

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

## *Ecole Nationale Polytechnique*



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

### *Département Génie Minier*

Mémoire de master en génie minier

Valorisation de sable siliceux pour les besoins de  
l'industrie de verre et photovoltaïque.

**Réalisé Par :**

**GUEHAIZ Bouchra**

**Sous la direction de Dr. OULD HAMOU Malek**

**Présenté et soutenu publiquement le (24/10/2017)**

#### **Composition du Jury**

**Présidente de jury : Mme A.MERCHICHI**

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

**Examineur : Dr R. AKKAL**

M.C.A Ecole nationale polytechnique

**Rapporteur : Dr M. OULD HAMOU**

M.C.A Ecole nationale polytechnique



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

## *Ecole Nationale Polytechnique*



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

### *Département Génie Minier*

Mémoire de master en génie minier

Valorisation de sable siliceux pour les besoins de  
l'industrie de verre et photovoltaïque.

**Réalisé Par :**

**GUEHAIZ Bouchra**

**Sous la direction de Dr. OULD HAMOU Malek**

**Présenté et soutenu publiquement le (24/10/2017)**

#### **Composition du Jury**

**Présidente de jury : Mme A.MERCHICHI**

M.A.A. Ecole nationale polytechnique

**Examineur : Dr R. AKKAL**

M.C.A Ecole nationale polytechnique

**Rapporteur : Dr M. OULD HAMOU**

M.C.A Ecole nationale polytechnique

# Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier le Dieu le tout puissant de m'avoir donnée la force et la patience pour accomplir ce travail.*

*En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

*Mes sincères remerciements vont aux membres du jury de cette thèse. Je remercie tout particulièrement Monsieur M.OULD HAMOU de m'avoir encadré et suivi mon travail avec ses précieux conseils. Mes remerciements les plus vifs à madame MERCHICHI pour ses conseils et son aide au niveau de laboratoire.*

*Mes remerciements vont également aux enseignants du département Génie Minier qui ont contribué à ma formation.*

*Et en fin mes meilleurs remerciements à mes parents, mes frères et sœurs et mes amies qui nous ont encouragé et aidé pour réaliser ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes chères parents en gratitude  
spécialement (ma mère et mon père) de tout ce qu'ils ont  
fait pour moi; par leurs soutiens moral et économique.*

*A ma sœur mes frères et toute la famille Guehair*

*A tous mes collègues de la promotion Génie Minier*

*2016/2017.*

*Bouchra*

# Table des matières

Listes de figures

Liste des tableaux

Introduction.....	10
Chapitre I.....	11
Présentation de la zone d'étude .....	12
1.1.    Situation géographique.....	12
1.2.    Topographie .....	12
1.3.    Cadre géologique .....	12
1.4.    Analyse minéralogique.....	12
1.5.    Les réserves géologiques .....	12
Chapitre II.....	15
Partie théorique .....	15
Introduction .....	17
1.    La séparation magnétique.....	17
1.1.    Critères de choix des appareils .....	17
1.2.    Les séparateurs magnétiques .....	19
2.    Les méthodes de séparation gravimétrique.....	20
2.1.    Séparation par nappe pelliculaire fluente .....	20
3.    La lixiviation : (séparation par voie chimique).....	23
3.1.    Le rapport solide /liquide ou dilution .....	24
Chapitre III.....	25
Partie expérimentale .....	26
Introduction .....	26
1.    La séparation magnétique.....	27
1.1.    La séparation magnétique par voie sèche .....	27
1.2.    Résultats de la séparation magnétique .....	28
1.3.    Interprétation des résultats.....	29
2.    Séparation gravimétrique.....	29
2.1.    Mode opératoire .....	30
2.2.    Séparation gravimétrique sans lixiviation.....	30
2.3.    Séparation gravimétrique après la lixiviation .....	32
3.    Comparaison entre les deux méthodes de traitement.....	35
Conclusion générale .....	37
Références bibliographiques .....	38

## Listes de figures

Figure 1 : carte de localisation du gisement.....	12
Figure 2: carte géologique.....	12
Figure 3: schéma de répartition des réserves exploitables.....	12
Figure 4: schéma d'une table à secousses.....	21
Figure 5: schéma du principe de classification par NPF.....	22
Figure 6: schéma de la classification d'un minerai selon sa taille et sa densité.....	23
Figure 7: schéma de traitement .....	26
Figure 8: séparation magnétique SMHI.....	27
Figure 9: résultats de la séparation magnétique.....	29
Figure 10: photo d'une table à secousses. ....	30
Figure 11: photo de l'essai de lixiviation. ....	33
Figure 12: table à secousses. ....	33

## Liste des tableaux

Tableau 1: la description de différentes zones. ....	22
Tableau 2: résultat de la séparation magnétique. ....	28
Tableau 3: résultats de la table à secousses. ....	31
Tableau 4: résultats de la table à secousses après lixiviation. ....	34
Tableau 5: comparaison des deux méthodes de traitement. ....	35



## ملخص

تعاني صناعة الزجاج من مشاكل ناتجة عن نوعية المادة الأولية او ما يسمى السيليكا. بهدف تحسين نوعية المواد وتطبيقاتها في مجال الزجاج، عينات من الرمل مستخرجة من ودائع الرمل الكوارتز سيدي بو علي عرضوا لتحاليل فيزيائية (تحاليل حجم الجسيمات، تحاليل كيميائية والفحص المجهرى). وبناء على هذه التحاليل، نجد أن الرمال تحتوي على شوائب ضارة مثل الهيماتيت والطين بنسب مرتفعة مقارنة بالمعايير الدولية المعتمدة لصناعة الزجاج.

الهدف من هذا البحث هو إيجاد طرق معالجة الرمل لتخصيب الرمال وتحسين نوعيتها لصناعة الزجاج للحصول من منتج قابل للتسويق يحتوي على الأقل 99 ٪ من  $\text{SiO}_2$ .

طريقة التخصيب المعتمدة الفصل المغناطيسي في كثافة عالية مع فاصل مغناطيسي تليها التعويم.

