



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculty of Sciences and Technology  
قسم هندسة الطرائق  
Department of Process Engineering



**N° d'ordre : M2...../GPM/2021**

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE**

**Filière : Génie des procédés**

**Option: Génie des procédés des matériaux**

### **Thème**

**Etude de l'influence du temps de broyage sur la qualité du sable  
au niveau de l'entreprise Adwan**

#### **Présenté par**

1- HACHLAF Hadj Ahmed

2- REZZIK Salah Eddine

#### **Soutenu le 12/09/ 2021 devant le jury composé de :**

Président(e) :	M. R. GHEZZAR	Pr.	Université de Mostaganem
Examineur (rice) :	B. SMAIL	MCB	Université de Mostaganem
Examineur (rice) :	Z. MOHAMED SEGHIR	MAA	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	A. CHOUAIIH	Pr.	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2020/2021



# *Remerciements*

On tient tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui a éclairé notre chemin, qui nous a donné la volonté, la santé, la chance de poursuivre et d'achever ce modeste travail dans de bonnes conditions.

Toute notre gratitude est exprimée à monsieur le Professeur **CHOUAÏH Abdelkader** autant qu'encadreur, pour son soutien, ses conseils avisés, sa persévérance et surtout sa patience à notre égard. On le remercie pour sa générosité tout au long de notre travail, son aide et surtout sa compréhension.

On remercie infiniment les membres de jury qui ont honoré notre soutenance de master académique avec leur présence.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à Monsieur **GHEZZAR Mouffok Redouane** Professeur à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres de jury, **Docteur SMAIL Bentaïba**, maître de conférences B et **Madame MOHAMED SEGHIR Zahira**, maître assistante A à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem qui ont accepté d'examiner cet humble travail de recherche.

Merci également à nos familles qui nous ont soutenus tout au long de notre cursus, sans oublier nos amis et tous les enseignants, le personnel du département génie des procédés de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

Ce mémoire a été réalisé au Laboratoire de l'entreprise **ADWAN Chemicals Algeria** où on remercie tout le personnel de ce dernier pour leurs aides et leurs conseils afin de réaliser notre travail.



*Je remercie tout d'abord le bon Dieu tout puissant qui ma donné la force et le courage pour terminer ce travail.*

*✍ Je dédie ce modeste travail :*

*À Mes chers parents que je remercie énormément pour leurs sacrifices, leur soutien et leurs encouragements durant toutes ces années ; Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement, le respect et la profondeur des sentiments que j'éprouve toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.*

*À la mémoire de mes grands-parents paternels et ma grand-mère maternelle puisse Dieu vous avoir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour votre âme.*

*À mon grand père maternel je vous dédie cette thèse pour vos attentions particulières, vos prières et votre amour inconditionnel. Merci pour tout et que Dieu vous donne bonne santé et longue vie parmi nous.*

*À mon frère Amine*

*À ma très chère sœur adorable et son mari Riad, merci de toujours être à mes côtés et de me donner des conseils utiles. Je vous souhaite tout le bonheur du monde. À mes nièces ; Ania, Sérine et Ranim. À mon neveu Rafik*

*À mes oncles, et mes tantes,*

*À mon enseignant de primaire BELKHODJA KHALED*

*À mes chers amis, À mon binôme REZZIK Salah Eddine à qui je souhaite beaucoup de bonheur et de réussite dans la vie.*

**Hadj Ahmed H.**



Je dédie ce modeste travail :

À ma famille, qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

À la mémoire de mes **grands-parents paternels** et mon **grand-père maternel** que Dieu les accueille dans son vaste paradis,

À la mémoire de mon cher cousin et frère **REZZIK Samy** que Dieu l'accueille dans son vaste paradis

À ma **grand-mère maternelle** qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Puisse Dieu, le tout puissant lui préserver sa santé et lui donner une longue vie pleine de bonheur.

À mon très **cher père**, Qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent prodiguer

À ma très **chère mère**, Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À Mes chers frères, **Samir, Zineddine** et **Mohammed** Qui n'ont cessé d'être là pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

À mes **chères sœurs** et leurs maris, **Idir** et **Amine**

À mes nièces, **Chanez, Mélissa, Manel** et **Léa**

À mes oncles, et mes tantes,

À mes chers amis, À mon binôme **HACHLAF Hadj Ahmed** à qui je souhaite beaucoup de bonheur et de réussite dans la vie.

**Salah Eddine R.**

## ***Résumé***

L'objectif principal de ce travail est la mise au point d'une méthode de détermination de l'influence du temps de broyage sur la qualité du sable brut et lavé utilisé au niveau de l'unité ADWAN de Fornaka à Mostaganem. Deux types de sables (HASSI MESSAOUD et d'EL ARRICHA), qui se diffèrent entre eux par la composition chimique, ils ont été étudiés à différentes granulométries. Dans le cadre de notre étude, nous avons décrit l'influence du temps de broyage en deux intervalles de temps différents (15 min et 30 min). L'étude menée a montré que le broyage d'une durée de 30 min des deux types de sable brut d'El ARRICHA et de HASSI MESSAOUD a permis d'éliminer les impuretés et les matières argilières, les résultats d'analyse chimique montrent le taux de silice s'est amélioré et avoisine 98% . Après lavage il y a une augmentation du taux de silice pour le sable d'El ARRICHA d'une valeur de 1% tandis que pour le sable de HASSI MESSAOUD aucun changement n'a été constaté. Le sable d'EL ARRICHA contient un taux de silice plus élevé que celui de HASSI MESSAOUD. D'autre part, nous avons montré qu'un broyage d'une durée de 15 min permet de minimiser l'énergie dépensée, gagner du temps et obtenir un sable de bonne qualité. Lors du broyage de 15 min, le sable d'El-Arricha a donné une farine de silice avec un taux de 96,60 % et celui de Hassi Messaoud avec un taux de 96,01 %. Un sable avec ces caractéristiques peut être utile pour certaines applications qui ne demandent pas un sable ultra pur tels que les fonderies et l'industrie du verre.

**Mots clés :** temps de broyage, sable, silicate de sodium, la silice.

## ***Abstract***

The main objective of this work is the development of a method for determining the influence of grinding time on the quality of the raw and washed sand used at the ADWAN unit of Fornaka in Mostaganem. Two types of sands (HASSI MESSAOUD and EL ARRICHA), which differ from each other in chemical composition, have been studied at different grain sizes. As part of our study, we described the influence of grinding time in two different time intervals (15 min and 30 min). The study carried out showed that the grinding enduring 30 min of the two types of raw sand of El ARRICHA and HASSI MESSAOUD made it possible to eliminate the impurities and clay materials, the results of the chemical analysis show the silica content has improved and is around 98%. After washing there is an increase in the level of silica for the sand of El ARRICHA with a value of 1% while for the sand of HASSI

MESSAOUD no change was observed. EL ARRICHA's sand contains a higher rate of silica than that of HASSI MESSAOUD. On the other hand, we have shown that grinding enduring 15 min makes it possible to minimize the energy expended, save time and obtain good quality sand. During the 15 min grinding, the sand of El-Arricha gave a silica flour with a rate of 96.60% and that of Hassi Messaoud with a rate of 96.01%. Sand with these characteristics can be useful for certain applications which do not require ultra-pure sand such as foundries and the glass industry.

**Key words:** Grinding time, sand, sodium silicate, silica

### المخلص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير طريقة لتحديد تأثير وقت الطحن على جودة الرمال الخام والمغسولة المستخدمة في وحدة عدوان في فرناكة بمستغانم. تمت دراسة نوعين من الرمال (حاسي مسعود والعريشة) ، يختلفان عن بعضهما البعض في التركيب الكيميائي ، عند أحجام حبيبات مختلفة. كجزء من دراستنا ، وصفنا تأثير وقت الطحن في فترتين زمنيتين مختلفتين (15 دقيقة و 30 دقيقة). أظهرت الدراسة أن عملية الطحن التي تدوم 30 دقيقة لنوعين من الرمل الخام في العريشة وحاسي مسعود جعلت من الممكن التخلص من الشوائب والمواد الطينية ، وأظهرت نتائج التحليل الكيميائي أن محتوى السيليكا قد تحسن وما حوله. 98%. بعد الغسيل هناك زيادة في مستوى السيليكا لرمل العريشة بقيمة 1% بينما بالنسبة لرمل حاسي مسعود لم يلاحظ أي تغيير. تحتوي رمال العريشة على نسبة سيليكات أعلى من رمل حاسي مسعود. من ناحية أخرى ، أظهرنا أن الطحن الذي يستمر لمدة 15 دقيقة يجعل من الممكن تقليل الطاقة المستهلكة وتوفير الوقت والحصول على رمل عالي الجودة. خلال 15 دقيقة من الطحن أعطت رمال العريشة دقيق سيليكات بنسبة 96.60% ودقيق حاسي مسعود بنسبة 96.01%. يمكن أن يكون الرمل بهذه الخصائص مفيداً لبعض التطبيقات التي لا تتطلب رمالاً شديد النقاء مثل المسابك وصناعة الزجاج.

**الكلمات المفتاحية:** وقت الطحن ، الرمل سيليكات الصوديوم، السيليكا

---

# SOMMAIRE

---

## SOMMAIRE

	<i>Page</i>
Liste des figures.....	<i>I</i>
Liste des tableaux.....	<i>III</i>
Introduction générale.....	01

### *Partie Théorique*

#### ***CHAPITRE I : Traitement de sable siliceux (Unité de production ADWAN Chemicals)***

I.1. Introduction.....	03
I.2. Généralités sur le sable.....	04
I.3. La composition du sable.....	05
I.4. Les caractéristiques du sable.....	09
I.5. Quelques propriétés des sables.....	10
I.6. Les différents types de sable.....	12
I.7. Aperçu sur la société ADWAN Chemicals.....	12
I.8. Les structures opérationnelles de la société ADWAN.....	14
I.9. Les produits de la société ADWAN.....	20

#### ***CHAPITRE II : Généralités sur le sable siliceux, la silice et silicate de sodium***

II.1. Introduction.....	23
II.2. Le sable siliceux.....	23
II.3. La silice.....	30

### *Partie Pratique*

#### ***CHAPITRE III : Matériels et Méthodes***

III.1. Introduction.....	37
III.2. Influence du temps de broyage sur le taux de silice, le taux des impuretés et la granulométrie dans le sable brut et lavé (EL Arricha Hassi Messaoud).....	37
III.3. Farine de silice.....	39
III.4. La composition chimique.....	39
III.5. Mode opératoire et matériels utilisés.....	40
III.6. Spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).....	43
III.7. Analyse granulométrique.....	45
III.8. Conclusion.....	47

#### ***CHAPITRE IV : Résultats et Discussions***

IV.1. Introduction.....	48
IV.2. Détermination de la granulométrie avant le broyage.....	48
IV.3. Détermination de la teneur en silice pour les deux types de sable (El Arricha et Hassi Messaoud) aux différents temps de broyage.....	51
IV.4. Détermination de la granulométrie après le broyage.....	57
IV.5. Discussion des résultats.....	60
Conclusion générale.....	62
Références bibliographiques	

## Liste des figures

*Page*

### *Partie Théorique*

#### *CHAPITRE I : Traitement de sable siliceux (Unité de production ADWAN Chemicals)*

<b>Figure I.1</b> : Sable siliceux.....	03
<b>Figure I.2</b> : Le Quartz.....	05
<b>Figure I.3</b> : Le Mica blanc.....	06
<b>Figure I.4</b> : Le Mica noir.....	07
<b>Figure I.5</b> : Le feldspath.....	07
<b>Figure I.6</b> : Adwan Chemical Industries Co. Ltd.....	13
<b>Figure I.7</b> : Adwan Chemical Algeria.....	14
<b>Figure I.8</b> : Schéma possède les principales unités structurelles pour le traitement de sable.....	15
<b>Figure I.9</b> : Station de lavage du sable.....	16
<b>Figure I.10</b> : Stocke du sable humide (siliceux).....	16
<b>Figure I.11</b> : Station de séchage du sable.....	17
<b>Figure I.12</b> : Station de broyage du sable.....	18
<b>Figure I.13</b> : Station production silicate de soude.....	19
<b>Figure I.14</b> : Processus du sable siliceux industriel ADWAN.....	20
<b>Figure I.15</b> : Poudre de silice .....	21

