

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

*Ecole Nationale Polytechnique*

*Département Génie Minier*



**MEMOIRE DE Master en Génie Minier**

**Elimination du fer et des impuretés contenus dans le sable siliceux  
pour les besoins de l'industrie du verre et photovoltaïque.**

**Réalisé Par :**

**LAKEHAL Asma**

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

**Composition du Jury :**

**Présidente** Mme A.MERCHICHI M.A.A.Ecole nationale polytechnique

**Examineur** Dr R. AKKAL M.C.A.Ecole nationale polytechnique

**encadreur** Dr.OULD HAMOU M.C.A.Ecole nationale polytechnique

ENP 2017



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

*Ecole Nationale Polytechnique*

*Département Génie Minier*



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**MEMOIRE DE Master en Génie Minier**

**Elimination du fer et des impuretés contenus dans le sable siliceux  
pour les besoins de l'industrie du verre et photovoltaïque.**

**Réalisé Par :**

**LAKEHAL Asma**

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

**Composition du Jury :**

**Présidente** Mme A.MERCHICHI M.A.A.Ecole nationale polytechnique

**Examineur** Dr R. AKKAL M.C.A.Ecole nationale polytechnique

encadreur Dr.OULD HAMOU M.C.A.Ecole nationale polytechnique

## ***Remerciement***

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné tout de patience et de courage 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 ce mémoire. 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, ma sœur et mes amies qui m'ont encouragé et aidé pour réaliser ce travail.

# Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....	10
<b>Chapitre 1 :</b> .....	12
<b>Présentation de la zone d'étude</b> .....	12
Introduction.....	13
1.1. Situation géographique .....	13
1.2. Topographie .....	14
1.3. Aspect géologique .....	14
1.4. hydrogéologie.....	15
1.5. Minéralisation .....	15
<b>Chapitre2 :</b> .....	16
<b>L'élaboration du verre et des panneaux photovoltaïques</b> .....	16
Introduction.....	17
2. La silice .....	17
2.2. Silice : matière première pour le verre .....	18
2.2.1. Définition.....	18
2.2.2. Composition du verre .....	19
2.2.3. Opérations de l'élaboration du verre.....	19
2.2.3.1. Préparation des matières premières.....	19
2.2.3.2. Mise en forme du verre (transformation à chaud) .....	19
2.2.3.3. Traitement thermique du verre .....	20
2.2.3.3.1. Conditionnement thermique (1530 à 1000°C).....	20
2.2.3.3.2. Conditionnement du verre pour obtenir la viscosité nécessaire au façonnage .....	20
2.3. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque.....	20
2.3.1. Industrie photovoltaïque.....	21
2.3.2. Fabrication des cellules photovoltaïques .....	21
Chapitre III : .....	23
Généralité sur les méthodes de séparation .....	23
Introduction.....	24
3.1. La lixiviation.....	24
3.2. Conditions et paramètres.....	25

3.3. Le pH du milieu.....	25
3.5. Température du milieu .....	25
2.4. La séparation magnétique.....	26
2.4.1. Matrice d'extraction.....	26
2.4.2. Circuits conventionnels (électroaimants) .....	26
2.5. Séparation gravimétrique.....	27
Chapitre IV :.....	30
Partie expérimentale.....	30
Introduction.....	31
3. La caractérisation minéralogique du minerai.....	31
3.1. Analyse chimique .....	31
3.2. Analyse microscopique.....	32
3.3. Essais d'enrichissement du minerai de sable .....	33
3.3.1. La séparation magnétique.....	33
3.3.2. Essai de séparation magnétique par voie sèche .....	34
3.3.3. Essai de séparation gravimétrique .....	35
3.3.4. Résultats .....	35
A. Deuxième procédé d'enrichissement.....	36
3.3.5. L'essai de la lixiviation .....	36
3.3.6. Résultats .....	36
3.3.7. Analyse microscopique.....	37
3.3.7.1. Enrichissement par séparation magnétique suivi d'une concentration gravimétrique	37
3.3.7.2. Enrichissement par séparation magnétique suivi d'une lixiviation et concentration gravimétrique .....	37
3.3.8. Interprétation .....	38
Conclusion générale .....	39
Conclusion générale .....	40
<b>Bibliographie des références</b> .....	41

## ملخص

تعرف صناعة الزجاج مشاكل مزدحمة فيما يخص نوعية المواد الخام و هي السيليكا. السيليسيوم ذو الجودة الشمسية كمادة خام لمجموعة العمليات الخاصة الضوئية (PV) يتطلب نسب نقاء عالية (> 99.9999%). لتحسين نوعية المواد وتطبيقاتها في هذين المجالين، أخضعنا عينات من الرمال مستودعة من ودائع الرمل الكوارتزي سيدي بوعلي لتقنيات توصيف مختلفة بما في ذلك: الطيف (XRF)، والتحليل المجهرى. وبناء على هذه التحليلات، نجد أن الرمال تحتوي على شوائب ضارة مثل الهيماتيت والطين بنسب مرتفعة ما يحد من استخدامه في الصناعات النبيلة.

الهدف من هذه الدراسة هو اختبار فعالية تحسين الرمال بأساليب الفصل للحصول على منتج للتسويق لا يقل عن 99% SiO<sub>2</sub>.

كلمات البحث: رمل السيليكا، رمل سيدي بوعلي، الفصل المغناطيسي، وفصل الجاذبية، الزجاج، و الخلايا الكهروضوئية.

## Abstract

The glass industry is too frequented by the quality problems posed by the raw material, which is silica. Thus, Solar grade silicon SoG as raw material for photovoltaics (PV) requires high purity (> 99.9999%). In order to improve the quality of this material and its application in these two fields, we have characterized the sand brought back from the Sidi Bou-Ali deposit with different characterization techniques, namely: X-ray fluorescence spectrometry and microscopic analysis. According to these analyzes, sand is found to contain harmful inclusions such as hematite and clay with higher contents which limit its use in noble areas.

The objective of this study is well tested the sand enrichment efficiency with these separation methods in order to obtain a commercial product titrating at least 99% of SiO<sub>2</sub>.

**Keywords :** Silica sand, Sidi Bou-Ali sand, magnetic separation, gravimetric separation, leaching, glass, photovoltaic.

## **Résumé**

L'industrie du verre est trop fréquentée par des problèmes de qualité posés par la matière première qui est la silice. Ainsi, Le silicium de qualité solaire SoG comme matière première pour photovoltaïques (PV) exige une grande pureté (> 99.9999%). Afin d'améliorer la qualité de cette matière et son application dans ces deux domaines, nous avons caractérisé le sable ramené du gisement de Sidi Bou-Ali avec différentes techniques de caractérisation à savoir : La spectrométrie de fluorescence X et L'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 qui limitent son utilisation dans des nobles domaines.

L'objectif de cette étude est de tester l'efficacité d'enrichissement du sable avec les différentes méthodes de séparation en vue d'obtenir un produit marchand titrant au moins 99% en SiO<sub>2</sub>.