وقد سمحت الطريقة المتبعة لتخصيب من رفع مستوى السيليكا، وخفض كميات  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  للوصول إلى عتبة التسامح. وأيضاً الحصول على نتائج مشجعة للغاية فيما يخص مستوى  $\text{SiO}_2$  ، وبالتالي هذه النتائج مرضية لصناعة الزجاج، وخاصة الزجاج المسطح وزجاج التكنولوجيا الفائقة.

### الكلمات المفتاحية:

الكوارتز الرملي، رمل سيدي بو علي، الفصل المغناطيسي، الزجاج، والخلايا الكهروضوئية.

## ABSTRACT

The glass industry is too frequented by the quality problems posed by the raw material, which is silica. In order to improve the quality of this material and its application in the field of glass, sand samples extracted from the SidiBou-Ali quartz sand deposit were subjected to a physicochemical characterization (particle size analysis, Chemical analysis and microscopic analysis). According to these analyzes, it is found that the sand contains harmful inclusions such as hematite and clay with grades higher than glass production standards.

The objective of this study is to develop a sand treatment process for glassware in order to obtain a commercial product containing at least 99%  $\text{SiO}_2$  by mineral processing methods.

To do this, a high-intensity magnetic separation has been chosen using a magnetic separator followed by lixiviation.

The enrichment method adopted made it possible to improve the content of silica with a lowering contents of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and Clay  $\text{Al}_2\text{O}_3$  to reach the tolerance threshold. The results obtained in terms of  $\text{SiO}_2$  content and recovery are very encouraging, and consequently these results are satisfactory for the manufacture of glass, especially flat glass and high-tech glass.

### Keywords :

Silica sand, Sidi Bou-Ali sand, magnetic separation, lixiviation, glass, photovoltaic.

## Résumé

L'industrie fait face à des problèmes de qualité posés par la matière première qui est la silice. Dans le but d'améliorer la qualité de cette matière et son application dans le domaine du verre, des échantillons de sable extraits à partir du gisement de sable quartzueux de Sidi Bou-Ali ont été soumis à une caractérisation physico-chimique (analyse granulométrique, analyse chimique et analyse microscopique). D'après ces analyses, on s'aperçoit que le sable contient des inclusions nocives comme l'hématite et l'argile avec des teneurs supérieures aux normes de fabrication du verre.

L'objectif de cette étude est l'élaboration d'un procédé de traitement de sable pour verrerie en vue d'obtenir un produit marchand titrant au moins 99% en  $\text{SiO}_2$  par des procédés minéralurgiques.

Pour ce faire on a opté à une séparation magnétique à haute intensité à l'aide d'un séparateur magnétique suivie d'une lixiviation et séparation par table à secousses.

Le procédé d'enrichissement adopté a permis d'améliorer la teneur en silice avec l'abaissement des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et en Argile pour atteindre le seuil de tolérance.

Les résultats aussi obtenues en teneur et en récupération  $\text{SiO}_2$  sont très encourageants, et par conséquent ces résultats sont satisfaisants pour la fabrication du verre, surtout le verre plat et le verre de haute technologie.

**Mots Clés : sable siliceux, sable de Sidi Bou-Ali, séparation magnétique, lixiviation, verre, photovoltaïque.**

# Introduction générale

## Introduction

Le verre est l'un des plus anciens matériaux utilisés par l'homme dès l'âge de pierre. Les propriétés du verre et leur amélioration constante en font un matériau presque omniprésent, en plein ou à l'abri des regards, dans l'industrie de verre produire de différents types du verre tels que, le verre sodocalcique, silico-sodocalcique, verre plat ...

la silice qui est le constituant principal du verre, formateur de réseau dans la composition du verre, et aussi produit à base du silicium, qui est la principale matière première dans la fabrication des modules photovoltaïques, est provenant à partir des gisements de sable ou bien des gisements de grès. Cependant, la silice naturelle ne possède pas en général les caractéristiques nécessaires pour la production du verre, parce qu'elle forme des minéraux complexes avec d'autres oxydes comme le fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), le rutile ( $\text{TiO}_2$ ) et les argiles, ce qui influe sur la qualité du verre. Pour cela on doit respecter les caractéristiques strictes de pureté et de granulométrie imposés par ces deux industries, et cela est réalisable par des traitements minéralurgiques du sable, par son enrichissement et calibration, afin qu'il puisse être utilisé par l'industrie de verre et photovoltaïque.

L'Algérie possède une importante réserve naturelle de silice. Malgré cette richesse, l'utilisation des sables siliceux en Algérie reste limitée suite à la qualité du matériau renfermant des inclusions minérales nocives. C'est le cas du gisement de Sidi Bou-Ali où la présence d'impureté notamment l'oxyde de fer limite industriellement l'utilisation du sable siliceux dans des nobles domaines tels que la production du verre de qualité.

Cette étude présente une démarche visant à améliorer la qualité du sable siliceux tout en diminuant sa teneur en fer et en augmentant sa teneur en silice pour obtenir un sable siliceux de haute pureté répondant aux besoins de la production de verre et de photovoltaïque.

Pour se faire trois chapitres, en plus de l'introduction générale et des conclusions sont développés et ce pour atteindre les objectifs attendus.

Le premier chapitre a fait l'objet d'une appréciation des conditions géologiques du gisement du sable siliceux de Sidi Bou-Ali-Chélif.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur les méthodes de séparation.

Le dernier chapitre de ces travaux de recherche s'articule autour des expériences réalisées par séparation magnétique, lixiviation et séparation gravimétrique (table à secousses) en vue de réduire les quantités d'inclusions ferrifères et d'argile dans la matière initiale pour avoir un produit répondant aux normes strictes de l'industrie de verre et photovoltaïque .

# Chapitre I

## Présentation de la zone d'étude

## 1. Présentation de la zone d'étude

### 1.1. Situation géographique

Le gisement de sable siliceux de Sidi Bou Ali est situé à 8 km au NE d'Ouled-Fares et à 13 km au nord d'Ech-Chélif.