## *CHAPITRE II : Généralités sur le sable siliceux, la silice et silicate de sodium*

<b>Figure II.1 :</b> Carte d'Algérie montrant les régions du sable siliceux.....	28
<b>Figure II.2 :</b> Evolution de la production de sable siliceux en Algérie....	29
<b>Figure II.3 :</b> Le Silicium.....	30
<b>Figure II.4 :</b> Microphotographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM.....	33
<b>Figure II.5 :</b> Maille élémentaire de type diamant du silicium.....	34

### *Partie Pratique*

## *CHAPITRE III : Matériels et Méthodes*

<b>Figure III.1:</b> L'étuve utilisé pour sécher le sable.....	38
<b>Figure III.2 :</b> Broyage du sable à l'aide d'un broyeur à bille.....	38
<b>Figure III.3 :</b> La farine se silice.....	39
<b>Figure III.4 :</b> Acide fluorhydrique (HF).....	40
<b>Figure III.5 :</b> Le four à chauffer.....	41
<b>Figure III.6 :</b> L'acide nitrique concentré (HNO <sub>3</sub> ) .....	42
<b>Figure III.7 :</b> Filtration du mélange.....	43
<b>Figure III.8 :</b> Spectromètre d'absorption.....	44
<b>Figure III.9 :</b> Machines à tamiser.....	46

## *CHAPITRE IV : Résultats et discussions*

<b>Figure IV.1 :</b> Courbe granulométrique du sable brut d'EL ARICHA ...	49
<b>Figure IV.2 :</b> Courbe granulométrique du sable lavé d'EL ARICHA....	49
<b>Figure IV.3 :</b> Courbe granulométrique du sable brut et lavé de HASSI MESSAOUD.....	51
<b>Figure IV.4:</b> Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable brut d'El Arricha.....	52
<b>Figure IV.5:</b> Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable lavé d'El Arricha.....	53
<b>Figure IV.6:</b> Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable brut de Hassi Messaoud.....	54
<b>Figure IV.7:</b> Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable lavé de Hassi Messaoud.....	55

## Liste des tableaux

*Page*

### *Partie Théorique*

#### ***CHAPITRE I : Traitement de sable siliceux (Unité de production ADWAN Chemicals)***

<b>Tableau I.1:</b> Les principaux constituants du sable .....	08
<b>Tableau I.2 :</b> Propriétés physiques générales du sable .....	11
<b>Tableau I.3 :</b> Classes granulaires du sable.....	12

### *Partie Pratique*

#### ***CHAPITRE IV : Résultats et Discussions***

<b>Tableau IV.1 :</b> Granulométrie du sable brut et lavé d'EL ARICHA avant le broyage.....	48
<b>Tableau IV.2 :</b> Granulométrie du sable brut et lavé de HASSI MESSAOUD avant le broyage.....	50
<b>Tableau IV.3 :</b> Composition chimique (% massique) du sable brut d'EL ARICHA aux différents temps de broyage.....	52
<b>Tableau IV.4 :</b> Composition chimique (% massique) du sable lavé d'EL ARICHA aux différents temps de broyage.....	53
<b>Tableau IV.5 :</b> Composition chimique (% massique) du sable brut de HASSI MESSAOUD aux différents temps de broyage.....	54
<b>Tableau IV.6 :</b> Composition chimique (% massique) du sable lavé de HASSI MESSAOUD aux différents temps de broyage.....	55
<b>Tableau IV.7 :</b> Granulométrie des deux sables brut et lavé d'El Arricha et de Hassi Messaoud après le broyage.....	57

---

# Introduction Générale

---

### INTRODUCTION GENERALE

De nombreuses industries de transformations physico-chimiques de la matière, et plus spécialement, les industries chimiques sont génératrices de quantités importantes de sable et de diverses espèces chimiques (substances organiques, minéraux...etc.) qu'il est nécessaire de les traiter avant de rejeter afin de limiter leurs effets polluants pour l'environnement. Le traitement des sables consiste à éliminer, à l'aide du lavage à l'eau, les débris : pierres, verre et produits organiques comme les feuilles, les grains, pouvant se mélanger avec la matière à épurer. Les professionnels mettent au point de nouvelles techniques de lavage des sables tel que le procédé hydrothermal, une technique alternative qui s'avère intéressante par rapport aux autres procédés en termes de productivité et de pureté. Ce processus produit des quantités importantes de sables utilisées afin d'obtenir la farine de silice.

Le broyage du sable brut, après lavage et séchage, est l'une des étapes de grande importance dans le procédé de production de la farine de sable. Ce procédé consiste à réduire la taille des grains de la matière ainsi que l'augmentation de la teneur en silice. Cependant, le temps de broyage a un effet sur la qualité de sable et même ses propriétés physico-chimiques. Ce paramètre doit être pris en considération lors de la production afin de satisfaire les besoins des industries qui utilisent le farine du sable comme un élément principal dans les procédés de fabrication, telle que l'industrie du verre.

L'objectif principal de ce travail consiste à étudier l'influence du temps de broyage sur la qualité du sable au niveau de l'entreprise ADWAN de Fornaka à Mostaganem, dont deux types de sables bruts sont utilisés (Hassi Messaoud et El-Aricha). Ces deux sables bruts se diffèrent entre eux par la composition chimique. Les deux sables ont été étudiés à différentes granulométries dans le but d'obtenir une farine de silice avec un taux de silice acceptable et une faible teneur en argile. Ce travail consiste aussi à réduire le temps de broyage afin d'économiser l'énergie consommée dans cette étape de processus de production de la silice.

Le travail présenté dans ce mémoire sera organisé de la manière suivante :

Dans la partie théorique, on mettra l'accent sur l'unité ADWAN CHEMICALS Mostaganem au niveau de laquelle le travail a été réalisé dans le cadre de notre formation professionnelle, et savoir en plus sur le processus du traitement du sable et ses dérivés. Cette partie sera consacrée aussi à une présentation des généralités de la silice.

Les principaux produits utilisés, ainsi que les modes opératoires suivis feront l'objet d'une deuxième partie et qui sera bien la partie expérimentale. Dans cette deuxième partie, le protocole expérimental pour la détermination de la composition chimique des deux sables utilisés ainsi que l'analyse granulométrique à différents temps seront présentés.

L'étude sera terminée par une conclusion générale.

---

# Chapitre I

## Traitement de sable siliceux

-Unité de production chimique  
ADWAN Chemicals-

---

**I.1. Introduction**

Toute construction et tout ouvrage de travaux publics nécessitent pour leur réalisation, outre le ciment, les agrégats, et l'eau, du sable en proportion adaptée, selon l'ouvrage envisagé. Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable. Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificielle, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées. La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice, un bon classement et des grains arrondis ou subarrondis : sont appelés sable siliceux ou sables industriels.[1]



**Figure I.1 : Sable siliceux**

## **I.2. Généralités sur le sable**

Les sables proviennent des sources différentes. Ils n'ont pas la même granulométrie, la même couleur.

En Algérie Il existe huit couleurs de sable au moins : blanc, blond, noir, gris, brun, rouge, rose, et vert. La couleur du sable dépend des minéraux qui le composent (quartz, mica, feldspath...), le sable le plus produit en Algérie est le sable siliceux.

### **I.2.1. Définition su sable**

Le sable est un matériau solide granulaire constitué des petits grains minéraux séparés (provenant de la désagrégation d'autres roches) dont la dimension est comprise entre 0,062 et 5 mm, du point de vue géologique. Un élément individuel est appelé grain de sable. La composition du sable peut aller jusqu'à 180 minéraux différents. Les principaux constituants sont le quartz, les micas et les feldspaths, ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail [2].

### **I.2.2. L'origine du sable**

On constate les sables naturels et les sables artificiels.

### **I.2.3. Sables naturels**

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Également appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire », il est connu par sa forme arrondie et sa dureté, et il est résulté de l'action de l'eau sur les rochers. Il y a aussi sable de carrière, extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir des roches extraites en carrière. Quant au sable de mer, qui provient des roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences. Enfin, le sable des feuilles est un sable fin, comportant des nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux [3].

### **I.2.4. Sables artificiels**

Les sables artificiels consistent les sables issu du concassage des blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable fragmenté obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé

ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé [3].

### I.3. La composition du sable

La plus part des temps le sable est le produit de la décomposition du granite du fait de l'érosion. Ainsi, le plus courant de ses composants est le quartz, constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et feldspaths. Un sable provenant d'une roche volcanique est plutôt noir, tandis qu'un sable marin s'enrichit des débris des coquillages ; ainsi, le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de ces composants et de sa nature [4].

#### I.3.1. Les minéraux sableux

*a- Le quartz* : Est une espèce minérale du groupe des silicates, sous-groupe des tectosilicates composé de dioxyde de silicium de formule  $\text{SiO}_2$  (silice), avec des traces de (Al, Li, B, Fe, Mg, Ca, Ti, Rb, Na et OH). Il se présente soit sous la forme des grands cristaux incolores, colorés ou fumés, soit sous la forme des cristaux microscopiques d'aspect translucide.

Constituant 12% (en masse) de la lithosphère, le quartz est un constituant important du granite, dont il remplit les espaces résiduels, et des roches métamorphiques granitiques (gneiss, quartzite) et sédimentaires (sable, grés) [2].



Figure I.2 : Le Quartz

*b- Le mica* : Est l'appellation d'une famille des minéraux du groupe des silicates, sous-groupe des phyllosilicates élaboré principalement de silicate d'aluminium et de potassium. Avec le quartz et le feldspath, il est l'un des constituants du granite. Il est marqué par sa structure feuilletée (phyllosilicates), son éclat métallique et sa grande résistance à la chaleur. Les propriétés des micas, leur transparence, leur hétérogénéité, leurs propriétés d'isolant thermique, font qu'on les retrouve dans multiples utilisations. Les micas sont classés en deux séries :

- **Les micas blancs** : Dioctaédriques  $XY^{3+}_2[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]^{7-}$  sont des silicates riches en aluminium et en potassium. Le mica blanc le plus fréquent est la muscovite  $K^+Al^{3+}_2[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]^{7-}$  ;



**Figure I.3** : Le Mica blanc

- **Les micas noirs** : Trioctaédriques  $XY^{2+}_3[Al_1+XSi_3-XO_{10}(OH)_2]^{7-}$  sont des silicates contenant surtout du magnésium avec du potassium et du fer. De couleur brun à noir, les micas noirs font partie des principaux composants des granites, des gneiss et des micaschistes. Leur altération les transforme en chlorites. Le mica noir le plus fréquent est la biotite  $K^+(Mg,Fe,Ti)^{2+}_3[Al_1+XSi_3-XO_{10}(OH)_2]^{7-}$  [2].



**Figure I.4 :** Le Mica noir

*c- Le feldspath* : Est un minéral varié de silicate double d'aluminium, de potassium, de sodium ou de calcium. Les feldspaths appartiennent aux tectosilicates. Il existe beaucoup de feldspaths, dont les principaux sont l'orthoclase (potassique), l'albite (sodique) et l'anorthite (calcique). Le mélange de ces deux derniers donne la série des plagioclases. Il est à distinguer les feldspaths alcalins, souvent translucides, blanchâtres ou roses et riches en alcalins ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), des plagioclases qui diffèrent des précédents par la présence de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et l'absence de potassium ( $\text{K}^+$ ). Les feldspaths elaborent le plus important groupe des minéraux de la croûte terrestre. Ils sont hautement cristallisés et ont la possibilité et la propriété de former des macles et de rayer le verre [2].



**Figure I.5 :** Le feldspath

Tableau I.1 : Les principaux constituants du sable [4].