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



## Liste des tableaux

<b>TABLEAU 1: RESULTATS D'ANALYSE CHIMIQUE PAR FLUORESCENCE X.....</b>	<b>31</b>
<b>TABLEAU 2: RESULTAT DE LA SEPARATION GRAVIMETRIQUE.....</b>	<b>35</b>
<b>TABLEAU 3: RESULTATS.....</b>	<b>36</b>

# Liste des figures

FIGURE 1: SITUATION GEOGRAPHIQUE. ....	13
FIGURE 2: CARTE TOPOGRAPHIQUE. ....	14
FIGURE 3: PROFIL DE SOL TYPE DE CHLEF (CARTE PRODUITE A PARTIR DE PETROVSKI AND AL., 1993).....	14
FIGURE 4: MINERALISATION.....	15
FIGURE 5: UTILISATION DE LA SILICE. ....	18
FIGURE 6: INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES.....	21
FIGURE 7: FABRICATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES. ....	22
FIGURE 8: TABLE A SECOSSE. ....	29
FIGURE 9: ANALYSE MICROSCOPIQUE. ....	32
FIGURE 10: SCHEMA D'ENRICHISSEMENT.....	33
FIGURE 11: SEPARATEUR MAGNETIQUE SMHI (SMBI). ....	34
FIGURE 12: TABLE A SECOSSE.....	35
FIGURE 13: PROCEDE DE LIXIVIATION. ....	36
FIGURE 14 RESULTATS DE LA ZONE 3.                      FIGURE 15: RESULTATS DE LA ZONE4. ....	37
FIGURE 16: RESULTATS DE LA ZONE 3.                      FIGURE 17: RESULTATS DE LA ZONE 4. ....	37

## Liste des abréviations

Abréviation	nom	unité
SONAREM	Société Nationale de la Recherche Minière.....	
EREM	étude et réalisation d'ensemble mécanique.....	
ENOF	Entreprise Nationale des métaux Non-Ferreux.....	
G	Gramme.....	
Kg	kilogramme.....	
H	Heure.....	
%	Pourcentage.....	
µm	Micromètre.....	
L	Litre.....	
t	tonne.....	
M	Masse.....	(g)
T	Température.....	(c°)
V	Volume.....	(ml)

# Introduction générale

## Introduction Générale

Dans l'industrie du verre et photovoltaïque, les exigences de qualité imposées par les utilisateurs deviennent de plus en plus importantes. Ces industries connaissent, comme tous les autres secteurs industriels, l'accroissement de la sévérité des normes en matière d'environnement mais aussi des problèmes liés à la fabrication du verre, comme celui de la corrosion des matériaux utilisés.

La silice qui est le constituant principal du verre et la principale matière première dans la fabrication des modules photovoltaïques, est apportée à partir des gisements de sable ou bien des gisements de grès.

Il est à noter que 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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ce qui influe sur la qualité du verre.

L'Algérie possède une importante réserve naturelle de silice. Malgré cette richesse, l'utilisation de sables siliceux en Algérie reste limitée suite à la qualité du matériau renfermant des inclusions minérales nocives. C'est le cas du gisement de sable quartzueux

Sidi Bou-Ali où la présence d'impuretés notamment l'oxyde de fer limite industriellement l'utilisation du sable siliceux dans de nobles domaines tels que la production du verre de qualité.

Le gisement de sable quartzueux Sidi Bou-Ali (Chélif) est la principale source de la silice utilisée pour la verrerie. Le sable provenant de ce gisement subit un traitement pour éliminer les impuretés néfastes à l'élaboration des verres et leur qualité, à savoir les oxydes de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ainsi que les métaux lourds.

La qualité des différents types de verre dépend fortement de la qualité de la matière première (résistance mécanique, dilatation, réflexion des rayons, ...etc). De ce fait, le choix d'un procédé adéquat de traitement permettra d'atteindre les qualités désirées, et cela fait l'objet de notre présente recherche sur l'étude du sable par classification gravimétrique et séparation magnétique : cas du gisement de Sidi Bou-Ali.

Les chapitres développés dans ce mémoire traitent les objectifs visés par cette recherche :

- Le chapitre 1 nous renseigne sur le gisement de sable quartzueux Sidi Bou-Ali Chélif.
- Le chapitre 2 est dédié à l'élaboration du verre et des panneaux photovoltaïques.
- Le chapitre 3 traite des généralités sur les méthodes de séparations.
- Le chapitre 4 est réservé aux essais réalisés, donc à la partie expérimentale.

# **Chapitre 1 :**

## **Présentation de la zone d'étude**

## Introduction

Le gisement de sable siliceux de Sidi Bou-Ali (Chéelif) a été mis en évidence et prospecté conformément à la tâche assignée par le département de prospection et évaluation de l'EREM, et ce, sur commande de la direction générale de l'ENOF.

### 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-Chéelif. Les coordonnées en système Lambert sont :

**375 050-375 950**

**332090-333 060**

Les cotes absolues du relief sont réparties entre 340 m et 420 m. La station de chemin de fer la plus proche est à 15 km (Ech-Chéelif) ; 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 Chéelif à cours d'eau permanent. [1]



Figure 1: situation géographique.

### 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 labourables d'état. [2]

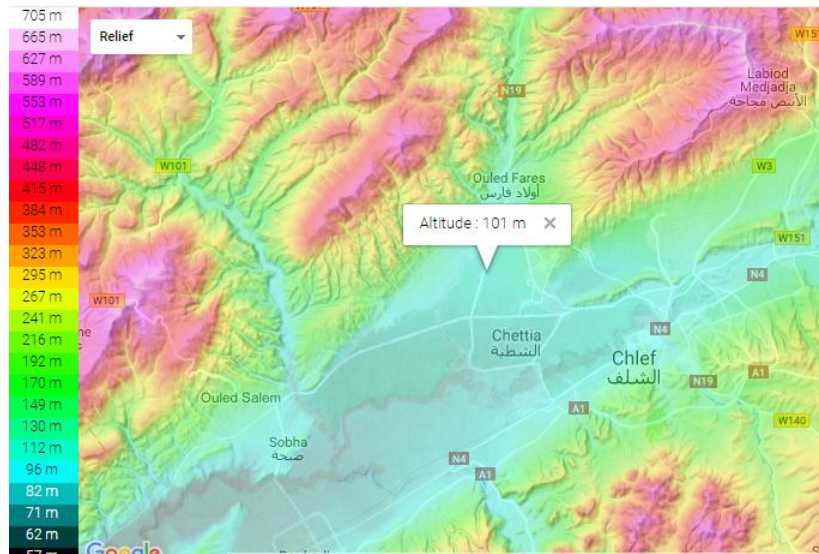


Figure 2: carte topographique.