La station de chemin de fer la plus proche est à 15 km (Ech-Chélif) ; le port le plus proche est celui de Ténès, situé à 35km plus au nord. Le gisement est relié avec le port et la station par une route chaussée. A 10 km au sud du gisement passe l'oued Chélif à cours d'eau permanent.



Figure 1 : carte de localisation du gisement.

### 1.2. Topographie

Le gisement se localise dans les limites d'une colline qui est bien exprimée en relief et bornée de trois parts par des ravins bien profonds. La dénivellation relative de la surface y atteint 80 m, les cotes absolues étant distribuées entre 340 m et 419 m.

La surface de la colline suit la pente générale qui descend du NE au SW. En plan, le gisement présente un polygone irrégulier qui s'étend du NE au SW, étant disposé sur les terres labourable d'état.

Le gisement est donc situé dans une région agricole. Les coordonnées en système Lambert sont :

**375 050-375 950**

**332090-333 060**

Les conditions de gisement de la substance utile favorables à l'exploitation à ciel ouvert

### 1.3. Cadre géologique

#### A. Mur de l'assise sablonneuse

Les roches les plus anciennes qui affleurent à la surface dans la région du gisement, sont présentées par les grès quartzeux gris, gris-jaunâtre et brun jaunâtres, grains très dures et compactes. D'après de nombreux restes de débris de coquilles qu'ils contiennent, ces grès ont été datés du pliocène.

Leur ciment est constitué de matière calcaro-argileuse. Ces grès affleurent dans le fond de l'ouest profond situé au NW du gisement. Ils s'étendent en direction N 270° à 300°E ; dans les affleurements, leur épaisseur apparente dépasse parfois 5m. Les grès sont recouverts par l'assise de sable.

#### B. Toit de l'assise sablonneuse

Des dépôts du niveau inférieur du villafranchien(VB) présentés par une assise d'argile calcaire compacte de différentes teintes grises comportant une partie inférieure formé par des argiles lignifiées gris foncés et noires et d'une partie supérieure ou on note des intercalations de sable gris et gris-jaunâtre.

#### C. Assise sablonneuse

Formé par des sables d'origine marine, datés du pliocène, ces sables ont été classé en 3 variétés géologiques (clairs, jaunes et bruns), séparés par des intercalations argileuses.

La coloration des sables est due généralement à la quantité d'hydroxydes de fer qu'ils contiennent, et partiellement aussi à la matière argileuse.

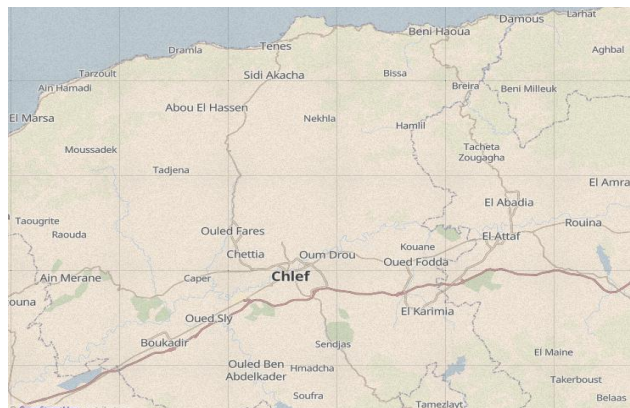


Figure 2: carte géologique.

## 1.4. Analyse minéralogique

Le sable du gisement est caractérisé par une minéralogie régulière. L'analyse minéralogique faite sur la fraction lourde et légère a donné la composition moyenne des sables du gisement suivante :

### A. La fraction légère

La fraction légère représente plus de 99.9% de la masse totale, constituée principalement par le quartz à 99% associés à des grains de feldspath et de carbonates.

La plupart des grains de quartz aux formes arrondies et subarrondies sont couverts d'une pellicule brun jaunâtre plus ou moins épaisse d'hydroxydes de fer et présentant des microfissures remplies d'hydroxyde de fer.

### B. La fraction lourde

Les minéraux de la fraction lourde constituent moins de 0.1% de la masse totale du sable, composée dans sa majorité en minéraux faiblement magnétiques. Parmi les minéraux de cette fraction, les plus fréquents sont l'hématite, le rutile, la tourmaline. Dans quelques grains rares, on note parfois, l'ilménite, le grenat.

## 1.5. Les réserves géologiques

Le calcul des réserves a été exécuté par la méthode de moyenne arithmétique par blocs géologiques. Les dimensions des blocs ont été déterminées en fonction de la densité de réseau de prospection, compte tenu de la structure géologique.

Les réserves exploitables sont estimées à 9.8 M de T qui se répartissent comme suit :

- Sable blanc et gris : 3.1 M de T.
- Sable jaune : 3.8 M de T.
- Sable brun : 2.4 M de T.



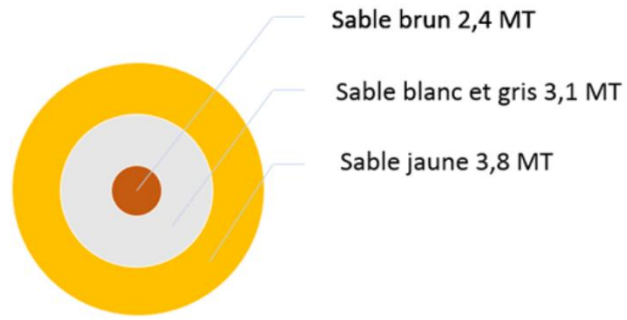


Figure 3: schéma de répartition des réserves exploitables.

# Chapitre II

## Partie théorique

## Introduction

Le minerai brut extrait de la carrière ou de la mine subit plusieurs processus de préparation mécanique et de concentration pour produire un concentré de valeur économique. On entend par enrichissement du minerai l'ensemble de ces opérations qui permet de passer du minerai brut au minerai marchand tout en augmentant la teneur en minérale et en éliminant les impuretés.

Un procédé de traitement minéralurgique comporte grossièrement deux étapes successives :

- la préparation mécanique composée généralement d'un concassage suivi d'un broyage avec des criblages intermédiaire.
- la séparation proprement dite des phases minérales intéressantes et de la gangue (ou stérile).