Constituant	Couleur	Transparence	Densité
<b>Quartz</b> (Groupe de tectosilicate)	Incolore, blanc, brun, rose.	Transparent à translucide.	2,65
<b>Feldspaths</b> (Groupe de tectosilicates)	Blanc, rose, gris jaunâtre, brunâtre.	Translucide à opaque.	[2,5 - 2,7]
<b>Muscovite</b> (Mica blanc), (Phyllosilicate)	Incolore, brun à reflet bronzé lorsque altéré.	Transparent à translucide.	[2,8 - 2,9]
<b>Calcite</b> (Groupe de carbonate)	Blanc, jaunâtre.	Translucide.	2,7
<b>Amphiboles</b> (Groupe d'inosilicates)	Noir, brun foncé.	Opaque à translucide.	[3,1 - 3,3]
<b>Biotite</b> (Mica noir), (Phyllosilicate)	Noir, brun.	Translucide à opaque.	[2,8 - 3,2]
<b>Grenat</b> (Groupe de néosilicates)	Rouge, rose, orangé, incolore.	Transparent à translucide.	[3,5 - 4,3]
<b>Magnétite</b> (Groupe d'oxyde)	Noir, éclat submétallique.	Opaque.	5,2
<b>Ilménite</b> (Groupe d'oxyde)	Noir, éclat submétallique.	Opaque.	4,7
<b>Pyroxènes</b> (Groupe d'inosilicates)	Noir, gris, blanc verdâtre.	Opaque à translucide.	[3,2 - 3,4]
<b>Olivine</b> (Groupe de néosilicate)	Vert.	Transparent à translucide.	[3,3 - 3,4]
<b>Hématite</b> (Groupe d'oxyde)	Brun, rouge, noir à éclat submétallique.	Opaque.	5,3
<b>Rutile</b> (Groupe d'oxyde)	Rouge, noir métallique.	Rouge transparent noir opaque.	[4,2 - 4,3]
<b>Apatite</b> (Groupe de phosphate)	Vert, bleu.	Translucide à opaque.	3,2
<b>Chlorite</b> (Groupe de phyllosilicate)	Vert.	Translucide à opaque.	[2,6 - 3,3]

<b><u>Corindon</u></b> (Groupe d'oxyde)	Brun, incolore.	Translucide à opaque.	4
<b><u>Épidote</u></b> (Groupe de sorosilicate)	Vert, noir.	Translucide à opaque.	[3,3 - 3,5]
<b><u>Tourmaline</u></b> (Groupe de cyclosilicate)	Noir.	Opaque.	[3,0 - 3,3]
<b><u>Pyrite</u></b> (Groupe de sulfure)	Jaune doré à éclat métallique.	Opaque.	5
<b><u>Andalousite</u></b> (Groupe de néosilicate)	Brun.	Opaque.	[3,1 - 3,2]
<b><u>Kyanite</u></b> (Groupe de néosilicate)	Bleu, blanc.	Translucide.	[3,6 - 3,7]
<b><u>Titanite</u></b> (Groupe de néosilicate)	Brun-rouge, noir.	Opaque.	[3,5 - 3,6]
<b><u>Spinnelle</u></b> (Groupe d'oxyde)	Brun-rouge, noir.	Opaque.	[3,5 - 4,1]
<b><u>Zircon</u></b> (Groupe de néosilicate)	Incolore, jaune, brun.	Transparent à translucide.	4,7

#### I.4. Les caractéristiques du sable

La courbe granulométrique et la rondeur sont les principaux critères utilisés pour caractériser un sable. D'autres caractéristiques sont la teneur en matières argileuses, en coquillages et chlorures [5].

##### I.4.1. La courbe granulométrique

La granulométrie mesure la dispersion de la taille des grains. Elle est décrite par un intervalle  $0/X$  où  $X$  donne la valeur en millimètre pour laquelle 85% des grains ont un diamètre inférieur ou égal à  $X$ . Plus  $X$  est petit plus le sable est considéré comme fin. La teneur en « fines » d'un sable est aussi prise en compte. Il s'agit de la proportion des grains dont la taille est inférieure à 0,062 mm. La teneur en fines affecte la manière dont le sable absorbe l'eau par capillarité. Les sables de concassage, à moins d'être, ont une teneur en fines élevée. À l'inverse, les sables extraits de la mer ou des rivières ou les sables lavés en général ont une teneur en fines plus faible car les fines sont entraînées avec l'eau [5].

### **I.4.2. La rondeur du grain**

La forme du grain est différente tout dépend de l'origine du sable. Un grain rond améliore la fluidité du sable et des mélanges auxquels il participe. À l'inverse, un grain anguleux favorise la résistance du matériau dont il fait partie. Les sables marins ou naturels sont plus ronds. Suivant leur origine les sables de rivière sont plus ou moins ronds. Les sables de concassage sont anguleux [5].

### **I.4.3. Autres caractéristiques techniques**

En plus de la granularité et la forme des grains, le taux des chlorures, les teneurs en argile et en coquillages sont d'autres paramètres importants de la qualité du sable. Une teneur en chlorure trop élevée n'est pas souhaitable dans des applications liées au fer telles que les bétons armés puisqu'ils oxydent le fer et provoquent la rouille de la structure métallique. La présence des sels dans les mortiers ou les matériaux de construction provoque des phénomènes d'efflorescence. L'argile étant rétentrice d'eau, une présence importante dans le sable affecte les dosages d'eau dans des applications comme le béton ou le mortier. L'argile apporte aussi un composant « gras » qui affecte, par exemple, la plasticité du sable. Une teneur en coquillage trop élevée dans le sable (plus de 20%) diminue la résistance des bétons. La forme concave des fragments facilite la création des poches d'air qui rendent le matériau moins compact et plus fragile [6].

### **I.5. Quelques propriétés des sables**

Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains) [3]. Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique des roches, est principalement composé des grains aux aspérités marquées. Il peut être également différencié un sable transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus rond (sphérique), alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluviatile ou marin qui est dit «émoussé-luisant». L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement. La masse volumique du sable sec varie selon sa granulométrie et sa composition, de 1700 à 1900 kg/m<sup>3</sup>, en moyenne 1850 kg/m<sup>3</sup>. Le sable forme naturellement

des pentes stables jusqu'à environ 30°C, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver une pente stable [2].

### I.5.1. Propriétés physiques du sable

**Tableau I.2 :** Propriétés physiques générales du sable [6].

Propriétés physique	Notation	Valeur moyenne	Unité
Poids volumique humide	$\gamma$ ou $\gamma_h$	17 à 20	kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique sec	$\gamma_d$	14 à 18	kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique saturé	$\gamma_{sat}$	19 à 22	kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique déjaugé	$\gamma'$	9 à 12	kN/m <sup>3</sup>
Densité relative	$G_s$	2,65 à 2,67	/
Porosité	N	0,25 à 0,50	/
Indice des vides	E	0,50 à 1	/
Teneur en eau	W	1 à 15	%

### I.5.2. Propriétés chimiques du sable

Les sables peuvent contenir des quantités adéquates des différents matériaux qui se trouvent généralement à l'état naturel sous forme d'oxydes comme par exemple Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, MgO, Zn et autres matériaux [6].

### I.5.3. Autre informations

La température moyenne de fusion du sable est comprise entre : 1 600 C° et 1 700 C°

## I.6. Les différents types de sable

On distingue trois types de sables selon la taille des grains :

**Tableau I.3** : Classes granulaires du sable [2].

Type de sable	Dimension des grains
Sable grossier	2,00 à 5,00 mm
Sable moyen	0,465 à 2,00 mm
Sable fin	0,062 à 0,465 mm

### I.7. Aperçu sur la société ADWAN Chemicals

Adwan Chemical Industries Co. Ltd (**ACIC**), est une filiale privée d'Adwan Development Co. du Royaume d' Arabie Saoudite, située au cœur de la zone industrielle N° 2 de Riyad et Dammam. Ils sont le fabricant de base des produits chimiques inorganiques et le processeur des produits minéraux industriels. Ils exploitent parfaitement deux des vastes ressources naturelles de l'Arabie Saoudite : l'énergie pétrolière et le sable blanc à haute teneur de silice pour produire différentes qualités du sable siliceux, de la farine de silice, des silicates et des aluminates.

Leurs produits sont très bien reçus par leurs clients en raison de la consistance de la qualité, le bon service et la fiabilité. Par conséquent, ils ont élargi leurs installations de production pour répondre à la demande croissante du marché local, les pays voisins et les étrangers. Ils sont une société accréditée ISO 9001:2000.

Leur mission est d'utiliser leurs expériences technologiques pour offrir à leurs clients des produits de qualité supérieure répondant aux normes internationales et un service efficace et de soutien. Leur vision est d'être le premier fabricant et fournisseur fiable de leurs produits chimiques au niveau régional et international.[7]



Figure I.6 : Adwan Chemical Industries Co. Ltd

Adwan Chemicals Algeria a été créée en 2004 dans le cadre de l’extension de l’activité de la société mère, située en Arabie Saoudite. Elle est spécialisée dans la fabrication des produits chimiques inorganiques et la transformation des minéraux industriels. Ses produits phares sont : le Silicate de Sodium, le Silicate de Potassium, l’Aluminate de Sodium, la Silice traitée et la poudre de Silice.

Adwan Chemicals Algeria est basée à l’Ouest de l’Algérie dans la commune de Fornaka, Wilaya de Mostaganem. L’existence d’une société d’une telle envergure contribue activement au développement économique de la région. La vocation principale de l’entreprise est de garantir aux clients locaux et étrangers une gamme de produits de haute qualité, et ce, grâce à un laboratoire de contrôle qualité bien équipé, animé par un staff diplômé, qualifié et expérimenté.[8]

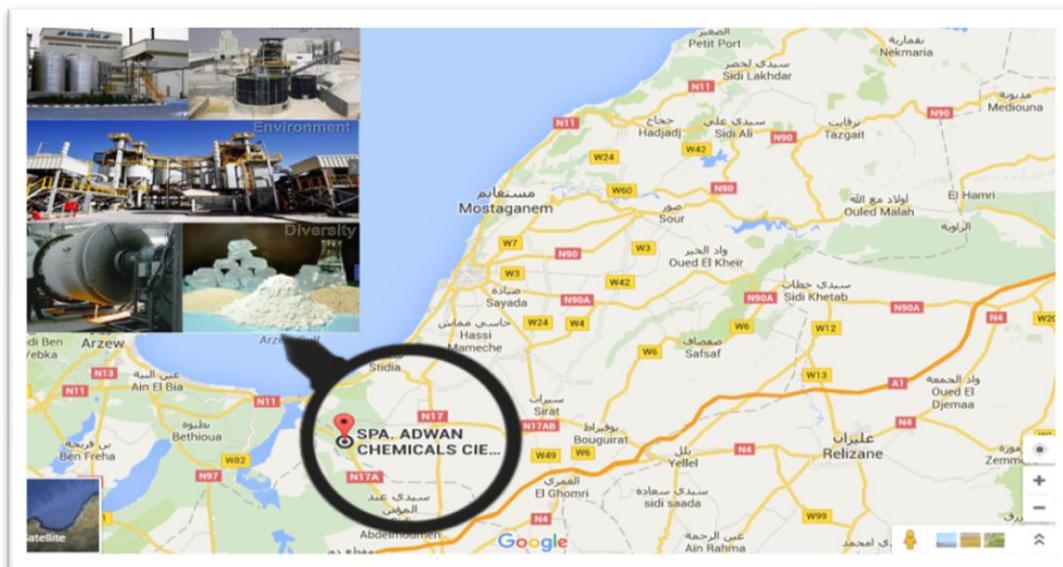
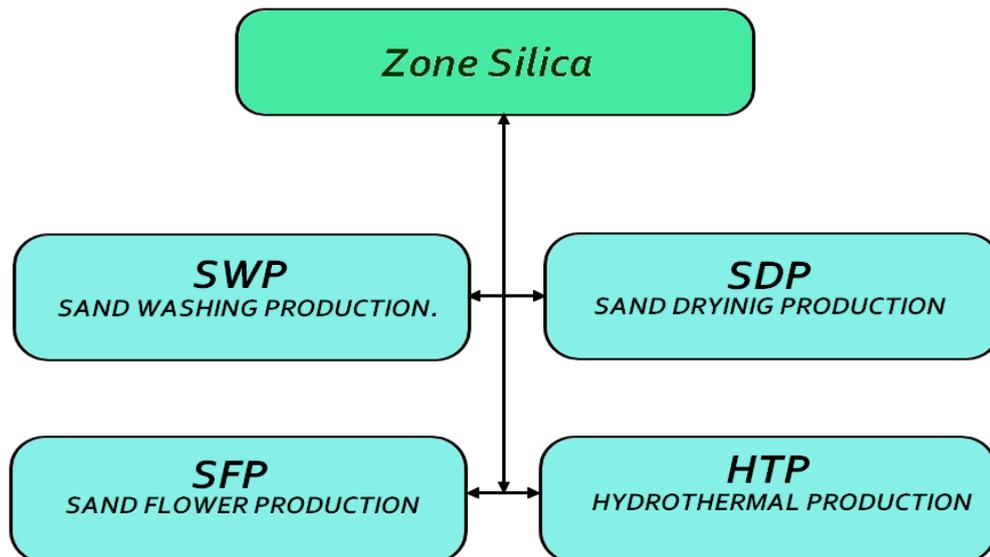


Figure I.7 : Adwan Chemical Algeria

## I.8. Les structures opérationnelles de la société ADWAN

### I.8.1 Unité du traitement de sable et dérivés :

1. Installation de production de silicate de sodium.
2. Réservoirs de stockage de soude caustique en solution.
3. Installation de lavage, purification et traitement.
4. Installation de séchage de sables siliceux.
5. Installation de broyage et classification de la silice.
6. Groupe électrogène de 600 KVA.
7. Poste de transformation électrique.