### 1.3. Aspect géologique

Les sables quartzeux du gisement de SIDI B OU-ALI sont d'origine marine et datent du miocène. Ils sont recouverts par les argiles de composition différente et par les sables quartzeux villafranchiens. Dans les limites du gisement, l'épaisseur des argiles varie de 0 à 19.9 m étant égale en moyenne à 9 m environ. [3]

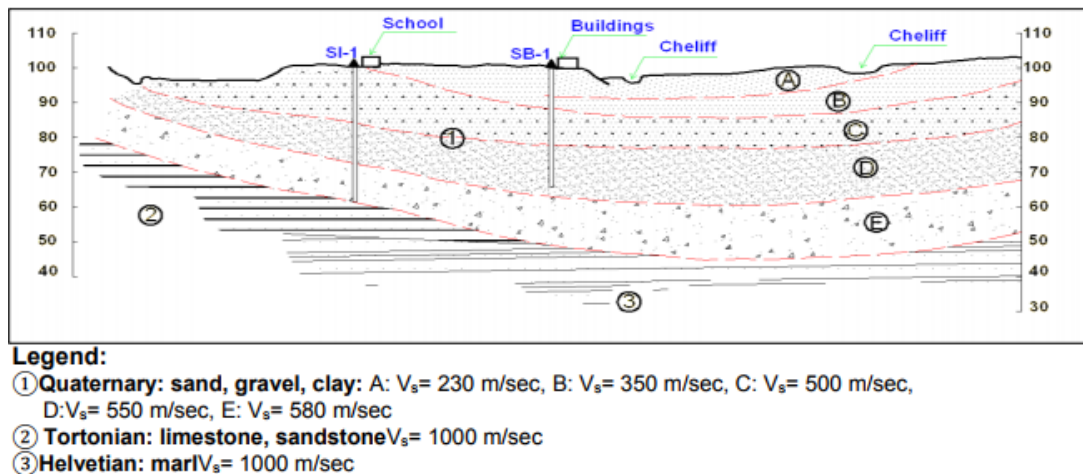


Figure 3: profil de sol type de Chlef (carte produite à partir de Petrovski and al., 1993)



## 1.4. hydrogéologie

L'hydrogéologie du gisement présente les conditions favorables à l'exploitation, les réserves de la substance utile n'étant pas inondées. Les précipitations atmosphériques ne provoquent pas de difficultés, car elles s'infiltrent aux niveaux inférieurs. [4]

## 1.5. Minéralisation

La substance utile est présentée par trois variétés de sable blanc, jaune, brun. 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. [5]

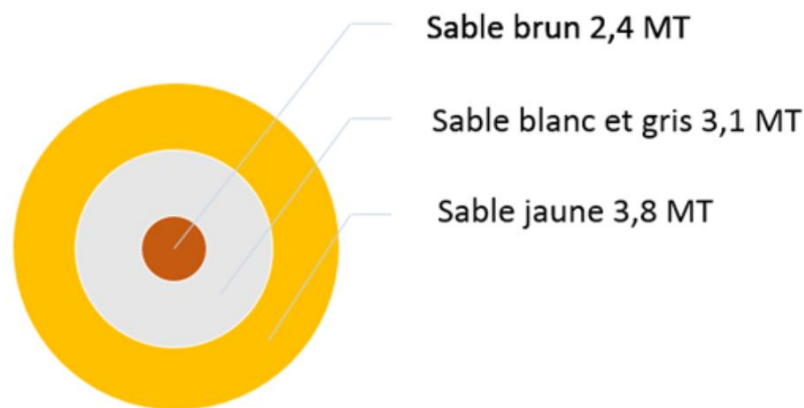


Figure 4: minéralisation.

## Conclusion

Le gisement de SIDI BOU-ALI est aménagé pour la mise en valeur. Les réserves des sables quartzueux prospectées en catégories commerciales constituent 9.9 millions de tonnes. Les réserves de catégorie B (3.1 mln de t) sont mises en évidence dans le secteur le plus avantageux économiquement qui doit être exploité en première priorité.

---

# **Chapitre2 :**

## **L'élaboration du verre et des panneaux photovoltaïques**

## Introduction

La silice, sous forme de sables siliceux de haute pureté, représente un composant principal utilisé dans de diverses applications telles que la fabrication des verres, les céramiques, les fonderies et même pour la fabrication des cellules photovoltaïques.

### 2. La silice

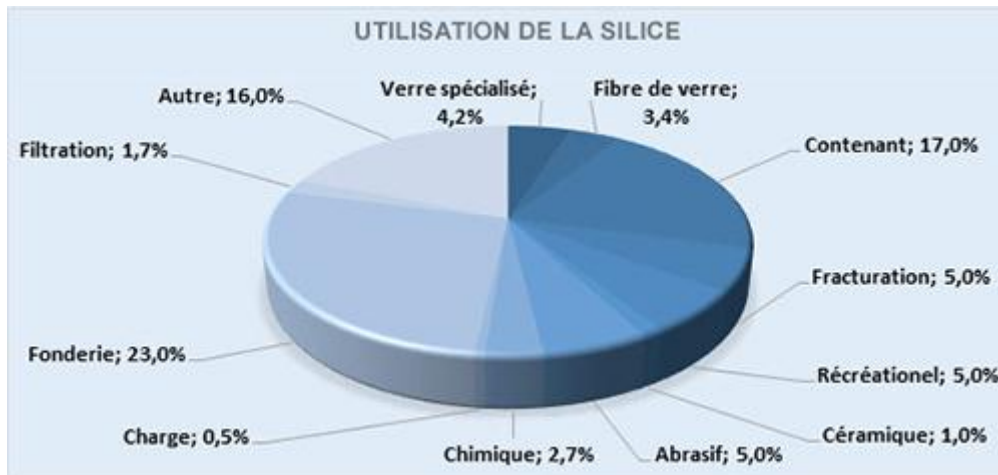
La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique  $\text{SiO}_2$ . La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre.

La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :

- Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès),
- Les roches métamorphiques, (schistes, gneiss, quartzites) (Les roches métamorphiques sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches.
- Les roches magmatiques.

#### 2.1. Utilisations

- Verre plat
- Verre creux - Conditionnement
- Fibre de verre
- Cristallerie
- Verres techniques (optique, photovoltaïque)
- Lave de verre. [6]



**Figure 5: Utilisation de la silice.**

## 2.2. Silice : matière première pour le verre

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'Homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux.

La matière a subi une longue évolution depuis son état naturel jusqu'aux dernières innovations pensées par l'Homme. Cette progression est riche d'éléments ; il est donc indispensable de distinguer les différents procédés de fabrication, des différents types de verre et de leurs applications respectives en passant par la connaissance de leur composition chimique.

### 2.2.1. Définition

Le mot verre représente à la fois une matière, à vocation artistique ou technologique, et des objets, articles ménagers ou composants pour l'industrie.

Par définition le verre est un corps solide, transparent, obtenu par la fusion du sable mêlé de chaux et de potasse ou de soude. Il existe de nombreuses catégories de verre définies par des verriers ou par des scientifiques. Pour les verriers, c'est un solide altérable par les agents atmosphériques et renfermant plus de 60% de silice. Pour les scientifiques, c'est une substance amorphe, présentant l'état solide ou de liquide surfondu, transparent, translucide ou opaque, sonore avec une cassure brillante et pouvant passer par toutes les phases de l'état pâteux par élévation de température.

### 2.2.2. Composition du verre

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec l'oxygène ( $\text{SiO}_2$ ) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes formateurs car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits « modificateurs » qui sont : les fondants, qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs. Les stabilisants, qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

### 2.2.3. Opérations de l'élaboration du verre

L'élaboration du verre est un procédé chimique, étant l'ensemble des opérations physiques, physico-chimiques et chimiques au cours desquelles avec l'aide de calories le mélange vitrifiable (en état de phase solide) est transformé en une masse liquide, homogène, de viscosité convenable pour pouvoir être mis en forme par des procédés manuels ou mécaniques. Les dispositifs, dans lesquels l'élaboration du verre est réalisée sont des fours verriers. Le produit des fours verriers est le verre apte pour le façonnage.