Ces procédés se basent sur les propriétés mécaniques, électromagnétiques, physico-chimiques et chimiques de ces minéraux.

Seules les méthodes de séparation gravimétrique ; magnétique et chimique seront décrites dans les sections qui suivent.

### 1. La séparation magnétique

Les techniques de séparation magnétique consistent à soumettre des grains de minerais à des forces magnétiques et mécaniques développées par un séparateur. Suivant leurs propriétés magnétiques, les différentes catégories minéralogiques possèdent des trajectoires caractéristiques de leur nature on obtient, de la sorte, des fractions extractibles de composition chimique et minéralogique particulière. Les trajectoires des grains résultants avant tout de l'interaction des forces mécaniques et des forces magnétiques.

D'une manière générale, il faut que, pour une fraction minéralogique du minerai, les forces magnétiques s'exercent sur les grains appartenant à cette fraction pour espérer leur extraction.

#### 1.1. Critères de choix des appareils

Le choix d'un des séparateurs va être guidé par un certain nombre de critères communs aux différents types de traitements (disponibilité en énergie, en eau, débit de minerai sec, facilité d'entretien, approvisionnement de pièces d'usure, environnement technologique, etc.), mais surtout par trois critères :

a) les propriétés magnétiques des minéraux

Les propriétés magnétiques vont guider l'utilisateur sur une des classes d'appareils disponibles :

- à basse intensité pour les matériaux fortement magnétiques (ferrimagnétiques et ferromagnétiques) ;
- à haute intensité ou à haut gradient (en relation étroite avec la granulométrie) pour les matériaux faiblement magnétiques (paramagnétiques).

Dans les cas d'associations minéralogiques complexes, où les deux types de substances coexistent, les séparations à basse et à haute intensité doivent être généralement envisagées.

b) leur minéralogie

Suivant la minéralogie ou la texture il est souvent nécessaire de connaître avec une bonne précision la valeur des susceptibilités magnétiques des minéraux à traiter ou des grains mixtes.

Cette connaissance, tout en donnant des indications sur l'appareil à utiliser, peut également renseigner sur la qualité du produit fini (teneur et récupération). En effet, deux espèces minérales n'ayant pas un écart de susceptibilité magnétique suffisant ne pourront être séparées. Il en est de même pour des grains mixtes (magnétite-quartz par exemple) qui peuvent se retrouver suivant leurs tailles dans la fraction magnétique ou non magnétique, quelles que soient les conditions de séparation. Vouloir éliminer de tels éléments pour augmenter la teneur du concentré entraîne également une baisse de la récupération de métal par perte de particules fines riches. Le choix de la méthode ou de l'appareillage peut également être guidé par les objectifs à atteindre : qualité du concentré ou taux de récupération.

c) leur granulométrie

Le critère granulométrique détermine le mode de traitement (sec ou humide), mais également le type d'appareils.

En règle générale, les produits grossiers se traitent en voie sèche et les produits fins (à partir de 1 mm) en voie humide. Le traitement en voie humide est plus sélectif, du fait de la non-existence des forces inter-particulaires, et a une capacité plus importante puisqu'il n'y a plus la nécessité de travailler en couche mince. Mais, dans certains cas, le traitement en voie sèche peut être rendu indispensable pour des raisons techniques (impossibilité de mouiller le produit, manque d'eau) ou économique (séchage).

## 1.2. Les séparateurs magnétiques

On distingue quatre types d'appareils suivant qu'ils fonctionnent en basse intensité ou en haute intensité et suivant qu'ils travaillent sur un matériau sec ou humide.

### 1.2.1. Séparateur magnétique à basse intensité à sec

Le Séparateur magnétique à basse intensité ne concerne que les matériaux ferromagnétiques.

### 1.2.2. Séparation humide a basse intensité

Ses séparateurs sont utilisés pour la purification des médiums ferromagnétiques des liquides denses et pour la concentration des minerais de magnétite.

### 1.2.3. Séparateurs à haute intensité à sec

Il existe deux sortes de séparateurs à haute intensité à sec :

#### 1.2.3.1. Les séparateurs à déviation

Ils comportent une pièce polaire plane et verticale a l'opposé d'un rotor denté. Le minerai est alimenté en chute libre contre la pièce polaire. Les particules paramagnétiques sont déviées vers le rotor. Si elles collent contre le rotor, le phénomène est de faible durée, la force centrifuge décollant très rapidement les particules fixées.

#### 1.2.3.2. Les séparateurs à collage préalable

Une pièce polaire plane est située obliquement a l'opposé du rotor induit denté. Le minerai est déposé de préférence sur le rotor tangentiellement, suivant un plan parallèle de la pièce polaire oblique. Les particules non magnétiques quittent le rotor, tandis que les particules paramagnétiques sont fixées sur le rotor aussi longtemps que les forces magnétiques contrebalancent l'action de la force centrifuge et de la pesanteur.

### 1.2.4. Les séparateurs à haute intensité en milieu humide

La séparation à haute intensité humide est rarement utilisée industriellement. Les constructeurs se heurtent dans ce domaine à de grosses difficultés technologique soit dans le domaine de l'étanchéité des rotors, soit dans le domaine des réglages. Toutefois, il existe des séparateurs à rotor conçus de telles façons que le rotor ne plonge pas dans la pulpe.

Le minerai arrive avec l'eau sous forme d'une couche mince de pulpe, s'écoulant sur une goulotte inclinée. Le courant d'eau descendant oppose une résistance à l'entraînement des particules non magnétiques par les magnétiques.

Cependant, il importe que les particules du minerai ne soient pas entraînées trop rapidement par le courant de pulpe à travers la zone de travail de l'appareil. Des études sur les coefficients de frottement montrent que la pente  $\alpha$  de la goulotte doit être supérieure à  $7^\circ$  et inférieure à  $15^\circ$ .