**Figure I.8 :** Schéma possède les principales unités structurelles pour le traitement de sable

Parmi les unités de Adwan dans le monde ; Adwan Mostaganem, cette dernière est composée de quatre unité principale qui sont : 'SWP, SDP, SFP, HTP' et toutes ces dernières sont dépendantes du laboratoire d'analyse qui les orientes à avoir un bon rondement et une bonne qualité de service pour les clients.

➤ **Station lavage sable (SWP: Sand Wash plant):**

Cette station est conçue pour le lavage du sable brute en provenance de différents endroits, Son principe repose sur des Tamis et Vibreurs mécanique géant qui aide à filtrer le bon du mauvais sable avec d'autre méthode qui repose sur la force Centrifuge pour plus de précision et tout le sable est conduit avec des tapis roulant suspendue.

La fonction principale de cette unité et le lavage et le trie du sable brute, il se compose de quatre parties ;

- 1 : déchets (argile et Caillaux)
- 2 : sable moyen 0.7 – 5 mm
- 3 : sable ferreux
- 4 : sable humide inférieur à 0,7 mm (sable siliceux)



**Figure I.9 :** Station de lavage du sable



**Figure I.10 :** Stocke du sable humide (siliceux)

➤ **Station sechage sable (Sand Drying Plant)**

Le processus consiste à sécher le sable humide et le stocker selon les calibres demandés dans des silos. La trémie de réception est alimentée en sable humide par le chargeur, le sable est envoyé au sécheur à travers une chaîne à godets, en suite le sable séché se déverse sur une bande transporteuse pour être acheminé vers une deuxième chaîne à godet qui l'envoie vers un équipement appelé Rotex dans lequel se déroule la séparation des grains selon leurs diamètres à l'aide des tamis prés définis , puis le sable est envoyé dans des silos de stockage correspondants pour être conditionné dans des big bac ou sacs selon la commande.



**Figure I.11** : Station de séchage du sable

➤ **Station broyage sable (Sand Flower Production)**

La trémie de réception est alimentée par le chargeur en sable sec inférieur à 0,3mm, ce dernier est acheminé par une bande transporteuse vers une chaîne à godet qui l'envoie dans un silo puis, il est acheminé par une vis sans fin dans un broyeur à bille en aluminium (importer), le type de produit en aval est tributaire de la vitesse du broyeur , en suite le produit ( Silica Flour) est envoyée par un air dynamique vers les silos de stockage, puis il est conditionné dans des big bac ou des sacs selon la commande.

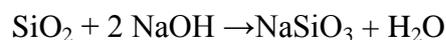
Poussière inferieur ou égale à 10 microns est récupéré est stockée dans un silo à part pour être conditionnée dans des big bac.



**Figure I.12 :** Station de broyage du sable

➤ **Station production silicate de soude (HTP) HYDROTHERMAL PRODUCTION**

Cette installation est conçue pour produire du silicate de soude à 45% : le principe consiste à faire réagir du Silica Flour avec la soude caustique à 50% de concentration en présence de l'eau sous une pression de 9 bars et une température de 180 C° ; selon la réaction suivante :



La farine de silice, la soude caustique et l'eau sont mélangés dans le préparateur est chauffés à 80 C° ; puis le mélange est transféré à l'aide de l'air comprimé vers le réacteur A ou le réacteur B ; ensuite le contenu est homogénéisé par des agitateurs sous une pression de 9 bars et une température de 180C° se sont les conditions favorable pour le démarrage de la réaction qui tiendra 4 heures pour qu'elle soit complètera la fin de la réaction le contenu est transféré dans le bac intermédiaire ou il passe par une phase de détente et de vaporisation pour obtenir du silicate de soude à 100C° et une pression de 2-2,5 bars, en suite le contenu est envoyé dans le filtre presse pour l'élimination des impuretés.

Le produit obtenu est stocké dans un réservoir pour être contrôlé avant de le transférer dans les bacs de stockages.[8]



**Figure I.13 :** Station production silicate de soude

### **I.8.2. Laboratoire Contrôle Qualité**

Le laboratoire d'Adwan Algérie occupe une superficie de 174 m<sup>2</sup>. Grâce aux études de formulation menées aux analyses physicochimiques effectuées, il constitue le garant de la qualité auprès des clients.

Le laboratoire joue un rôle déterminant au niveau de toutes les étapes de la réalisation du produit. Il intervient au niveau de la sélection des matières premières, telles que le sable brut et la soude caustique écaillée (les principaux ingrédients qui rentrent dans la fabrication de ses produits) et le sel, et contrôle l'évolution de la qualité au cours du processus de fabrication. Le personnel du laboratoire joue le rôle d'interlocuteur technique avec les clients et participe à l'agrément de nouvelles gammes de produits.

Chaque matière première réceptionnée et chaque produit fini fabriqué dans l'entreprise sont systématiquement échantillonnés et analysés dans le laboratoire, pour confirmer leur conformité par rapport aux normes et aux exigences des clients.

Des contrôles de qualité sont effectués en cours de fabrication, pour assurer l'uniformité et la stabilité de la qualité des produits. Enfin, des certificats d'analyse sont délivrés pour accompagner la marchandise expédiée au client.

## **I.9. Les produits**

### **I.9.1. Le sable siliceux industriel**

Haute qualité du sable de silice première est excavée sélectivement pour assurer un contenu élevé de  $\text{SiO}_2$ , granulométrie requise et faible teneur en impuretés.

Ceci est surveillé et contrôlé par l'analyse de routine pour toutes les livraisons de sable. Elle traite le sable de silice en quatre étapes, y compris le lavage, le tamisage, attrition et séchage de produits industriels de silice blanche sable ayant une pureté extrêmement élevée, avec  $\text{SiO}_2 > 99,5\%$ . La taille des grains allant de 0,125 à 5,00 mm et le plus moderne de notre High Tech.

Installations de tamisage peut fournir des distributions de taille différente pour différentes exigences et elle peut être fabriquer sur mesure selon les exigences du client.



**Figure I.14 :** Processus du sable siliceux industriel ADWAN

**▪ Applications**

1. Filler dans les conduites en PRV
2. Sable de fonderie
3. Fracturation et de cimentation des puits de pétrole
4. Additif dans les produits chimiques de construction et produits d'étanchéité
5. Média filtrant pour la filtration de l'eau et de purification
6. Charge dans des peintures et revêtements en poudre.
7. Matières premières pour la fabrication de verre
8. Sablage
9. Emballage 25 kg et 50kg en polypropylène sacs tissés, 1 et 1,50 MT big-bag en polypropylène et en vrac dans des grands récipients sous pression de 25MT

**I.9.2. La farine de silice**

Adwan offre une grande pureté, la farine de silice fine avec des tailles de particules allant de 8 à 100microns dans des emballages différents, Adwan a les capacités pour faire des produits sur mesure aux besoins spécifiques du client.



**Figure I.15 : Poudre de silice**

**▪ Applications**

1. Vitrage des médias dans l'industrie céramique.
2. Cimentation de puits de pétrole de forage.
3. Charge dans les peintures et les couches de poudre.
4. Additif dans les produits chimiques de construction et produits d'étanchéité.
5. Filler dans les plastiques.
6. Emballage de 25 Kg et 50 Kg sacs en polypropylène tissé. Sacs de 1 et 1,25 MT polypropylène grand récipient sous pression de 25 MT.

**I.9.3. Silicate de sodium**

Hydrothermal Process : Connue sous le nom de « procédé par voie humide », pour la fabrication de silicates directement sous forme de solution, à partir de la silice du sable lessivés sous une pression et l'ajout d'une solution de soude caustique concentrée. Ce processus donne lui-même à la production de la solution des silicates cristallins.

---

---

# Chapitre II

Généralités sur le sable siliceux, le silicium et la silice

---

---

## II.1. Introduction

Le sable provient de la désagrégation des matériaux d'origine minérale ou organique : roches, coraux, coquilles... Les différents types du sable sont déterminés selon la composition majoritaire (pourcentage le plus grand) de : quartz, olivine, micas... Même si tous ces minéraux ont une composition chimique à base de silicates, leurs couleurs diffèrent par leur mode de cristallisation.[9]

## II.2. Le sable siliceux

L'industrie du verre et de la fonderie a besoin des gisements de sable qui possèdent une très haute teneur en silice dépassant 98 %, un bon classement, et des grains arrondis ou subarrondis; ces sables peuvent être lavés, traités, tamisés et purifiés pour répondre aux exigences des consommateurs. La verrerie et la fonderie utilisent plus de 80 % de sable siliceux extraits à travers le monde [6].

### II.2.1. Exploitation, traitement et valorisation des sables siliceux

Le sable siliceux est exploité dans des carrières à ciel ouvert ou dans des sablières. Le produit extrait doit subir, avant sa commercialisation et son utilisation finale, un important traitement dont l'objectif est d'augmenter sa teneur en silice, de réduire toutes les impuretés et d'obtenir une granulométrie optimale requise pour une utilisation finale. À la fin du traitement, le sable peut être commercialisé à l'état humide ou être séché. Selon les applications et les exigences des utilisateurs, il est fait appel à différents moyens de traitement. Ces traitements dépendent de la nature des produits bruts et de la qualité du produit recherché. Pour sa valorisation, le sable siliceux extrait de la carrière ; après l'homogénéisation, subira un important traitement qui comprendra l'un ou plusieurs des procédés suivants :

- *Prétraitement (débouillage et lavage primaire)*

Élimination de la fraction argileuse.

- *Criblage*

Triage mécanique du sable par grosseur des grains.

- *Attrition*

Action de deux corps durs qui s'usent par frottement. Elle se fait par voie humide et permet de séparer toutes les incrustations ferreuses ou argileuses des grains de quartz.

- *Lavage secondaire suivi de classification granulométrique*

Cette phase permet d'éliminer toutes les impuretés restantes de la phase précédente.

- *Flottation*

Elle se fait par voie humide dans des cellules de flottation, et permet de séparer et d'éliminer tous les oxydes de fer libérés restants.

- *Essorage et séchage*

Se fait par voie thermique et permet d'éliminer toute l'eau.

- *Traitements supplémentaires*

Se fait par voie sèche et permet d'éliminer certains minéraux lourds contenant du fer. A la fin de ce traitement, on obtient un produit marchand: Pour la verrerie, les spécifications dépendent de la qualité du sable (produit marchand) :

- Verres blancs ( $\text{SiO}_2 > 99\%$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,03\%$ ) ;
- Verres colorés ( $\text{SiO}_2 > 98,5\%$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,2\%$ ) ;
- Laine de verre ( $\text{SiO}_2 > 98\%$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,3\%$ ) [10].
- 

## II.2.2. Les principales applications du sable siliceux

- *Les céramiques*

Les produits de la vie quotidienne tels que la vaisselle, les sanitaires, les objets décoratifs, les carrelages, les céramiques à haute technologie contiennent de la poudre de silice finement broyée. Cette poudre est un constituant important des émaux céramiques mais également des briques réfractaires, des revêtements de creuset et des flux [11].

