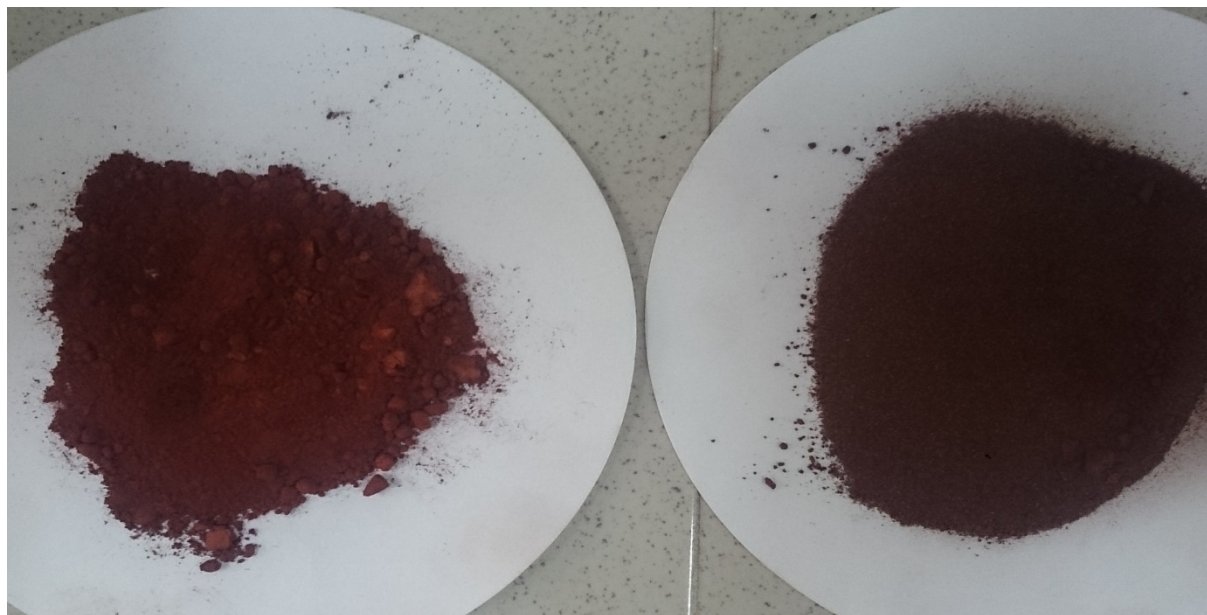


Figure III.14 : Différence de couleur obtenue par flottation pour la classe granulométrique (-80 μm)

Remarque : pour vérifier que ce qu'on a obtenu est bien le Fer nous avons ramené une photo de l'hématite obtenue en utilisant des essais de séparation à l'université de monterial (Figure III.15) et nous remarquons assez bien une forte ressemblance entre notre minerai et celui de la figure



Figure III.15 : couleur de l'hématite pure

Conclusions et Recommandations

Conclusions et recommandations :

- Les méthodes de valorisation et de traitement des minéraux par les procédés minéralogique reste tous jour a besoin d'une degré d'efficacité et de performance de point de vu équipements, caractérisation des propriétés du minerai (identification du mènèrai).
- le minerai de Fer de Gara Djebilet testé sur diverses fractions granulométriques et différents paramètres a donné les résultats très satisfaisants en terme du rendement poids et différence entre concentrés et rejet à l' œil nu.
- La classification du minerai selon leur dimension, c'est une étape cruciale pour le traitement et la séparation gravimétrique et la séparation par flottation.
- Selon la recherche bibliographique sur ce thème, la séparation par flottation donne des résultats efficaces de point de vu d'élimination des impuretés tel que la Silice (Sio2), l'alumine (Al2O3), phosphate (P2O4)...
- La tranche granulométrique (- **80 µm**) donne des meilleurs résultats en terme de différence de couleurs entre le concentré et le rejet et même en terme de rendement poids par rapport à celle (+**80 – 160 µm**) ça peut être la maille de libération de notre minerai, faute de la disponibilité du matériel de caractérisation nous ne pouvons confirmer ce point et ça reste à vérifier prochainement.
- Ces résultats dérivent d'une étude faite à l'échelle du laboratoire. Faute d'absence des moyens d'analyse, il est préférable de faire une étude plus poussée en calculant la teneur en Fer pour chaque essai et puis décider quel est le procédé le plus efficace pour le minerai
- La flottation dépend de plusieurs paramètres dont chacun peut être objet d'une recherche plus approfondie dans l'avenir.

Recommandation.

- Par manque de produits chimiques, et équipement d'analyse nous n'avons pas pu calculer la teneur de Fer dans les différents concentrés et rejets pour que nos conclusions soient sur et efficaces.
- Pour les essais de flottation, le collecteur cetyl sulfate a prouvé son efficacité en industrie, faute d'indisponibilité de ce collecteur au niveau de notre département on n'a pas pu le tester sur notre minerai de Fer.
- Nous recommandons vivement aux responsables du département d'acquérir dans les plus brefs délais ce collecteur puisqu'il permettra aux étudiants de master, Magister ou doctorants de l'utiliser dans les projets similaires et pour permettre aux prochains étudiants de confirmer et valider nos résultats.

Références bibliographiques :

- [1] OULD HAMOU M., "Cours de Minéralurgie", Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2013/2014.
- [2] American Cyanamid Company «Mining chemicals handbook».
- [3] Vesa Kirjavainen « FUNDAMENTAL CONCEPTS IN FLOTATION ».
- [4] Georges Matheron ; minerai de fer de Gara Djebilet : BULLETIN SCIENTIFIQUE ET ÉCONOMIQUE du B. R. M. A.
- [5] Pierre BLAZY, "*flottation mécanismes et réactifs*", 2000.
- [6] Pierre BLAZY et Robert JOUSSEMET « Concentration par gravité ».