## 2. Les méthodes de séparation gravimétrique

Les méthodes de séparation gravimétrique sont parmi les plus anciennes et les plus utilisées encore de nos jours car leur fonctionnement est simple ainsi que la capacité élevée pour des particules assez grosses et les coûts de fonctionnement moindres par rapport aux autres méthodes. Les méthodes de concentration par séparation gravimétrique exploitent le gradient de densité entre les matériaux pour les séparer grâce à l'action combinée des forces en présence dans les équipements (la force de gravité, la force centrifuge, la force centripète, la poussée d'Archimède et la force de traînée).

Les méthodes de séparation gravimétriques peuvent être classées en quatre grandes catégories selon le principe de séparation qui est mis en jeu :

- séparation par milieu dense
- séparation par nappe pelliculaire fluente
- séparation par accélération différentielle (jig)
- séparation par centrifugation.

### 2.1. Séparation par nappe pelliculaire fluente

La séparation par nappe pelliculaire fluente est une technique de concentration gravimétrique basée sur le comportement des particules sur un plan, sous l'effet d'un film fluide, et leur classification selon leur taille et densité.

### 2.1.1. Table à secousses

#### 2.1.1.1. Généralités et principes

Les tables à secousses sont l'un des principaux appareillages utilisés pour la séparation gravimétrique, et plus précisément pour la séparation par nappe pelliculaire fluente, avec soutirage continu. Cette méthode est basée sur la longueur du parcours effectué par une particule sur un plan incliné à la surface duquel s'écoule, par gravité, un film liquide. Les tables comprennent une alimentation et un système de récupération des particules classifiées (compartiments séparés).

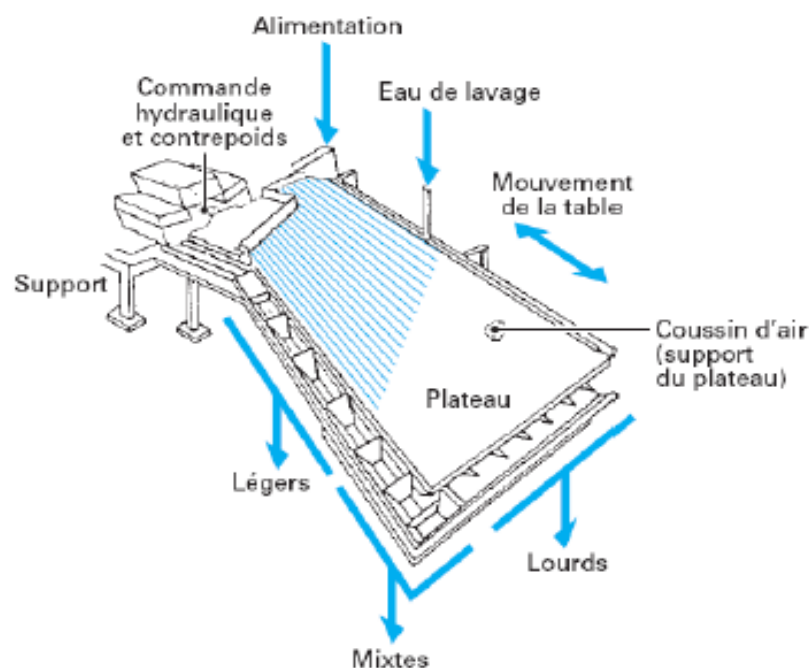


Figure 4: schéma d'une table à secousses

#### 2.1.1.2. Fonctionnement

La trajectoire d'une particule évoluant sur un plan incliné sur lequel s'écoule un film liquide est liée à :

L'alluvionnement, qui est la sédimentation des grains lourds et gros piégés dans les ripples, et l'entraînement des légers et fins par le courant.

La saltation, qui est le mouvement des grains piégés contre le support, dépendant moins de la vitesse d'entraînement que de la masse volumique des grains ; les grains ayant une masse volumique plus importante se déposent en premier.

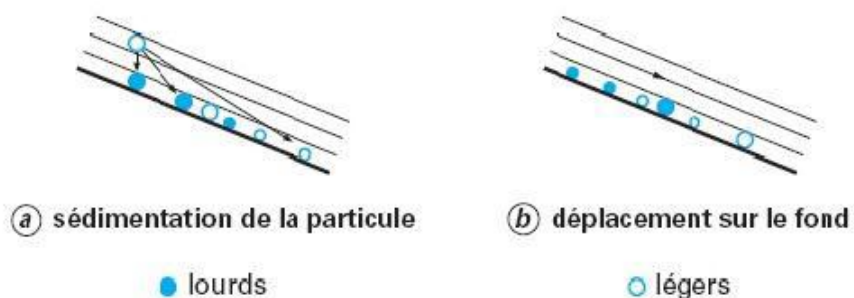


Figure 5: schéma du principe de classification

De plus, le plan incliné est sujet à des secousses asymétriques et longitudinales : l'amplitude de l'aller est moins importante que celle du retour. Ce type de secousses améliore la classification, et permet aux grains similaires de se placer au même niveau et d'être récupérés par la même évacuation vers différentes zones de récupération ces zones décrite dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: la description de différentes zones.

Nom de la zone	Description
Zone lourds	Zone des concentrés ou se trouvent les particules fines et denses
Zone mixtes	Zone qui appartient encore à la zone des concentrés ; on y trouve des particules denses et grossières avec quelques particules mixtes.
Zone légers	Zone des particules mixtes mélangées à quelques particules légères.

Le minerai est ainsi classé selon sa taille et sa densité, comme est illustré sur la figure(6).



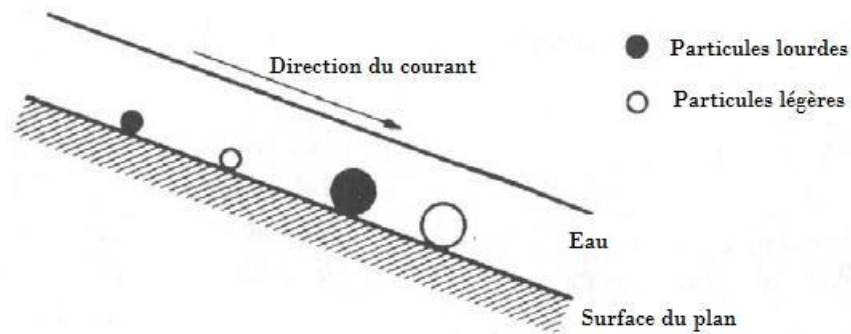


Figure 6: schéma de la classification d'un minerai selon sa taille et sa densité

Le rifflage joue un rôle primordiale, dont le rôle est de stratifié les grains grâce à l'action de secousse qui va engendre la descente des grains jusqu'à la surface de la table. L'eau de lavage a pour rôle d'évacuer les minerais stratifié vers les différentes zones. Cependant les secousses ont un double rôle, dont elles permettent d'une part la stratification et l'évacuation des particules stratifiées entre les riffles.