- L'élaboration du verre correspond à quatre opérations successives :
- La préparation des matières premières
- Mise en forme du verre (transformation à chaud)
- Traitement thermique du verre

#### 2.2.3.1. Préparation des matières premières

Le composant de base de la fabrication du verre est le sable ou, plus précisément, la silice ( $\text{SiO}_2$ ) qu'il contient.

L'ennui, c'est que la silice a la fâcheuse tendance à ne fondre qu'à des températures très élevées, supérieures à  $1.700\text{ }^\circ\text{C}$ . Alors, pour faciliter le processus, on lui ajoute des fondants comme la soude, la potasse ou la chaux. On ajoute également de l'eau et des débris de verre recyclé que l'on nomme « calcin ». Le tout dans des proportions définies.

#### 2.2.3.2. Mise en forme du verre (transformation à chaud)

Une fois fondu, et avant son refroidissement, le verre peut être mis en forme selon différentes techniques. Il peut, par exemple, être soufflé, coulé dans un moule ou encore flotté sur un bain d'étain.

### 2.2.3.3. Traitement thermique du verre

Le verre a ensuite généralement besoin d'être renforcé grâce à l'application d'un traitement thermique. Pour supprimer les points de tension qui s'installent lors du refroidissement, on peut avoir recourt à une re-cuisson à des températures allant jusqu'à 600 °C.

#### 2.2.3.3.1. Conditionnement thermique (1530 à 1000°C)

La température diminue et les dernières bulles remontent à la surface. Appelée « braise » au XVIIIème siècle, cette phase consiste à abaisser la température du mélange pour lui donner une viscosité adaptée au façonnage.

#### 2.2.3.3.2. Conditionnement du verre pour obtenir la viscosité nécessaire au façonnage

A la température de l'affinage et de l'homogénéisation, le verre fondu est très liquide ayant une viscosité trop faible pour le façonnage. Lors d'un refroidissement lent, la viscosité augmente, le verre fondu devient de plus en plus visqueux. Dans la pratique de l'industrie du verre, la mesure directe de la viscosité est devenue difficile et compliquée, c'est pourquoi on mesure la température qui est facile à réaliser. Cette substitution est possible sur la base de la corrélation stricte entre la viscosité et la température du verre. [7]

## 2.3. La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Connu par ses propriétés semi-conductrices, le silicium s'est imposé comme le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque, responsable de l'effet photovoltaïque et c'est le semi-conducteur le plus utilisé aujourd'hui dans les circuits intégrés.

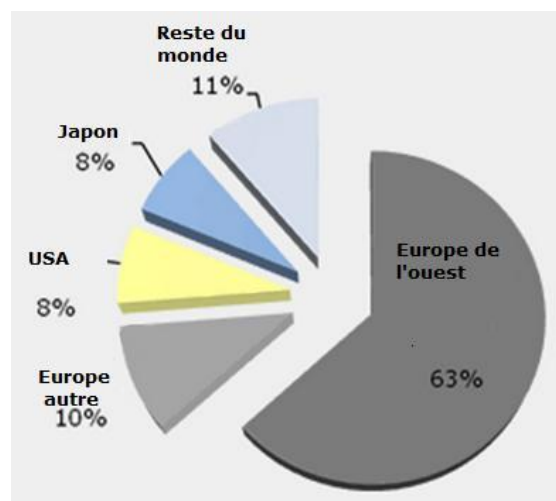
Le silicium n'existe pas dans la nature à l'état libre. On le trouve principalement, sous forme de dioxyde, dans la silice et dans les silicates (feldspaths, kaolinite par exemple...).

### 2.3.1. Industrie photovoltaïque

L'énergie solaire désigne l'énergie produite par le rayonnement du Soleil et circulant dans l'univers sous forme d'ondes électromagnétiques, les photons.

Cette énergie est donc sous-exploitée et apparaît inépuisable. Les panneaux photovoltaïques sont en forte expansion à travers le monde. En effet, ils présentent une alternative viable aux énergies fossiles qui s'épuisent (en 2010, leur capacité de production mondiale était de 34 000 MW, soit 17% de la consommation énergétique mondiale), tout en ayant un impact environnemental quasi-nul. Le gouvernement français prévoit d'atteindre 23% d'énergie renouvelable en 2020. La production d'énergie d'origine solaire a donc de l'avenir.

Les installations photovoltaïques se concentrent en Europe, particulièrement en Allemagne. Néanmoins, le parc mondial de panneaux solaires a augmenté de 66% en 2010 grâce à la diminution constante des prix et l'augmentation des rendements. De cette manière, son utilisation va vraisemblablement se généraliser durant les prochaines années.



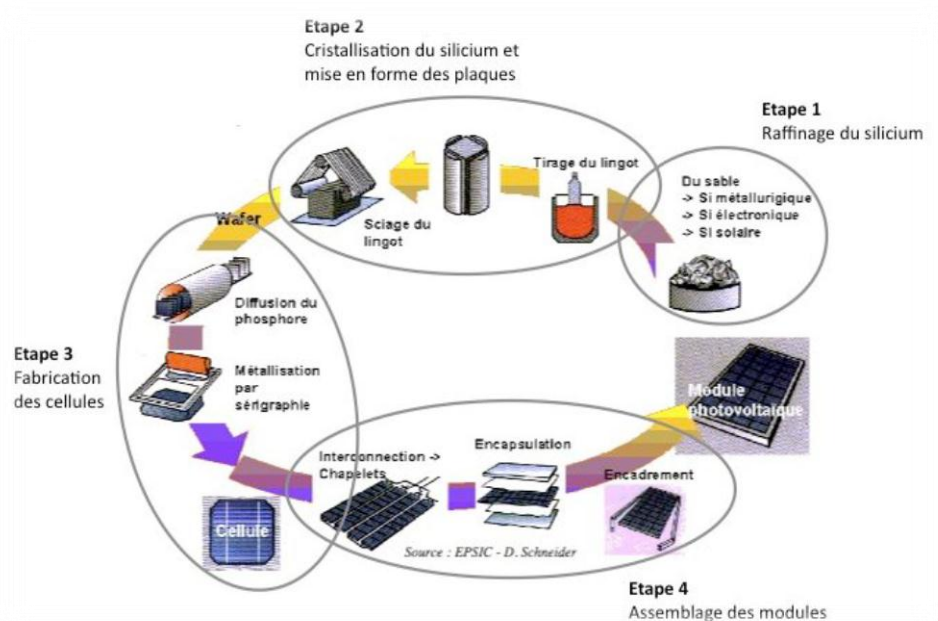
**Figure 6: Installations photovoltaïques.**

### 2.3.2. Fabrication des cellules photovoltaïques

La fabrication d'un panneau photovoltaïque suit différentes étapes. Il s'agit dans un premier temps d'élaborer du Silicium de grade solaire utilisable pour former des plaques de Silicium. Vient ensuite la fabrication des cellules en elles-mêmes, leur assemblage en modules et la composition d'une installation finale avec sa structure porteuse, ses différents composants électriques et électroniques.