➤ **Le verre**

La silice est le composant principal de presque tous les types des verres pour les récipients (bouteilles et pots), le verre plat (vitres, miroirs, pare-brise), la vaisselle (verres, récipients, carafes), le verre d'éclairage (ampoules, tubes fluorescents), les écrans de TV et d'ordinateurs (y compris les écrans plats), le verre de décoration, le verre optique, etc. Les fibres de verre, utilisées surtout pour renforcer les matériaux composites ou dans les tissus décoratifs sont fabriqués à partir de poudre finement broyée. Quant à la laine de verre, elle est utilisée pour l'isolation [11].

➤ **Les peintures et plastiques, polymères, caoutchouc, mastics et colles** La silice cristalline, sous forme de quartz, est utilisée à l'état le plus finement divisé comme charge de renforcement dans tous ces produits. La poudre de silice apporte une résistance à l'abrasion et à l'attaque chimique [12].

➤ **Pièces de fonderie**

La silice cristalline possède un point de fusion supérieur à celui du fer, du cuivre et de l'aluminium. Cette propriété permet de réaliser des pièces moulées par coulage de métal en fusion dans des moules constitués de sable de silice et d'un liant. Les pièces coulées sont utilisées dans les industries mécaniques et les industries de fabrication [11].

➤ **La filtration**

Le sable de silice préparé avec un faible écart granulométrique est utilisé comme filtre dans le traitement des eaux usées pour séparer les matières solides [11].

➤ **Les produits de construction et matières premières**

Le sable siliceux et les poudres de silice sont les matériaux de base du secteur de la construction. Parmi les nombreuses applications on peut citer la fabrication du ciment, les enduits, les produits de ragréage, les blocs de silice et de béton cellulaire, les colles pour les revêtements de toiture et de sol, les mortiers pour la pose de carrelage et des gobetis, les marquages routiers, le carton bitumé et les systèmes d'injection de ciment et des résines [12].

➤ *Sports et loisirs*

Le sable de silice est utilisé pour les terrains d'équitation, ainsi que pour l'aménagement des champs des courses résistant aux conditions climatiques. Il est également utilisé pour la réalisation des couches d'enracinement et comme matériau de drainage pour les terrains des sports professionnels (football, rugby ...) et pour les terrains de golf. Sans oublier son utilisation dans les bacs à sable [13].

➤ *Application dans l'exploitation pétrolière*

Le sable de silice à granularité élevée et à grains sphériques est injecté dans les puits de pétrole pour améliorer la perméabilité et la récupération du pétrole dans les champs pétrolifères [11].

➤ *Secteur chimique* Le quartz de pureté élevée est utilisé pour fabriquer des produits chimiques à base de silicium, comme le silicate de sodium, le gel de silice, les silicones, le tétrachlorure de silicium, les silanes et le silicium pur. Le silicium pur est utilisé pour les puces électroniques qui constituent le cœur de l'informatique. Les produits à base de silicium sont employés dans la production des détergents, des produits pharmaceutiques et de cosmétiques [7].

➤ *Industrie métallurgique*

Le quartz est utilisé comme matière première dans la production de silicium métal et de ferrosilicium. Le silicium métal sert à fabriquer des alliages à base d'aluminium, de cuivre et de nickel. Le ferrosilicium est l'un des composants des alliages de fer et d'acier [13].

## II.2.3. Le sable siliceux dans le monde

### II.2.3.1. Production et réserves mondiales

La production mondiale de sable siliceux pour l'industrie, de l'ordre de 120 Mt/an, est dominée par les USA (24%), les Pays-Bas (20%), la France, l'Allemagne et l'Autriche produisant environ 5% chacun. Une trentaine de pays ont une production supérieure à 1 Mt/an. Les réserves mondiales sont importantes et représentent plus d'un siècle au rythme de production actuelle [10].

**II.2.3.2. Marché et acteurs mondiaux**

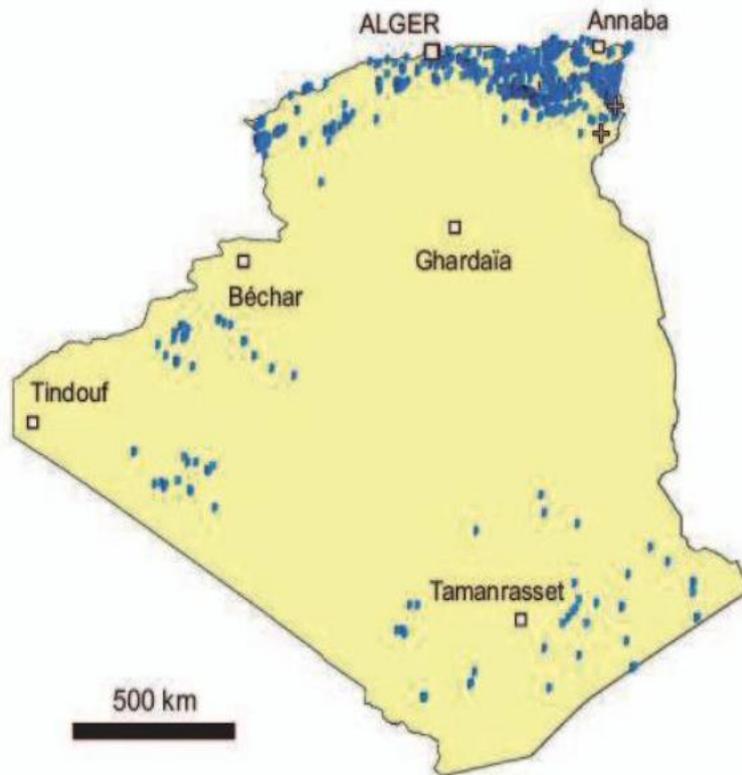
Les matériaux siliceux, à l'exception du quartz ultra-pur, sont des produits pondéreux qui voyagent peu et sont surtout destinés à être transformés près de leur lieu d'extraction. Les produits manufacturés au contraire peuvent être envoyés loin de leur lieu de fabrication. Les marchés mondiaux des produits siliceux sont très variés et complexes. En ce qui concerne celui du verre, il est dominé par Saint Gobain (France), Pilkington (GB), Sibelco et Glaverbel (Belgique), Guardian (USA) [10].

**II.2.3.3. Prix**

Le prix de sable siliceux varie en fonction de ses caractéristiques, tels que la granulométrie et la pureté, par exemple le sable siliceux destinées pour les charges minérales peut être quatre à cinq fois supérieur par rapport au sable siliceux destiné pour la fonderie. Sur le marché mondial, les sables siliceux ne dépassent pas 25 Euros/t sortie carrière, alors que le quartz ultra-pur peut valoir 30 Euros/kg. Les produits dérivés ont une forte valeur ajoutée : silicium métal 850 à 1200 Euros/t, carbure de silicium 1300 à 1700 Euros/t, silice précipitée 1200 Euros/t, colloïdale 3000 à 7500 Euros/t [10].

**II.2.4. Le sable siliceux en Algérie**

On trouve en Algérie des gisements importants des matériaux siliceux, notamment dans l'Ouest du pays, où ils sont liés aux dépôts des sables éoliens. Ce sont surtout ces gisements qui sont exploités pour la production du verre [10].



**Figure II.1 :** Carte d'Algérie montrant les régions du sable siliceux [10].

Les gisements Algériens des silices sont surtout représentés par les dépôts des sables quaternaires, mais aussi par des matériaux variés : grès quartzeux, quartzites, quartz filoniens, etc [12].

#### **II.2.4.1. Des réserves géologiques importantes**

Dans la partie Nord du pays, les réserves géologiques connues sont de plus de 150 Mt des roches siliceuses pures à teneur en silice élevée ( $> 97\% \text{ SiO}_2$ ) et plus de 100 Mt des roches siliceuses industrielles à plus de 90 % de  $\text{SiO}_2$  [10].

#### **II.2.4.2. Une ressource géologique potentielle et des réserves probables très élevées**

Les ressources potentielles en matériaux siliceux sont très importantes grâce à leur répartition, leur extension et à la diversité des gisements des roches siliceuses sous forme de sable, grès quartziques, filons de quartz et en contextes des bassins sédimentaires et des zones de socle [10].

### II.2.4.3. La production Algérienne

La production de sable siliceux, en Algérie, est assurée par 12 sablières, dont 6 relèvent du secteur privé, réparties sur 08 wilayas. En 2008, la production a atteint 498 035 tonnes. Le secteur privé domine cette activité avec 341 048 tonnes, soit un taux de 68,4%. Depuis l'année 2000, la tendance de la production de sable siliceux est à la hausse ; de 230 013 tonnes produites en 2000, a plus que doublée en 2008 en atteignant 498 035 tonnes [6].

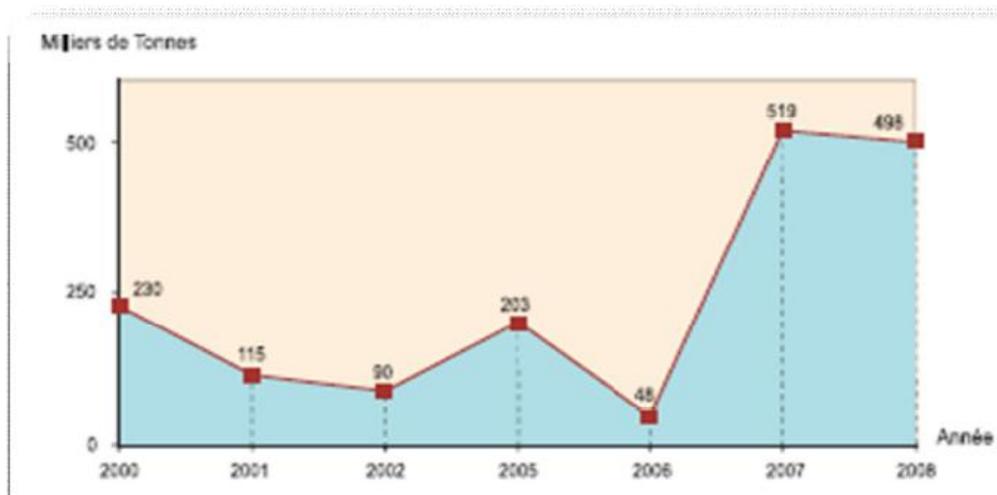


Figure II.2 : Evolution de la production de sable siliceux en Algérie [11]

### II.2.4.4. Domaine minier

A ce jour, au niveau du cadastre minier, 53 titres miniers en vigueur sont enregistrés pour le sable siliceux, 51 titres miniers concernent l'exploitation et deux pour la prospection, répartis sur 22 wilayas. Les substances concernées par ces titres miniers sont destinées, en majorité, pour la verrerie et pour ciment, et d'autres pour la céramique, la fonderie, ajout comme dégraissant et abrasif [6].

### II.2.4.5. Potentiel et perspectives de développement de la production de sable siliceux en Algérie

Parmi les nombreux domaines d'utilisation industrielle de la silice en Algérie, ce sont ceux du verre plat ou coulé (bâtiment et automobile) et du verre creux qui présentent actuellement un fort potentiel de développement. Pour assurer un potentiel de production adapté et la qualité des produits, les développements de production des matériaux siliceux concernent : L'optimisation des méthodes d'exploitation et/ou l'augmentation de la production des gisements des sables siliceux actuellement exploités ;

La modernisation ou l'installation d'unités des traitements adaptées ; La reconnaissance géologique des gisements et indices situés à proximités des centres de consommation [10].

### II.3. La silice

La silice est la forme naturelle du dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), corps solide de grande dureté entrant dans la composition de nombreux minéraux. La silice existe à l'état libre sous différentes formes cristallines ou amorphes, et combiné à d'autres oxydes dans les silicates.