Des que celles-ci sortent des riffles elles sont soumises à l'effet de la nappe pelliculaire fluente et à l'effet des secousses dont la résultante provoque du triage par taille et par densité.

### 3. La lixiviation : (séparation par voie chimique)

L'essai de lixiviation est défini comme étant l'extraction liquide-solide, dans des conditions définies, d'un échantillon solide par une solution aqueuse. Le terme « lixiviat » désigne la solution contenant les éléments solubilisés au cours de l'essai, sur laquelle sont effectuées les caractérisations analytiques.

Il existe différentes méthodes de séparation pour le traitement de sable siliceux, La voie chimique par lixiviation consiste à mettre en contact le matériau solide avec un solvant liquide pour dissoudre sélectivement quelques composés du solide dans la phase liquide.

En fonction d'impureté à dissoudre et du solide à traiter, différentes solutions de lixiviation peuvent être employées, les plus courantes pour le traitement des sables sont : l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, l'acide oxalique et pour les sables siliceux c'est l'acide fluorhydrique.

### 3.1. Le rapport solide /liquide ou dilution

Le ratio solide /liquide est un paramètre important du procédé puisqu'il conditionne, pour un réacteur de volume donné, le débit admissible de sable à traiter, ou le débit de la solution dans une configuration de lixiviation. Le rapport solide /liquide (en masse ou volume) doit éviter à la fois une saturation trop rapide de la solution et une trop grande dilution qui empêcherait l'analyse des solutions.

# Chapitre III

## Partie expérimentale

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons utiliser les techniques d'enrichissement du sable siliceux pour éliminer le plus possible les impuretés comme les oxydes de fer et les argiles.

Selon les propriétés physico-chimiques des principaux minéraux de composition du sable siliceux, et d'après les résultats des études qui sont faites auparavant sur le même minerai, nous allons essayer de faire des séparations combinées (séparation magnétique –lixiviation) pour objet d'enrichir le sable siliceux. Puis le concentré venant de cette opération sera traité par la table à secousses (séparation gravimétrique) 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.

Avant de commencer il est nécessaire d'élaborer un schéma technologique qui devrait être respecté pour la réalisation des essais d'enrichissement de ce minerai (figure 7) :

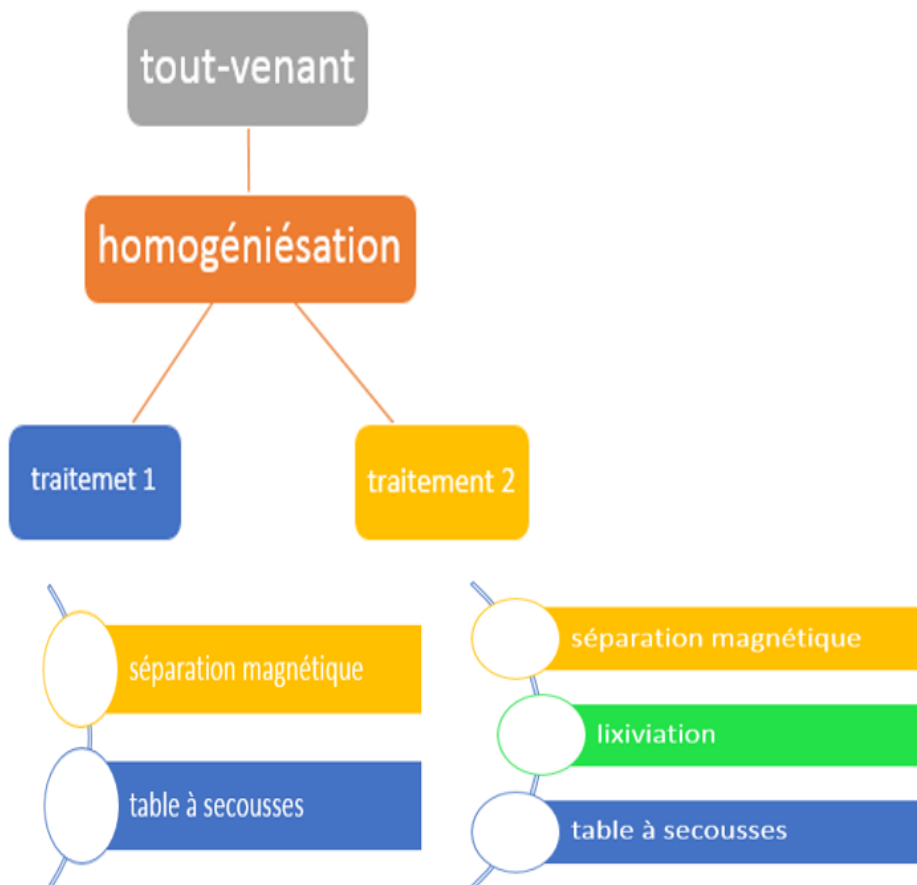


Figure 7: schéma de traitement

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de minerai, qui permettent de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du minerai, dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble et pour cela nous avons effectué des essais d'échantillonnage et de quartage manuel.

## 1. La séparation magnétique

### 1.1. La séparation magnétique par voie sèche

L'enrichissement par cette méthode consiste à séparer les fractions magnétiques d'oxyde de fer contenues dans la matière première sous l'action d'un champ magnétique intense.

Les essais d'enrichissement par séparation magnétique à haute intensité ont été réalisés par un séparateur à circuit conventionnel (électroaimant) dont l'intensité du champ est réglable de 0 à 14A.