Le processus de fabrication donc comporte les étapes suivantes :

- **Etape 1** Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique, lui-même obtenu à partir de quartz.
- **Etape 2** Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques.
- **Etape 3** Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.
- **Etape 4** Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.
- **Etape 5** Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques. [8]



**Figure 7: Fabrication des cellules photovoltaïques.**

Généralement, la silice qui est le composant principal de presque tous les types de verres et la source de silicium, le constituant essentiel d'une cellule photovoltaïque, ne se trouve pas pure dans la nature, utilisée sous forme de sables siliceux de haute pureté dit sable industriel ou sable extra siliceux avec plus de 98 % de silice. Les sables siliceux servent principalement aux industries du verre (50 %), de la fonderie (15 %) et du bâtiment (15 %). Outre la teneur en silice ce sable contient toujours des impuretés tels que le fer et l'alumine.



---

# **Chapitre III :**

## **Généralité sur les méthodes de séparation**

## Introduction

Les sables extraits de carrières ne sont pas utilisables en l'état et doivent être traités pour augmenter la teneur en silice, réduire le contenu d'impuretés (matière organique, oxydes, argiles, autres minéraux) et obtenir un produit marchand correspondant aux normes des utilisateurs industriels (pour les verres blancs par exemple  $\text{SiO}_2 > 99 \%$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,03 \%$ ). Tout ça a poussé les chercheurs dans ce domaine de trouver un processus de valorisation de ce minerai selon les exigences qualitatives et quantitatives pour des fins de l'industrie, et d'optimiser des méthodes de purification du sable pour objet d'éliminer ces impuretés.

Il existe plusieurs méthodes de séparation utilisées pour l'enrichissement des sables siliceux, elles varient selon la nature des impuretés présentes dans le sable.

### 3.1. La lixiviation

La lixiviation désigne une technique de lessivage de produits solides par un solvant approprié, de façon à en extraire les parties solubles. Le processus implique :

1. La dissolution du métal dans un milieu aqueux, généralement acide.
2. Transfert du métal dissous à une solution organique.
3. Transfert des métaux dissous à une deuxième solution aqueuse.
4. Production d'un produit.

La lixiviation peut être réalisée de quatre manières différentes en fonction de critères tels que la conduite des opérations ou les coûts d'investissement.

a) La lixiviation en réacteur agité : C'est la plus employée dans le cadre du traitement des minerais riches. Elle peut être réalisée en continu ou en discontinu. Elle implique la séparation solide-liquide (décantation, floculation ; filtration)

b) La lixiviation sous pression : Elle se déroule en autoclave à des températures et des pressions élevées. Les autoclaves doivent pouvoir résister aux conditions de température et de pression qui peuvent dépasser  $200^\circ\text{C}$  et plusieurs Méga Pascals. Leur conception en acier inoxydable ou en alliages spéciaux leur permet de résister à la corrosion.

c) La lixiviation en tas : Elle consiste à disposer le minerai grossièrement concassé sur une aire étanche et le soumettre à un arrosage par une solution d'attaque.

d) La lixiviation bactérienne : Les procédés mis en œuvre dans la technique de biolixiviation sont multiples, mais peuvent être regroupés en deux grandes familles : les procédés statiques et les procédés dynamiques, le but étant de récupérer le métal d'intérêt sous forme dissoute, qui sera ensuite précipité par extraction sur solvant ou par électrolyse.

### 3.2. Conditions et paramètres

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. L'oxyde de fer étant insoluble dans l'eau, mais la solubilité de l'oxyde de fer peut être augmentée en jouant sur le pH avec des acides et des réactifs réducteurs. 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 et l'acide oxalique.

Les effets de certains paramètres importants sur l'efficacité de lessivage tels que la température, le pH, la durée de lixiviation, et le rapport solide/liquide.

### 3.3. Le pH du milieu

Le pH joue un rôle important dans le processus de lixiviation, les tests d'influence du pH en conditions expérimentales permettent la solubilisation du fer et semble efficace quand le pH est inférieur à 4, la récupération est significative.

### 3.4. 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.

### 3.5. Température du milieu

Le paramètre température joue un rôle très important dans la solubilité de fer. En ce qui concerne le mode opératoire, la lixiviation se déroule en batch, à température ambiante, avec un rapport solide/liquide suffisamment faible pour que la solubilisation soit totale et que le solide soit totalement dispersé et sous agitation afin d'accélérer le processus. La température plus élevée a une forte influence sur le rendement de lixiviation. Surtout, à la température la plus élevée de 90°C. Les progrès réels en matière de technologies de traitement des minéraux visent principalement à accroître l'offre de métaux nouvellement utilisés dans l'industrie et à réduire le coût du processus d'enrichissement. [9]

## 2.4. La séparation magnétique

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

La séparation magnétique est accomplie par entraînement des matériaux susceptibles lors de leur passage à travers un champ magnétique. Ce dernier peut être produit à l'aide d'un aimant permanent ou d'un électroaimant. L'utilisation des électroaimants comporte plusieurs avantages dont la possibilité d'ajuster l'intensité du champ magnétique en variant l'intensité du courant électrique. De plus, le champ magnétique produit par les électroaimants peut atteindre une intensité plus élevée que l'intensité d'un champ engendré par des aimants permanents.

La grosseur et la masse volumique des particules influencent le traitement. La séparation des grosses particules denses requiert un champ magnétique plus intense que la séparation des petites particules légères. Il est essentiel de souligner que l'efficacité du procédé dépend du degré de libération ou de la pureté des matériaux à séparer.

Il existe deux catégories d'équipements de séparation magnétique : les séparateurs à haute intensité et les séparateurs à basse intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux, soit les séparateurs humides et les séparateurs à sec.

### 2.4.1. Matrice d'extraction

La matrice d'extraction est l'organe d'un appareil de séparation magnétique. Elle est la source du champ magnétique, d'où l'origine de la force utilisée pour la séparation. Elle se présente en deux catégories essentielles, aimants permanents et des circuits conventionnels (électroaimants).

Les aimants permanents classiques sont utilisés dans les séparateurs magnétiques à basse intensité destinés à la séparation des substances ferromagnétiques.

Les aimants d'énergie spécifique, à base de terre rare Co5RE, peuvent être utilisés dans les séparateurs à haute intensité en voie sèche ou humide.

### 2.4.2. Circuits conventionnels (électroaimants)

Ils forment une matrice ferromagnétique sous forme d'un bobinage en cuivre. Un supraconducteur, assurant un gradient d'énergie magnétique suffisante à effectuer une séparation, ce type de matrice présente un avantage par rapport aux aimants permanents dont le fait que le gradient soit réglable ce qui permet de les utiliser dans la séparation des

substances de différente susceptibilité magnétique. Une telle matrice trouve une large application dans les séparateurs magnétiques en voie humide ou sèche.

La matrice d'extraction est le matériel qui est placé dans un champ magnétique, s'aimante, concentre les lignes de champ magnétique et de ce fait génère un gradient de champ et une force. Les configurations de matrice les plus couramment utilisées sont représentées sous forme de (plaques dentées, billes, mousse de fer expansé, bobines de différentes formes...) [10].

## 2.5. Séparation gravimétrique

La concentration par gravité sépare les minéraux selon la différence de leurs densités. Ce procédé est efficace lorsqu'il est appliqué sur un éventail restreint de grosseurs de particules.

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

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...).