Le silicium est utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs suite à ses propriétés physiques. Ce chapitre est consacré pour donner des généralités sur cet élément.

#### II.3.1. Présentation du silicium

Le silicium est un élément chimique de la famille des cristallogènes, se classe dans la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, de symbole Si et de numéro atomique 14, il comporte 4 électrons de valence. Il s'agit d'un semi-conducteur d'un gap 1,12 eV [13].

Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de composés : sous forme de dioxyde, la silice (dans le sable, le quartz, la cristobalite, etc....) ou de silicates. Le réseau cristallin du Si est celui du diamant. Il cristallise selon la maille diamant constituée de la superposition de deux sous réseaux cubiques à face centré décalé d'un quart de la diagonale principal. Le nom dérive du latin silex, ce qui signifie cailloux ou silex. C'est en 1823 qu'il fut séparé de ses composés par le chimiste suédois Jöns Jakob Berzelius [12].

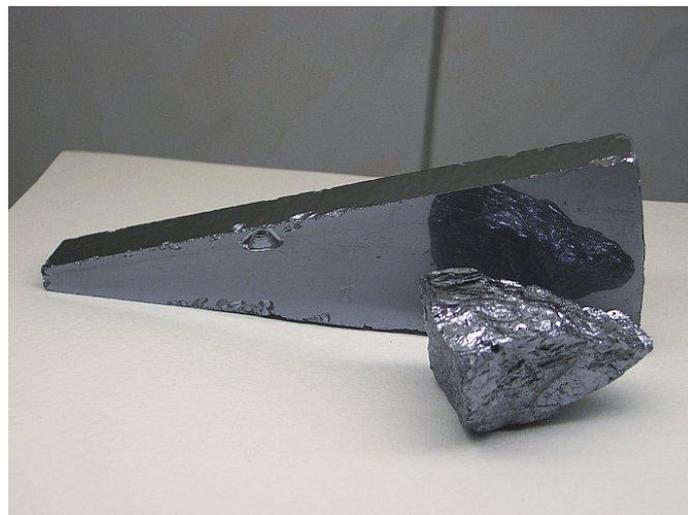


Figure II.3 : Le Silicium[14]

En fonction de sa pureté, on distingue trois (3) catégories : silicium métallurgique (pureté 99 %), silicium de qualité solaire (pureté 99,9999 %) et le silicium de qualité électronique (pureté 99,99999999 %).

Depuis une dizaine d'année l'industrie photovoltaïque connaît une croissance extrêmement forte ce qui a créé une demande en silicium que les faibles capacités mondiale de l'offre ne pouvaient satisfaire.

Son prix a subi une forte hausse, le kilogramme de silicium, au début des années 2000, s'échangeait à quelques dollars, en novembre 2008 il a dépassé les 400 dollars. [6]

### **II.3.2. Les formes de silicium**

#### **II.3.2.1. Le silicium organique**

Le Silicium organique est un composé à base de silicium qui se nomme monométhylsilanetriol. Il s'agit d'une molécule artificielle obtenue par synthèse et qui n'existe pas à l'état naturel. Le terme organique vient du fait que le silicium est lié à plusieurs atomes de carbone [15].

#### **II.3.2.2. Le silicium ionisé**

Le silicium ionisé est une forme de silice dissoute dans l'eau pure qui porte une charge électrique positive. Ce sont des ions libres appelés cations; c'est la seule forme active du métal pour agir comme catalyseur enzymatique. Les métaux à l'état d'ions sont l'aliment type du terrain, ou plus précisément la « nourriture » des diverses enzymes. Les avantages du silicium ionisé sont :

- Taille minimale : Plus la taille est petite, plus l'absorption est maximale. Le silicium ionisé est d'une taille infime, son assimilation est totale ;
- Forme ionisée : Forme mobile, réactive. Les ions libres sont protégés par des molécules d'eau pure ; ils possèdent une charge électrique à haut pouvoir catalytique. Ils ne présentent aucune barrière énergétique à franchir pour agir [16].

### II.3.3 Caractéristiques du silicium

Les cristaux de silicium sont gris à noirs, en forme d'aiguille ou d'hexaèdres (forme cubique). La phase amorphe est une poudre marron foncée. Le silicium est un semi-conducteur, sa conductivité électrique est très inférieure à celle des métaux. Il est insoluble dans l'eau (sauf à haute température). Il est attaqué par l'acide fluorhydrique (HF) ou un mélange acide fluorhydrique/acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) en fonction de la phase. Le silicium présente des reflets métalliques bleutés, mais n'est pas du tout aussi ductile que les métaux. Il existe trois isotopes naturels du silicium : <sup>28</sup>Si (92,18%), <sup>29</sup>Si (4,71%) et <sup>30</sup>Si (3,12%). Il existe également des isotopes artificiels instables : <sup>25</sup>Si, <sup>26</sup>Si et <sup>27</sup>Si qui sont émetteurs β<sup>+</sup>, ainsi que <sup>31</sup>Si à <sup>34</sup>Si qui sont émetteurs β<sup>-</sup>. Le silicium, comme le germanium et la forme diamant du carbone, a une structure de type « diamant », forme dérivée de la structure Cubique Faces Centrées (CFC), avec un paramètre de maille de 0,5430710 nm [9].

### II.3.4. Les structures de silicium

#### II.3.4.1. Les structures cristallines

La matière condensée peut prendre deux états solides différents, suivant les conditions dans lesquelles elle s'est formée : un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallisé, caractérisé par un arrangement périodique des atomes. Les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de haute viscosité. Les solides cristallisés peuvent former des monocristaux, si la périodicité est ininterrompue dans tout le volume, ou des poly-cristaux, s'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Dans la microphotographie de (figure II.1), prise par TEM (Transmission Electron Microscopie), une vue de coupe du réseau cristallin du silicium permet d'observer sa périodicité. Le résultat est un ensemble ordonné, ou localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes. Ces forces sont plus ou moins importantes suivant l'électronégativité des éléments intervenant dans les liaisons, ce qui confère aussi des propriétés mécaniques et électriques au solide cristallisé résultant. On distingue quatre familles de solides cristallins : les cristaux ioniques, les cristaux covalents, les métaux et les cristaux moléculaires [15].

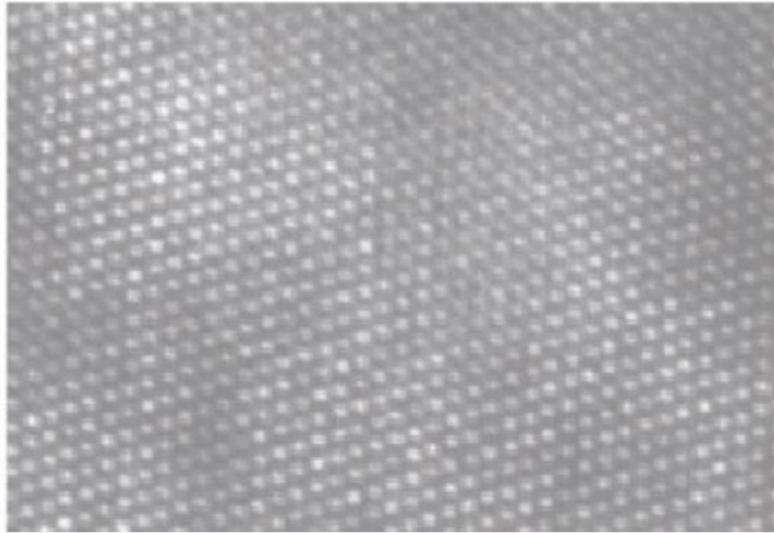


Figure II.4 : Microphotographie du réseau cristallin du silicium prise par TEM.

#### II.3.4.2. La structure diamant

Dans la structure diamant chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, ce qui permet de former des liaisons covalentes. Elle peut être décrite comme étant formée de 2 structures (CFC). Déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position de l'origine de la seconde structure (CFC), par rapport à l'origine de la première est  $(1/4, 1/4, 1/4)$ . Le diamant cristallise dans cette structure, mais aussi le silicium et le germanium. Cette structure est typique des éléments de la colonne IV du tableau périodique, mais aussi des composés III – V dans lesquels les sites  $(0, 0, 0)$  et  $(1/4, 1/4, 1/4)$  sont occupés par différents types d'atomes. On parle dans ce cas de structure Zinc blende [15].

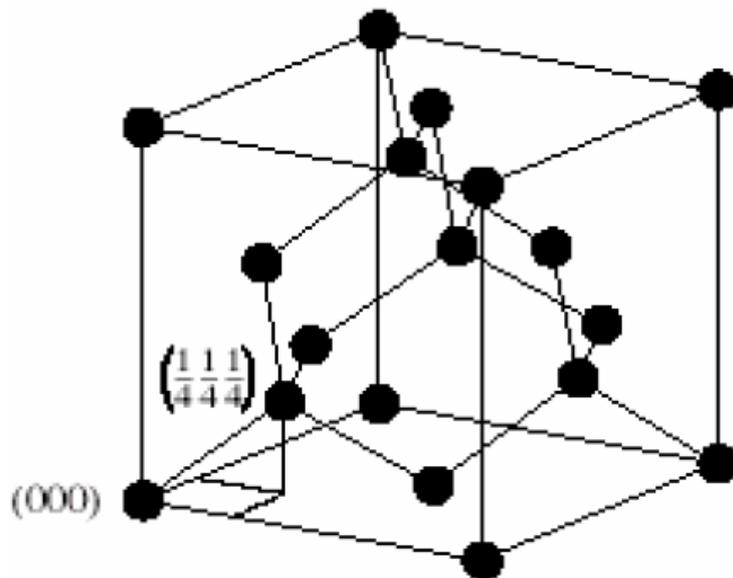


Figure II.5 : Maille élémentaire de type diamant du silicium [16].

### II.3.6. Différents types de silicium

Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quelque soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou multi cristallin). [17]

#### II.3.6.1. Le silicium monocristallin

La réalisation de nombreux dispositifs commence par la production d'une matière monocristalline de grande pureté. En particulier la fabrication des puces microélectroniques nécessite des substrats monocristallins semi-conducteurs, par exemple du silicium, du germanium ou de l'arséniure de gallium. Dans le cas du silicium, la fusion de zone et le tirage en creuset (méthode de Czochralski) sont les deux méthodes utilisées couramment pour obtenir des lingots monocristallins de grande pureté longs des plusieurs mètres et d'un diamètre allant jusqu'à 300mm. On a des rendements photovoltaïques élevés, supérieurs à 15% [18] [19].

#### II.3.6.2. Le silicium polycristallin

On peut réaliser d'un seul coup un lingot des grandes dimensions par refroidissement directionnel d'une masse de silicium en fusion. Le lingot obtenu est composé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon (13%) dans le commerce, mais sa fabrication est plus facile. Ces lingots de silicium multicristallin doivent être eux aussi coupés en tranches de 200 à 400mm, grâce cette fois-ci à une scie à fil [20].

**II.3.6.3. Le silicium amorphe** Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin. Une fine couche de 0,3mm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible. Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre à partir du gaz silane  $\text{SiH}_4$ . En fait, les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide, puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence; le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène est également nécessaire pour la qualité du matériau (il limite le nombre des défauts en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée).

L'adjonction des dopants est réalisée par ajout de gaz  $\text{PH}_3$  ou  $\text{B}_2\text{H}_6$  au silane. Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium, on a des faibles rendements: 5 à 6 % et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures) [21].

### **II.3.7. Les impuretés dans le silicium**

Les impuretés peuvent occuper différents sites dans le réseau du silicium, des sites interstitiels (généralement pour des impuretés métalliques), des sites substitutionnels (pour les dopants B, P, Al...). Ainsi les impuretés peuvent s'associer entre elle pour former des complexes ou des précipités si leur concentration est supérieure à la limite de solubilité. On distingue :

- Les dopants (B, P, Al,...);
- Les diffuseurs rapides (Fe, Cr, Cu,...);
- Les diffuseurs lents (Al, Ti, Au,...);
- Les éléments légers (O, C, N,...) [13].