Sous un champ magnétique intense créé par les électroaimants, dont l'alimentation est faite à l'aide d'un alimentateur vibrant horizontal. Les particules ayant une susceptibilité magnétique adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique et sont portées par la rotation dans une zone de champ magnétique forte et sont déversées dans la fraction magnétique (rejet dans notre cas), et les autres particules diamagnétiques, c'est à dire la fraction non magnétique (concentré dans notre cas), sont déversées dans le côté opposé. Comme la montre la figure(8) :



Figure 8: séparation magnétique SMHI

## 1.2. Résultats de la séparation magnétique

Les principaux paramètres que nous avons pris en considération lors des essais sont l'intensité du champ magnétique et l'ouverture du clapet :

- Le poids initial d'alimentation est de 250 g pour chaque essai.
- Les ouvertures de clapet pour aux différentes positions sont : 36°, 40°, et 50° par rapport à l'horizontale (orientation vers la droite).
- L'intensité du champ (H) appliquée est fixée à 14 ampères.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2: résultat de la séparation magnétique.

Position	1	2	3
TV(g)	250	250	250
C(g)	248.3	247.5	248
T(g)	0.95	0.87	0.76
$\gamma_c\%$	99.32	99	99.2
$\gamma_r\%$	0.38	0.35	0.31

Les indices technologiques sont calculés suivant les relations suivantes :

$$\gamma_i = (C/TV) * 100.$$

$\gamma_c$ : rendement pondéral du concentré en (%).

$\gamma_r$  : rendement pondéral du rejet en %.

TV, C, T respectivement la masse à l'alimentation, du concentré et du rejet en (g).



*Figure 9: résultats de la séparation magnétique.*

### 1.3. Interprétation des résultats

La séparation magnétique utilisée dans le cadre de notre étude en éliminant les minéraux lourds et les oxydes de fer ayant une faible susceptibilité magnétique a donné des meilleurs résultats pour la position 1 qui correspond à un angle de  $36^\circ$ , avec une intensité max  $I=14$  Ampères, il s'agit dans notre cas d'un minéral faiblement magnétique.

A partir de ces résultats, on conclut que l'élimination des oxydes de fer par séparation magnétique est de l'ordre de 0.35 % à 0.38 % du tout-venant.

### 2. Séparation gravimétrique

Il existe plusieurs procédés de la séparation gravimétrique mais dans notre cas on va utiliser la table à secousses (la nappe pelliculaire fluente). Nous avons disposé au niveau du laboratoire de l'ENP d'une table à secousses de type KHD Humboldt Wedag. Il s'agit d'une Labor-Schnellstoßherd MN 936/3.

## 2.1. Mode opératoire

La séparation par nappe pelliculaire fluente consiste à mettre une masse de minerai dans la boîte d'alimentation et assurer ensuite un débit d'eau suffisant pour avoir un bon arrosage qui permettra de récupérer chaque catégorie de grains dans leur zone spécifique.

Après avoir effectué quelques essais en utilisant l'eau seulement, on a réglé la pente de la table en sorte qu'on aura un produit à récupérer dans les zones 1, 2 et 3. La zone 4 n'a pas été prise en considération et le produit de cette zone est considéré comme stérile.

## 2.2. Séparation gravimétrique sans lixiviation

En introduisant une quantité de 500g de minerai brut après la séparation magnétique dans la boîte d'alimentation, et une fois les pentes de la table fixées, on a commencé l'essai de séparation par nappe pelliculaire fluente en laissant l'eau s'écouler sur la table et au-dessus de la boîte en assurant son arrosage.

En principe, le minerais le plus riche en oxydes de fer doit être récupérer dans les zones 1 et 2 alors que le minerais le moins riche et le pauvre en oxydes de fer sera récupéré dans la zone 3.



Figure 10: photo d'une table à secousses.



### 2.2.1. Résultats

Après la récupération des produits de la zone 1,2 et 3 et le séchage nous avons pesé les produits, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau (3) :

Poids initial de chaque essai M=500g

Tableau 3: résultats de la table à secousses.

	Essai 1		Essai 2	
	Poids (g)	Rendement %	Poids (g)	Rendement %
Zones 1 et 2	12	2.4	17	3.4
Zone 3	390	78	398	79.6
Zone 4	98	19.6	85	17

### 2.2.2. Interprétation des résultats

En premier lieu, on a introduit le minerai après la séparation magnétique dans la boîte d'alimentation et après 4min d'arrosage, on a remarqué que la boîte était vidée de son contenu et la table était pratiquement vide.

La zone 4 était remplie d'eau chargée des fines particules ce qui est très logique ; la quantité du produit de cette zone était très petite et donc négligeable devant la masse introduite initiale.

La zone 1 et 2 ont été chargées de particules denses qui représentent les oxydes de fer ou la gangue dans notre cas.

Par contre La zone 3 était remplie de de particules mixtes qui représentent le quartz (le concentré).

Donc on remarque très bien que la table à secousses nous a permis une bonne séparation entre la silice et les oxydes de fer en terme de densité.

## 2.3. Séparation gravimétrique après la lixiviation

Il existe différentes méthodes de séparation pour le traitement de sable siliceux, La voie chimique par lixiviation, qui a été présentée précédemment, consiste à mettre en contact le matériau solide avec un solvant liquide pour dissoudre sélectivement quelques composés du solide dans la phase liquide.

### 2.3.1. La lixiviation

Une technique de traitement par lixiviation est appliquer sur les échantillons de sable siliceux afin d'éliminer le plus possible les argiles et les oxydes de fer.

Nous avons effectué le traitement de sable par l'acide fluorhydrique (HF) avec un rapport liquide-solide de 10.

#### 2.3.1.1. Préparation de la solution HF à partir d'une solution concentrée

Nous avons préparé une solution HF d'une concentration de 2% à partir d'une solution HF concentrée, La démarche de cette préparation consiste à mettre un peu d'eau distillé dans une fiole jaugée de 1L et mettre ensuite 20 ml d'acide fluorhydrique (HF) concentré puis compléter le volume de la fiole jusqu'au traits de jauge avec de l'eau distillé et bien mélanger le contenu.