La séparation par gravité utilise les différences de masse volumiques des particules à séparer. En effet, il est possible d'estimer l'applicabilité d'une telle approche à l'aide de la formule suivante :

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

Où

$C_T$ : Critère de Taggart.

$\rho_L$  : représente la masse volumique de la phase solide lourde,

$\rho_l$  : la masse volumique de la phase solide légère et  $\rho_f$  : la masse volumique du fluide.

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

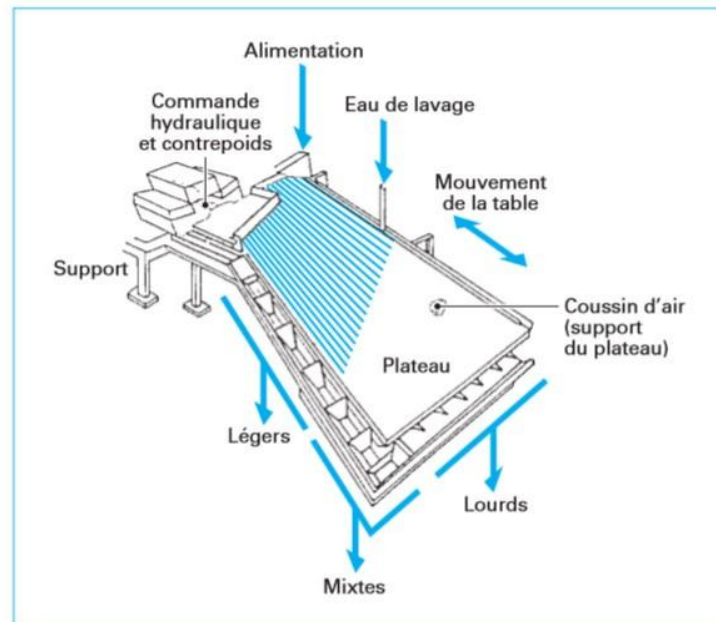
- Milieu dense : cette méthode met seulement en jeu la force de gravité des particules. On utilise pour cela un milieu organique en laboratoire ou une suspension aqueuse et dense d'un matériau fin à l'échelle industrielle.
- pulsation stratification (accélération différentielle) : elle est basée sur les sédimentations différentielles entre les particules lourdes et légères provoquées par le mouvement périodique. On utilise pour cela des bacs à piston.
- nappe pelliculaire fluente : il s'agit d'une nappe d'eau de faible épaisseur (quelques mm à quelques cm) s'écoulant sur un plan incliné. Les particules, suivant leur vitesse de chute et leur résistance au mouvement, se séparent en plusieurs catégories densimétriques.

Le choix de telle méthode dépend des propriétés physico-chimiques et minéralurgiques du minerai à séparer. Dans notre cas, la séparation se fait par table à secousses.

Les tables à secousses sont composées d'une table légèrement inclinée (réglable de  $0^\circ$  à  $6^\circ$ ) dans le sens de la largeur et équipée d'un mécanisme qui lui communique longitudinalement un mouvement de va-et-vient asymétrique. L'amplitude et la vitesse de ce mouvement sont aussi réglables, la surface de la table est couverte de rainures longitudinales et parallèles dont la profondeur diminue progressivement à partir du point d'alimentation de la pulpe jusqu'à la sortie qui est diamétralement opposée (figure 8).

L'eau de lavage qui s'écoule sur la table entraîne les particules légères dans la direction transversale (vers le bas). La stratification des particules entre les rainures se produit sous l'action des secousses et du courant d'eau de lavage. Les secousses contribuent à dilater le lit de particules afin de permettre aux grosses particules denses de le traverser jusqu'à la surface de la table.

L'effet des secousses entraîne la formation de deux couches de particules distinctes dont l'une est composée de particules de masse volumique élevée (couche inférieure) et l'autre de particules de masse volumique faible (couche supérieure). Les particules lourdes sont acheminées longitudinalement à l'autre extrémité de la table grâce à la direction et à la nature asymétrique des secousses.



**Figure 8: Table à secousse.**

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 riffles, et l'entraînement des légers et fins par le courant. Et à 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. [10]

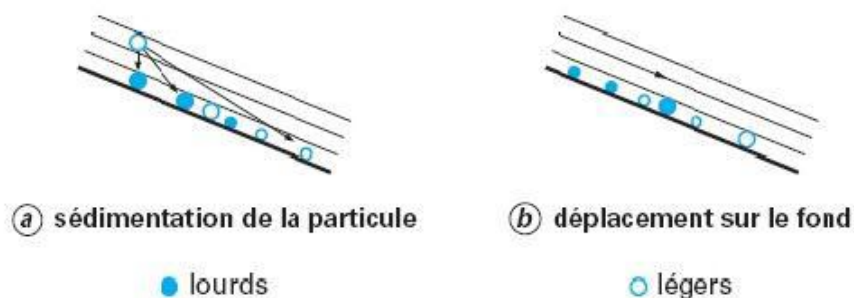


Figure 9:schéma du principe de classification par NPF.

---

# **Chapitre IV :**

## **Partie expérimentale**



## Introduction

Cette partie consiste à traiter le sable quartzueux ramené de la carrière en commençant par la caractérisation minéralogique, par la suite, nous avons soumis le sable aux différentes méthodes de séparation (la séparation magnétique, lixiviation et concentration gravimétrique) afin d'obtenir un produit fini qui répond aux exigences de l'industrie du verre et photovoltaïque.

### 3. La caractérisation minéralogique du minerai

#### 3.1. Analyse chimique

Afin de déterminer les éléments constituant le minerai étudié, une analyse chimique du tout venant, a été réalisée par fluorescence X ; les résultats obtenus sont reportés sur le tableau ci dessous :

<b>Elément chimique</b>	<b>Teneur en %</b>
SiO <sub>2</sub>	<b>97.84</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.52</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.461</b>
CaO	<b>0.011</b>
MgO	<b>0.015</b>
Na <sub>2</sub> O	<b>0.059</b>
TiO <sub>2</sub>	<b>0.077</b>
K <sub>2</sub> O	<b>0.008</b>

**Tableau 1: Résultats d'analyse chimique par fluorescence X.**

### 3.2. Analyse microscopique

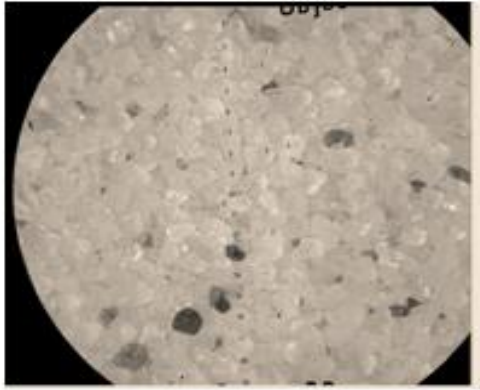


Figure 28: Classe [-250+40]  $\mu\text{m}$ .

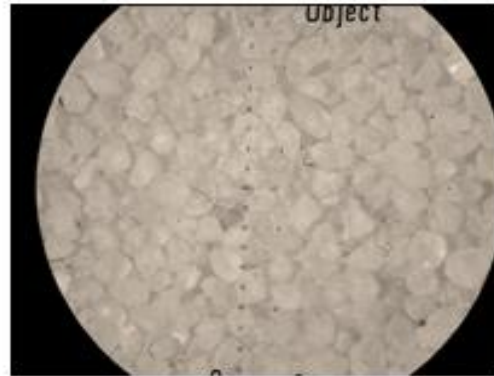


Figure 27: Classe [-250+315]  $\mu\text{m}$ .