### **II.3.8. Nettoyage**

Pour éviter toute mauvaise adhérence des couches minces sur le substrat de Si, il doit être nettoyé pour éliminer toutes traces d'impuretés (poussière, humidité...). On utilise un bain à ultrasons afin d'éliminer les dernières traces d'impuretés accrochées sur les surfaces des substrats de silicium. On trempe ensuite les substrats dans des bains contenant chacun l'acétone, l'éthanol, ensuite dans de l'eau distillée. Pendant le nettoyage les bains sont soumis à des vibrations ultrasonores [18].

### **II.3.9. Utilisations et applications**

- Les cellules solaires
- Les puces électroniques
- Composants mécaniques
- Alliages aluminium-silicium
- Micro et nanostructure

**II.3.10. Le silicium dans la nature**

Le silicium sur Terre se trouve essentiellement sous forme minérale, et en particulier sous forme des silicates, qui constituent 97 % de la croûte terrestre. Le silicium est par exemple constitutif du sable de silice, résultat de la dégradation de roches comme le granite [22].

---

---

Chapitre III  
Matériels et  
méthodes

---

---

### III.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, on déduira l'influence du temps de broyage sur la qualité du sable (taux de la silice et le taux des impuretés) en prenant deux types de sable de gisements différents celui de Hassi Messaoud et EL-Arricha en deux états différents (brut et lavé) au cours de trois intervalles de temps différents (15 min et 30 min), en utilisant dans notre travaille une gamme d'appareils, certains produits chimiques et des techniques d'analyses.

### III.2. Influence du temps de broyage sur le taux de silice, le taux des impuretés et la granulométrie dans le sable brut et lavé (EL-Arricha et Hassi Messaoud)

#### III.2.1. Broyage du sable

L'objectif de cette opération est de déterminer l'effet de temps de broyage sur la qualité de sable brut et lavé pour les deux types de sable siliceux, à l'aide d'un broyeur à boulets au laboratoire pour faciliter notre travaille et donner des résultats précis.

##### ❖ Principe de fonctionnement

Les broyeurs à billes sont parmi les outils les plus adaptables et les plus efficaces lorsqu'il s'agit de broyer des matériaux durs, cassant ou fibreux. La diversité des modes de broyage, des volumes utilisables et des matériaux d'outils de broyage disponibles font de broyeurs à billes la solution idéale pour une vaste gamme d'applications [23].

Pour cela ; on prend 02 échantillons de celle du sable brut et du sable qui est déjà lavé et séché dans l'étuve model « BINDER » (**figure III.1**) à une température de 130°C entre 30 min et 1 heure tout dépend du taux d'humidité, jusqu'à ce que l'échantillon soit sec pour les deux types (El-Arricha et Hassi Messaoud).



**Figure III.1:** L'étuve utilisé pour sécher le sable

- Sous le broyage dans des différents temps (15min et 30 min) à l'aide d'un broyeur à bille de la marque « RETSCH » (**figure III.2**)



**Figure III.2 :** Broyage du sable à l'aide d'un broyeur à bille

### III.3. Farine de silice

La farine de silice est le résultat du broyage du sable siliceux industriel.



**Figure III.3 :** La farine se silice

### III.4. La composition chimique

Les analyses chimiques des deux types du sable brut et lavé utilisés sont faites pour la détermination des compositions chimiques suivantes :

**SiO<sub>2</sub>** : le dioxyde de silicium (silice)

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : l'oxyde d'aluminium (alumine)

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : l'oxyde de fer (III) (oxyde ferrique)

**MgO** : l'oxyde de magnésium (magnésie)

**CaO** : l'oxyde de calcium

**TiO<sub>2</sub>** : le dioxyde de titane

**CuO** : l'oxyde de cuivre (II) (oxyde cuivrique)

**H<sub>2</sub>O** : l'eau (taux d'humidité)

**L.O.I** : la perte au feu (taux de la matière organique)

Les caractéristiques du sable brut se changent après le lavage (sable lavé) à cause des étapes du processus :

- Les deux étapes de classification changent la granulométrie ;
- L'étape d'agitation avec l'eau changent le taux d'argile ;
- L'étape de séparation des phases changent la composition chimique.

### III.5. Mode opératoire et matériels utilisé

#### a. Détermination de la silice

Le principe de cette étape est de déterminer le taux de la silice trouvé dans le sable broyé (brut et lavé) dans différents temps (15 min et 30 min)

- On prend un échantillon de 1g du sable broyé et on le met dans un creuset en platine, la masse totale est notée ( $m_1$ ) ;
- On ajoute 20 ml de l'acide fluorhydrique (HF) (**figure III.4**) ;
- On chauffe le contenu du creuset sur une plaque chauffante a une basse température (pour que le mélange s'évapore et soit sec) puis on ajoute 10 ml de l'acide fluorhydrique (HF) jusqu'à l'évaporation et son séchage ;



**Figure III.4** : Acide fluorhydrique (HF)

- On met le contenu de creuset dans un four model « VECSTAR Ltd » (**figure III.5**) à 1000°C pendant 1 heure ;



**Figure III.5** : Le four à chauffer

- On laisse refroidir et on pèse ( $m_2$ ).
- On calcule :

$$\% \text{ SiO}_2 = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100$$

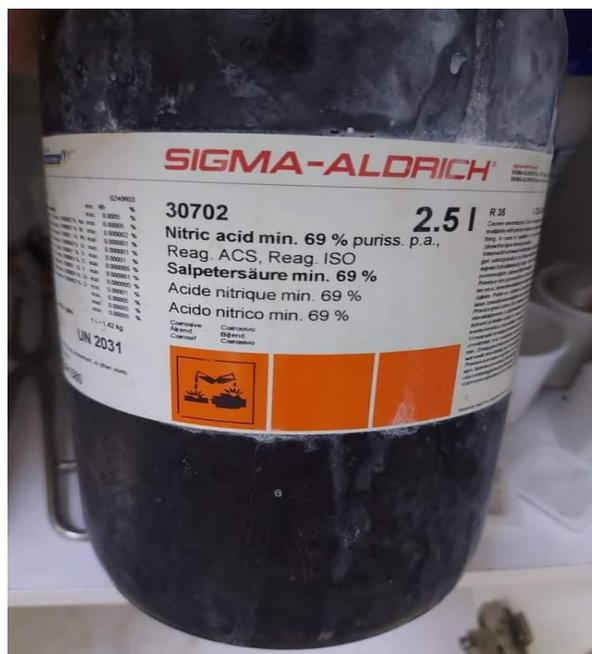
% SiO<sub>2</sub> : composition massique en pourcentage du SiO<sub>2</sub> dans l'échantillon du sable.

### b. Détermination des impuretés

Le principe de cette étape est de déterminer le taux des impuretés trouvés dans le sable broyé pour les deux types (EL-Arricha et Hassi Messaoud) dans différents temps (15 min et 30min)

On détermine les impuretés de chaque échantillon de sable brut et lavé broyé à son propre temps.

- On prend un échantillon de 1g du sable broyé et on le met dans un bêcher en téflon ;
- On ajoute 15 ml de l'acide fluorhydrique (HF) de la marque « BIOCHEM Chemopharma » (**figure III.4**) et 5 ml de l'acide nitrique concentré ( $\text{HNO}_3$ ) de marque « SIGMA-ALDRICH » (**figure III.6**);



**Figure III.6 :** L'acide nitrique concentré ( $\text{HNO}_3$ )

- On chauffe jusqu'au séchage ;
- On laisse l'échantillon se refroidir puis on ajoute 5 ml de l'acide chlorhydrique concentré (HCl) et 20 ml d'eau distillée ;
- On chauffe jusqu'à l'ébullition puis on le laisse refroidir ;

- On filtre à l'aide d'un papier Wattman N°44 dans une fiole de 100 ml (**figure III.7**) ; et on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.



**Figure III.7** : Filtration du mélange

- On mesure les concentrations des différents métaux (Al, Fe, Mg, Ca, Ti, Cu) sous forme des oxydes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ) à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique modèle « *Perkin Elmer precisely* » (**figure III.1**).

### III.6. Spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

La spectrométrie d'absorption atomique permet de quantifier les éléments métalliques en solutions. Chaque élément a un nombre spécifique d'électrons associés à son noyau. La configuration orbitale normale et la plus stable des électrons est appelée état de base. Lorsqu'une énergie est fournie à un atome, ce dernier l'absorbe et adopte une configuration électronique appelée état d'excitation. Cet état est instable et l'atome retourne immédiatement à son état de base libérant ainsi une énergie lumineuse [24].

La spectrophotométrie d'absorption atomique est essentiellement une méthode d'analyse quantitative qui convient beaucoup mieux à la détermination des traces qu'à celle des

composants majeurs. Elle présente de nombreux avantages : haute sensibilité, grande spécificité, influence négligeable de la composition du milieu analysé, rapidité, faible quantité de substance nécessaire (1ml de la solution peut suffire) et facilité de préparation des solutions étalons.

Les inconvénients majeurs de cette technique sont les suivants : nécessité d'utiliser pour chaque élément à doser une source caractéristique, technique d'analyse destructrice, domaine d'application limité presque exclusivement aux métaux, nécessité d'avoir des concentrations assez peu élevées et nécessité enfin de faire passer l'échantillon en solution [24].

Les principales techniques mettant en jeu la spectroscopie d'absorption atomique utilisée en analyse chimique sont :

- L'émission d'arc ou d'étincelle (analyse qualitative préalable) ;
- L'émission de flamme et l'absorption atomique (analyse quantitative des éléments à faibles teneurs).



**Figure III.8** : Spectromètre d'absorption

### **III.7. Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille,...).

#### **III.7.1. Principe de l'essai analyse granulométrique**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Le principe de notre opération est de déterminer la granulométrie des échantillons de sable qu'on a utilisé avant et après broyage pour les deux types (EL-Arricha et Hassi Messaoud) brut et lavé par tamisage à l'aide de deux tamiseurs avant et après broyage.

#### **III.7.2. Définition du tamisage**

Le tamisage est le passage d'un produit solide ou d'une suspension au tamis pour réaliser la séparation et éventuellement l'analyse granulométrique de certains éléments.

Pour cela ; avant broyage on procède comme suit :

- On met les tamis l'un sur l'autre de la plus petite ouverture des mailles vers la plus grande du bas vers le haut et on verse l'échantillon sur le premier tamis (au sommet) ;
- On place l'ensemble des tamis dans un vibreur et laisser vibrer pendant 5 minutes a une amplitude de 200 ;
- On pèse le refus sur chaque tamis et on détermine la granulométrie de l'échantillon à l'aide d'un logiciel.

Après broyage on aura des échantillons très fin pour cela on utilise un tamiseur électronique spécial et on procède comme suit :

- On pèse l'échantillon qu'on veut tamiser ;
- Introduisons le poids de notre échantillon dans le tamiseur à l'aide de son clavier puis verser notre échantillon sur le tamis et le mettre en marche pendant 3 minutes ;

-Après 3 minutes on pèse le refus et l'introduire encore dans le tamiseur ;

-Enfin la taille de grain de notre échantillon s'affiche automatiquement sur l'écran du tamiseur.



**Figure III.9 :** Machines à tamiser

Le présent travail a été réalisé au niveau du Laboratoire de la société ADWAN Chemicals à Fornaka-Mostaganem.

### III.8. Conclusion

Le sable brut est caractérisé par une couleur jaune qui représente une indication sur la présence des impuretés comme les métaux. Les compositions chimiques des différents types de sables bruts présentent des teneurs en silice inacceptables pour la fabrication de verre de bonne qualité, ou de verre transparent, car ils contiennent des teneurs élevées en métaux chromophores, particulièrement le fer qui apparaît sous forme des pellicules recouvrent le quartz et donne la couleur jaune et rouge au verre, ainsi que la teneur en ces éléments augmente la viscosité à haute température en particulier l'alumine, d'où la nécessité de faire un lavage pour éliminer ces impuretés, en augmentant le taux de silice.

L'analyse chimique du sable lavé montre l'augmentation de la teneur en silice, ce qui implique la diminution de celle des impuretés, et ça, à des valeurs convenables pour répondre aux besoins des industries verrières.