#### 2.3.1.2. Mode opératoire

- Au début on prend 200g de sable siliceux produit de séparation magnétique, puis on divise cette quantité en deux dans deux cylindres gradués.
- On remplit chaque cylindre par la solution de l'acide fluorhydrique (HF) préparée précédemment avec un rapport liquide-solide de 10.
- Et on met les deux cylindres gradués sur un agitateur mécanique pendant 2H comme est illustrée sur la figure (11).
- A la fin on récupère le minerais de sable contenant dans les deux cylindre.



Figure 11: photo de l'essai de lixiviation.

### 2.3.2. Séparation gravimétrique

En introduisant une quantité de 200g de minerai brut après la séparation magnétique et la lixiviation dans la boîte d'alimentation, et une fois les pentes de la table fixées, on a commencé l'essai de séparation par nappe pelliculaire fluente en laissant l'eau s'écouler sur la table et au-dessus de la boîte en assurant son arrosage. En principe, le minerai le plus riche en oxydes de fer doit être récupéré dans les zones 1 et 2 alors que le minerai le moins riche et le pauvre en oxydes de fer sera récupéré dans la zone 3.



Figure 12: table à secousses.

### 2.3.2.1. Résultats

Après la récupération des produits de la zone 1,2 et 3 et le séchage nous avons pesé les produits, les résultats obtenus sont dans le tableau (4) :

Poids initial de chaque essai M=200g

Tableau 4: résultats de la table à secousses après lixiviation.

	Zones 1 et 2	Zone 3	Zone 4
Poids (g)	20	137	43
Rendement %	10	68.5	21.5

### 2.3.2.2. Interprétation des résultats

En premier lieu, on a introduit le minerai après la séparation magnétique dans la boîte d'alimentation et après 5 min d'arrosage, on a remarqué que la boîte était vidée de son contenu et la table était pratiquement vide.

La zone 4 était remplie d'eau chargée des fines particules ce qui est très logique ; la quantité du produit de cette zone était très petite et donc négligeable devant la masse introduite initiale.

La zone 1 et 2 ont été chargées de particules denses qui représentent les oxydes de fer ou la gangue dans notre cas.

Par contre La zone 3 était remplie de de particules mixtes qui représentent le quartz (le concentré).

A partir de ces résultats on conclut que la table à secousses nous a permis une bonne séparation entre la silice et les oxydes de fer en terme de densité. et l'utilisation d'une séparation chimique (lixiviation) avant la séparation gravimétrique nous a donné de très bons résultats en terme d'élimination des impuretés (oxydes de fer).

### 3. Comparaison entre les deux méthodes de traitement

Les résultats finals des essais de la table à secousses dans les deux méthodes de traitement (1 et 2) sont représentés dans le tableau (5) :

Tableau 5: comparaison des deux méthodes de traitement.

Le rendement des différentes zones (%)	méthode 1 (sans lixiviation)	Méthode 2 (Avec lixiviation)
Zones 1 et 2	3	10
Zone 3	78.5	68.5
Zone 4	18	21.5

A partir de ce tableau, on remarque que la méthode de traitement 2 (avec lixiviation) nous a donné une meilleure séparation entre la silice et les oxydes de fer puisque le pourcentage du produit des zones 1 et 2 est augmenté de 3% dans la première méthode (sans lixiviation) à 10% dans la deuxième méthode (avec lixiviation).

Donc on conclut que la lixiviation est une étape favorable dans l'enrichissement des sables siliceux pour les besoins des industries de verre et de photovoltaïque puisque elle permet une grande élimination d'impuretés.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Suite au travail effectué durant les deux derniers mois au niveau du laboratoire du département génie minier à l'École Nationale Polytechnique, les conclusions pour l'enrichissement du minerai de sable siliceux du gisement sidi Bou-Ali (Chélif) sont les suivantes :

- Les méthodes de valorisation des minéraux par les procédés minéralurgiques ont toujours besoin d'un haut degré d'efficacité et de performance de point de vue équipements, de valorisation et caractérisation des produits obtenues.
- La séparation magnétique à haute intensité est très importante pour l'enrichissement des sables siliceux et l'élimination des impuretés surtout le fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
- L'application d'une séparation magnétique par voie sèche à haute intensité sur les sables siliceux permet de diminuer la teneur en oxyde de fer de l'ordre de 0.38 %.
- La séparation magnétique à basse intensité ne donne aucun résultat à cause de la faible teneur en minéraux ferreux.
- Selon les résultats obtenus par la séparation magnétique il y a une amélioration de la teneur de la silice et une diminution des impuretés de fer mais reste élevée vis-à-vis les normes imposées par le photovoltaïque.
- La séparation gravimétrique par la méthode de nappe pelliculaire fluente (table à secousses) permet une bonne séparation des minéraux en termes de densité.
- Un traitement par lixiviation (séparation chimique) est favorable pour le sable siliceux puisque avec des faibles concentrations d'acide fluorhydrique on obtient une solubilisation d'impuretés élevées.

## Références bibliographiques

[1] : KERPITCH L.N. “ projet pour la prospection détaillée des sables quartzeux du gisement de Sidi Bou-Ali. Fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbes.

[2] : études pour l'évaluation des gisements de sables quartzeux de Sidi Bou-Ali de Tadjna“.ENOF. fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbes

[3] : Pierre Blazy « la valorisation des minerais » ; 1970.

[4] : [www.ima-eu.org/eurosil.html](http://www.ima-eu.org/eurosil.html)

[5] : thèse de doctorat « CARACTERISATION-ENRICHISSEMENT DES GRES PAUVRES D'EL-AOUANA» ; BOUABDELLAH Soufiane ; 2016.

[6] : thèse de doctorat «ETUDE DE L'ENRICHISSEMENT DU GRES PAR CLASSIFICATION GRAVIMETRIQUE ET SEPARATION MAGNETIQUE : CAS DU GISEMENT D'EL AOUANA » ; CHAIB Abd slam ; 2010.