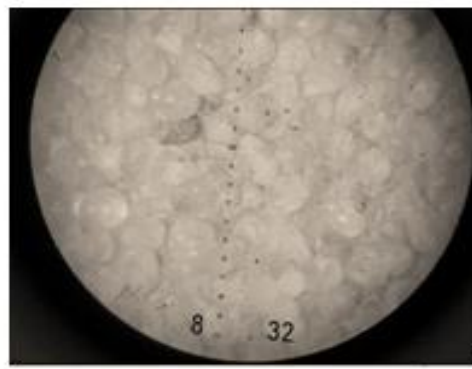


Figure 29: Classe [-400+315]  $\mu\text{m}$ .

#### Figure 10: Analyse microscopique.

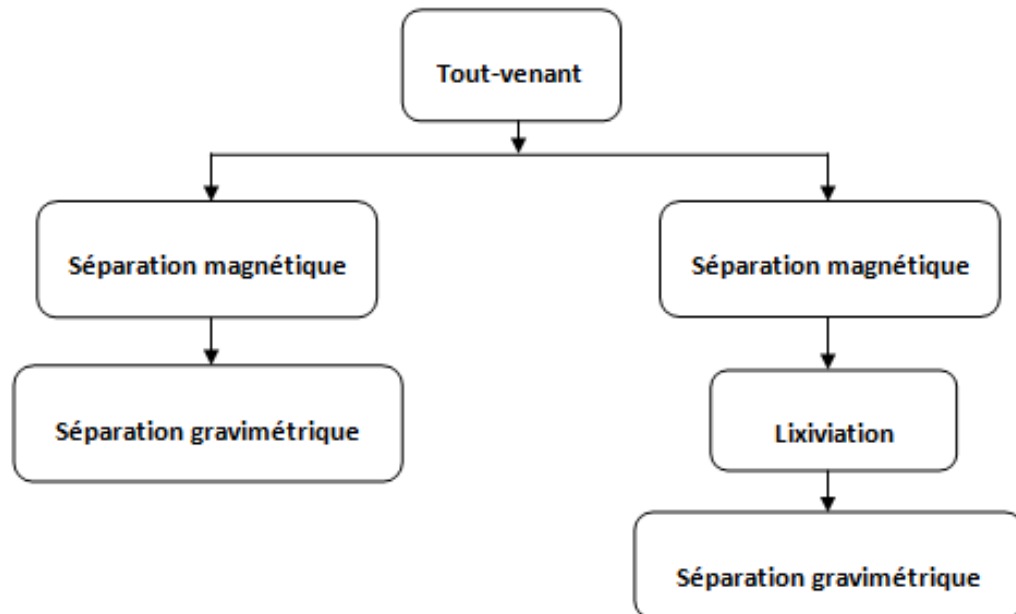
- Interprétation

L'observation au microscope optique, nous a permis d'identifier et de qualifier les minéraux en évidence selon les points suivants :

- Le quartz : il apparaît dans une couleur blanche, les grains sont Majoritairement arrondis.
- Les oxydes de fer : ils se présentent sous forme de grains indépendants. Ils sont opaques et apparaissent sous une couleur noire ou rougeâtre.
- Les analyses microscopique des différentes fractions granulométriques de sable ont montré des caractéristiques de texture très similaires, les grains de quartz se trouvent fréquemment libérés dans ces classes granulométriques de granulométrie inférieure à 400  $\mu\text{m}$ , néanmoins des traces d'oxyde de fer sont toujours détectées sur les particules de la silice.

### 3.3. Essais d'enrichissement du minerai de sable

Afin d'identifier le minerai de sable objet de cette étude, et d'éliminer ces impuretés, il est nécessaire d'élaborer un schéma technologique qui devrait être respecté pour la réalisation des essais d'enrichissement de ce minerai.



**Figure 11: Schéma d'enrichissement.**

Au début, nous avons testé la méthode d'enrichissement par séparation magnétique et gravimétrique sans lixiviation, puis on a effectué les essais de séparation magnétique suivie d'une lixiviation avant de passer à la séparation par la méthode gravimétrique.

- Le premier procédé d'enrichissement

Cette étape consiste à soumettre un échantillon de sable à une séparation magnétique par voie sèche et puis le concentré obtenu par cette opération fera l'objet d'une concentration gravimétrique.

#### 3.3.1. La séparation magnétique

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.

Les particules ayant une successibilité magnétiques adhèrent au rotor sous l'influence de la force magnétique et sont portées par la rotation dans une zone de champ magnétique forts 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 déversés dans le côté opposé. Comme le montre la figure :



**Figure 12: Séparateur magnétique SMHI (SMBI).**

### 3.3.2. Essai de séparation magnétique par voie sèche

Une prise d'essai  $M = 500$  g sera introduite dans l'alimentateur sous un champ magnétique intense  $H=14$  ampères avec une ouverture du clapet de  $36^\circ$  par rapport à l'horizontale (orientation vers la droite).

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

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

Tableau 2: résultats de la séparation magnétique.

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).

### 3.3.3. Essai de séparation gravimétrique

Le produit obtenu après la séparation magnétique fera l'objet d'une séparation gravimétrique par table à secousse.

Cet essai consiste à mettre une masse du minerai (500 g pour chaque essai) dans la boîte d'alimentation puis on introduit un débit d'eau considérable pour avoir un arrosage suffisant et enfin on récupérera les produits de chaque zone.



**Figure 13: Table à secousse.**

### 3.3.4. Résultats

	Masse à l'alimentation (g)	Masse du concentré (g)	Rendement pondéral du concentré %
Essai 1	500	470	94
Essai2	500	471	94.2

**Tableau 3: Résultat de la séparation gravémitrique.**

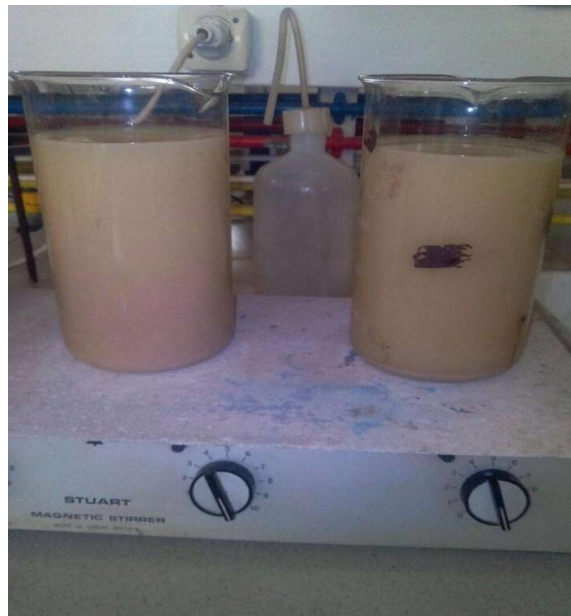
### A. Deuxième procédé d'enrichissement

Nous avons effectué un essai de séparation magnétique avec les mêmes conditions citées précédemment, puis le produit obtenu fera l'objet d'une lixiviation et d'une concentration gravimétrique.

#### 3.3.5. L'essai de la lixiviation

L'objectif de cette manipulation est d'étudier l'influence du lessivage sur le déroulement du processus de dissolution d'impureté.

L'essai est effectué avec une prise d'essai de masse  $m=100$  g. Cette masse a été soumise à une attaque chimique par l'EDTA de concentration 0.01 mol/l avec un rapport solide-liquide de 10% solide et une agitation pendant 2h.



**Figure 14: Procédé de lixiviation.**

#### 3.3.6. Résultats

Une fois la durée de l'essai écoulée, on effectue l'essai de séparation gravimétrique par table à secousses. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Masse à l'alimentation(g)	Masse du concentré(g)	Masse du rejet(g)	Rendement pondéral du concentré(%)
200	287	10	93.5

**Tableau 4: résultats.**

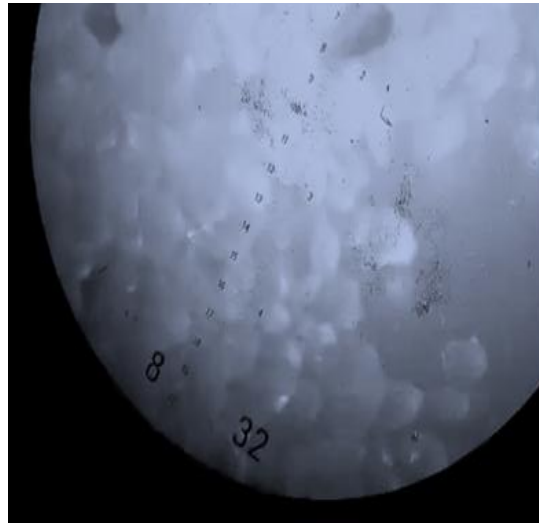


### 3.3.7. Analyse microscopique

#### 3.3.7.1. Enrichissement par séparation magnétique suivi d'une concentration gravimétrique

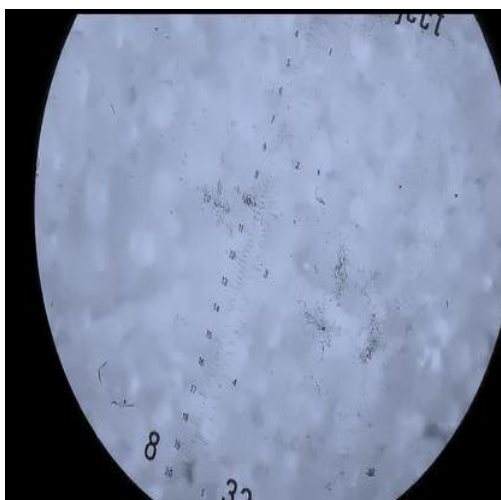


**Figure 15 résultats de la zone 3.**

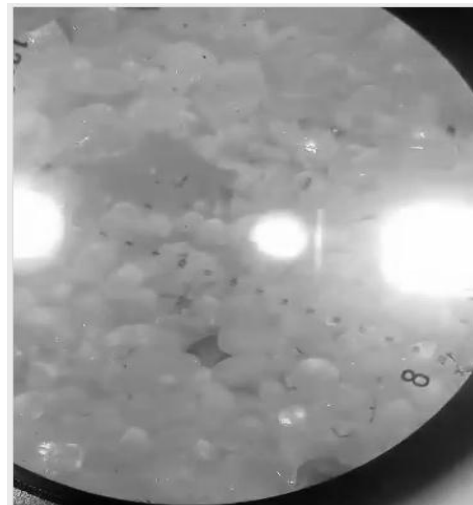


**Figure 16: résultats de la zone4.**

#### 3.3.7.2. Enrichissement par séparation magnétique suivi d'une lixiviation et concentration gravimétrique



**Figure 17: résultats de la zone 3.**



**Figure 18: résultats de la zone 4.**

### 3.3.8. Interprétation

1. La séparation magnétique en éliminant les minéraux lourds et les oxydes de fer ayant une faible susceptibilité magnétique avec une intensité max  $I=14$  Ampères et une ouverture de clapet de  $36^\circ$  permet d'éliminer les oxydes de fer de l'ordre de 0.4 %.
2. En appliquant la séparation magnétique suivie d'une séparation gravimétrique, on peut augmenter progressivement la qualité du sable avec une teneur de 5% d'impuretés.
3. L'utilisation de la séparation magnétique suivie d'une lixiviation et d'une concentration gravimétrique augmente la teneur en silice en éliminant les impuretés de fer et d'argile de l'ordre de 6%.
4. Les résultats des différents essais montrent que la lixiviation est une étape essentielle pour l'enrichissement du sable. Elle permet d'améliorer la qualité du sable avec la diminution du taux de fer et d'argile.

#### Conclusion

En appliquant la lixiviation par acide combinée avec les deux méthodes de séparation magnétique et gravimétrique on peut éliminer un taux importants des impuretés contenus dans le sable de l'ordre de 6%.



# Conclusion générale

## Conclusion générale

- Il existe plusieurs méthodes de séparation utilisées pour l'enrichissement des sables siliceux qui varient selon la nature des impuretés présentes dans le sable.
- Le choix des méthodes de traitement est lié aux propriétés physico-chimiques et minéralurgiques du minerai à séparer.
- La séparation magnétique à haute intensité est très importante pour l'enrichissement des sables siliceux et l'élimination des impuretés particulièrement le fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  à condition de respecter les règles de ce procédé (un champ magnétique, granulométrie...).
- La lixiviation en utilisant un agent de lixiviation efficace (l'EDTA dans notre cas) est une méthode de purification permettant l'élimination des impuretés du fer contenues dans le sable.
- Selon les résultats obtenus par la séparation gravimétrique, on constate une amélioration de la teneur en silice et élimination de la fraction argileuse avec diminution des impuretés de fer.
- La concentration gravimétrique permet l'obtention de concentré définitif en silice.
- la séparation électromagnétique combinée avec la concentration gravimétrique diminuent les teneurs en fer et en argile dans le gisement.
- Les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant la séparation magnétique suivie d'une lixiviation par acide et une concentration gravimétrique. L'élimination des impuretés est de l'ordre de 6%

## Bibliographie des références

[1], [2] : 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.

[3] : LITOVTCHEENKO N.J “sable quartzeux des wilayas nord-ouest algériens “. Fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbes.

[4], [5] : ENOF. fonds de l'EREM à Sidi Bel Abbes. «études pour l'évaluation des gisements de sables quartzeux de Sidi Bou Ali de Tadjna“.

[5] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Silice>.

[6] : James Barton et Claude Guillemet. LE VERRE SCIENCE ET TECHNOLOGIE

[7] : <http://tpesurlenergiesolaire.emonsite.com/pages/introduction.html#1Xr03Xx64YDmu8b3>.

[8] : Bouabdellah Sofiane, thèse de doctorat .

[9]: GILLET. Gérard. Séparation magnétique haute gradient (SMHG) et champ. (Techniques de l'Ingénieur, Novembre 2004).

[10] : Jean-Ren Michaud. Guide pour l'évaluation et le choix des technologies de traitement des sédiments contaminés. Document rédigé, 1994; N° de catalogue: En 40 450/1993F.