On obtient des différents types de farine de silice, selon la composition chimique et selon la granulométrie. La composition chimique de la farine de silice est la même que celle du sable siliceux puisque cette dernière ne se change pas durant le processus du broyage.

---

---

Chapitre IV  
Résultats et  
discussions

---

---

### IV.1. Introduction

Dans le présent chapitre nous nous sommes proposé d'examiner l'effet du temps de broyage sur la qualité de sable brut et lavé pour les deux types (El Arricha et Hassi Messaoud) en vue de déterminer le taux des impuretés, le taux de la silice et la granulométrie pour chaque type.

Nous avons été amenés à évaluer les différents temps relatifs au broyage du sable ceux décrivant le temps parfait qui donne un sable de meilleure qualité.

### IV.2. Détermination de la granulométrie avant broyage

#### IV.2.A. Sable d'EL Arricha

Les résultats d'analyses granulométriques avant broyage du sable brut et lavé d'El Arricha sont présentés dans le tableau ci-après. Le refus sur un tamis représente la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

**Tableau IV.1 :** Granulométrie du sable brut et lavé d'El Aricha avant le broyage

Ouverture des mailles des tamis		Refus (%)	
mm	Mesh	Sable brut	Sable lavé
2	10	4.02	0.90
1	18	5	0.81
0,85	20	2.92	1.19
0,6	30	12.01	2.46
0,5	35	9.48	3.70
0,3	50	34.30	31.69
0,212	70	17.72	33.60
0,125	120	11.50	22.83
0,09	170	1.61	1.85
0,04	325	1.21	0.88
Pan		0.23	0.09

Les figures IV.1 et IV.2 représentent les courbes granulométriques du sable d'El Arricha brut et lavé, respectivement. La granulométrie mesure la dispersion de la taille des grains.

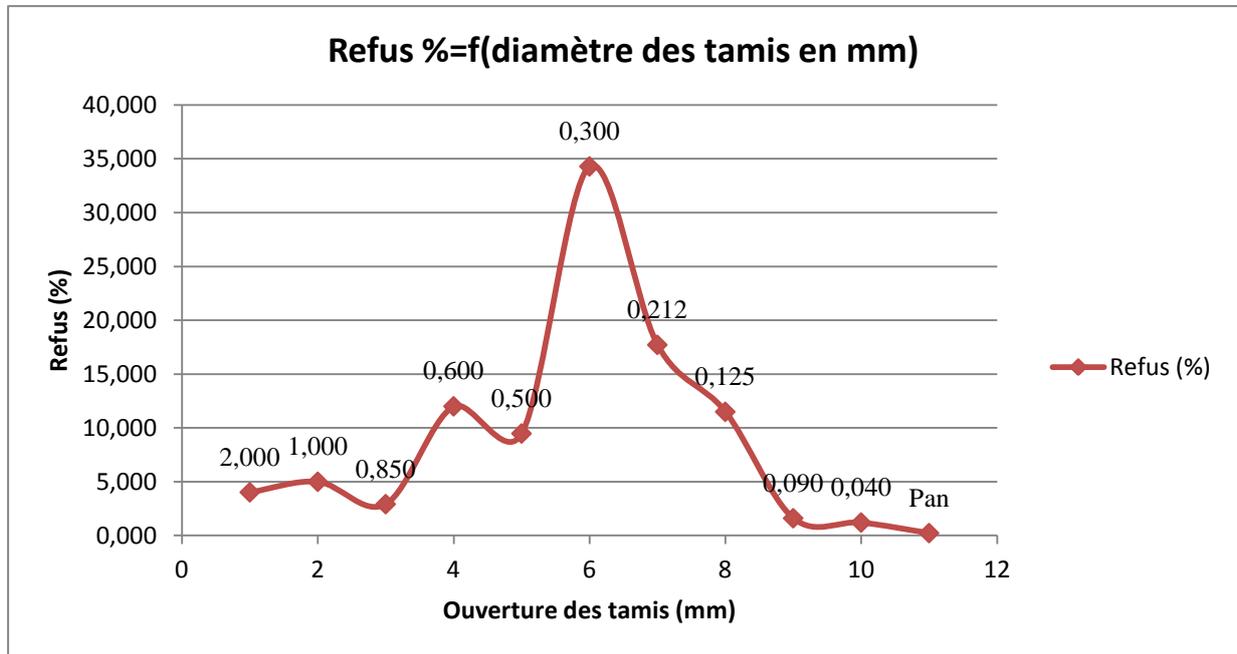


Figure IV.1 : Courbe granulométrique du sable brut d'EL ARRICHA

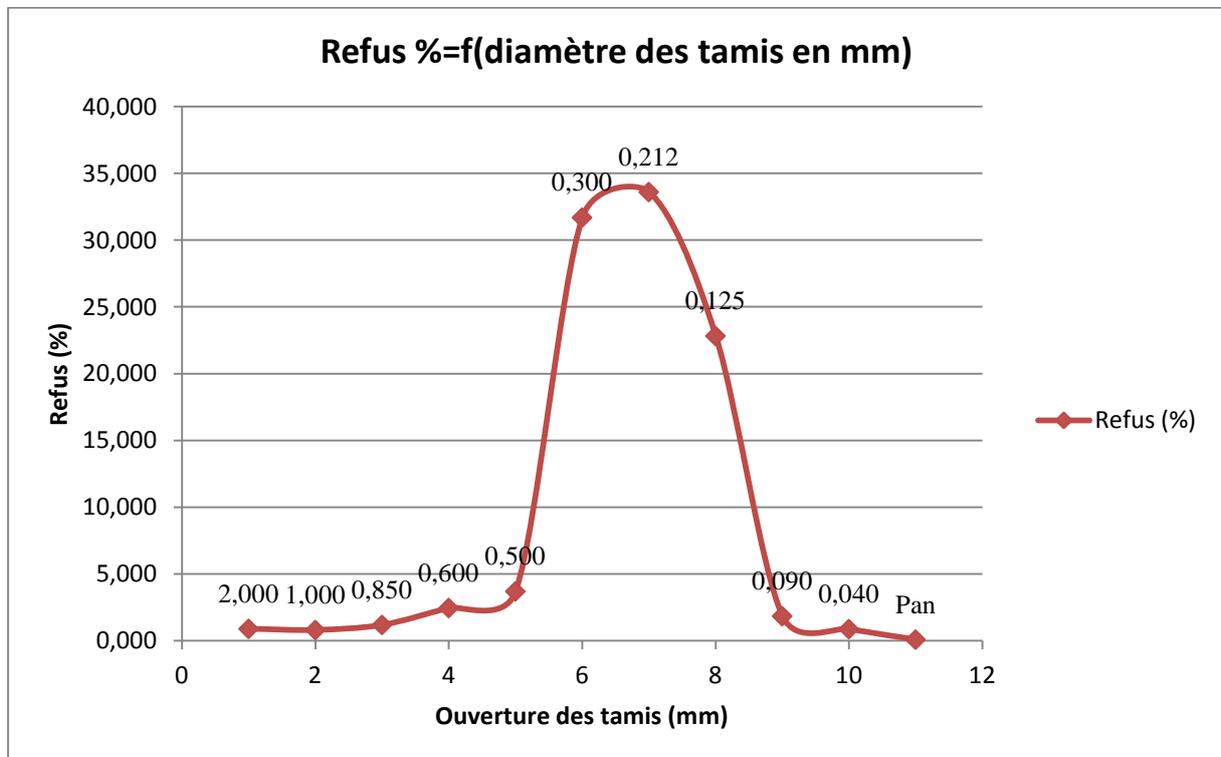


Figure IV.2 : Courbe granulométrique du sable lavé d'EL ARRICHA

A partir des résultats de l'analyse granulométrique du sable d'El Arricha, le sable brut contient une faible proportion des grains dont la taille est inférieure à 0,09 mm. De la même façon, le sable lavé contient une teneur en grains fins plus faible du fait que les grains fins sont généralement entraînés avec l'eau de lavage.

#### IV.2.B. Sable de Hassi Messaoud

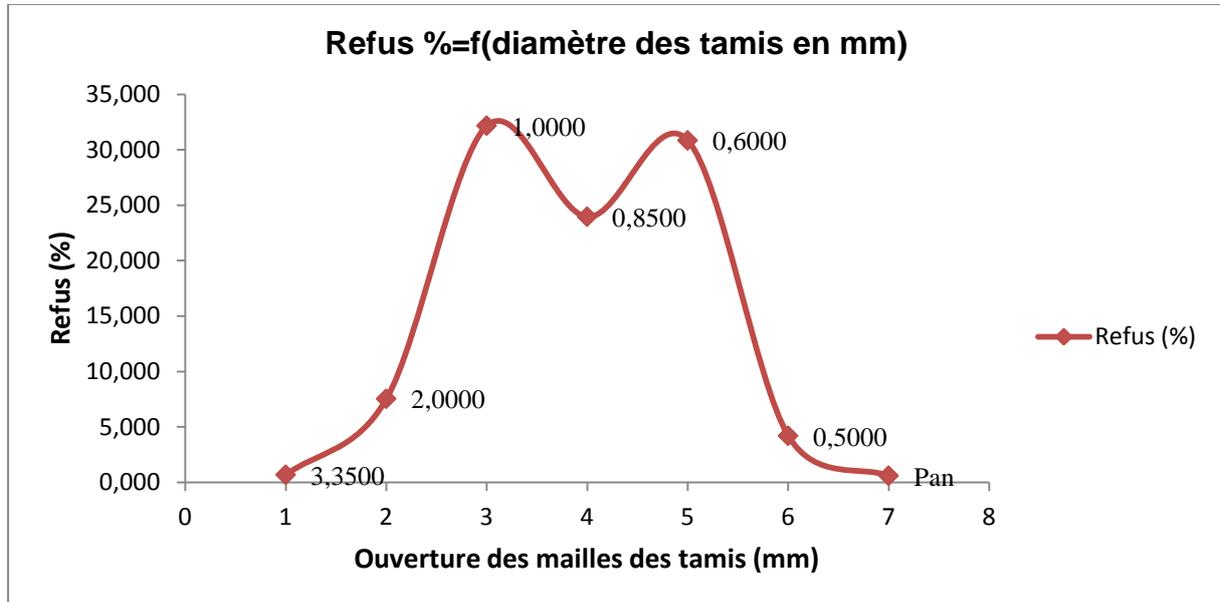
Les résultats d'analyse granulométrique avant broyage du sable brut et lavé de Hassi Messaoud sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.2** : Granulométrie du sable brut et lavé de Hassi Messaoud avant le broyage

Ouverture des mailles des tamis		Refus (%)	
mm	Mesh	Sable brut	Sable lavé
3.350	6	0.69	0.69
2.000	10	7.54	7.54
1.000	18	32.17	32.17
0.850	20	23.96	23.96
0.600	30	30.84	30.84
0.500	40	4.20	4.20
Pan		0.60	0.60

La figure IV.3 représente la courbe granulométrique du sable de Hassi Messaoud brut et lavé.

D'après la figure IV.3, il est évident que la majorité de tailles de sable brut et lavé se situent entre 1,0 et 0,5 mm avec deux principaux pics à 32,17 et à 30,84 %, pour les grains de la taille de 1,0 et de 0,6 mm, respectivement. Alors que 86,97 % de particules ont une taille de 0,6 à 1 mm, donc le sable de Hassi Messaoud est un sable moyen selon la classification granulométrique ASTM [25].



**Figure IV.3 :** Courbe granulométrique du sable brut et lavé de Hassi Messaoud

A l'instar des résultats de l'analyse granulométrique du sable d'El Arricha, le sable brut de Hassi Messaoud est constitué d'une faible proportion des grains dont la taille est inférieure à 0,5 mm. Cependant, pour le sable lavé, la proportion des grains dont la taille est de 1 mm est la proportion la plus importante avec un refus de 31.21 %.

### **IV.3. Détermination de la teneur en silice pour les deux types de sable (El Arricha et Hassi Messaoud) aux différents temps de broyage**

#### **IV.3.1. Sable d'El Arricha**

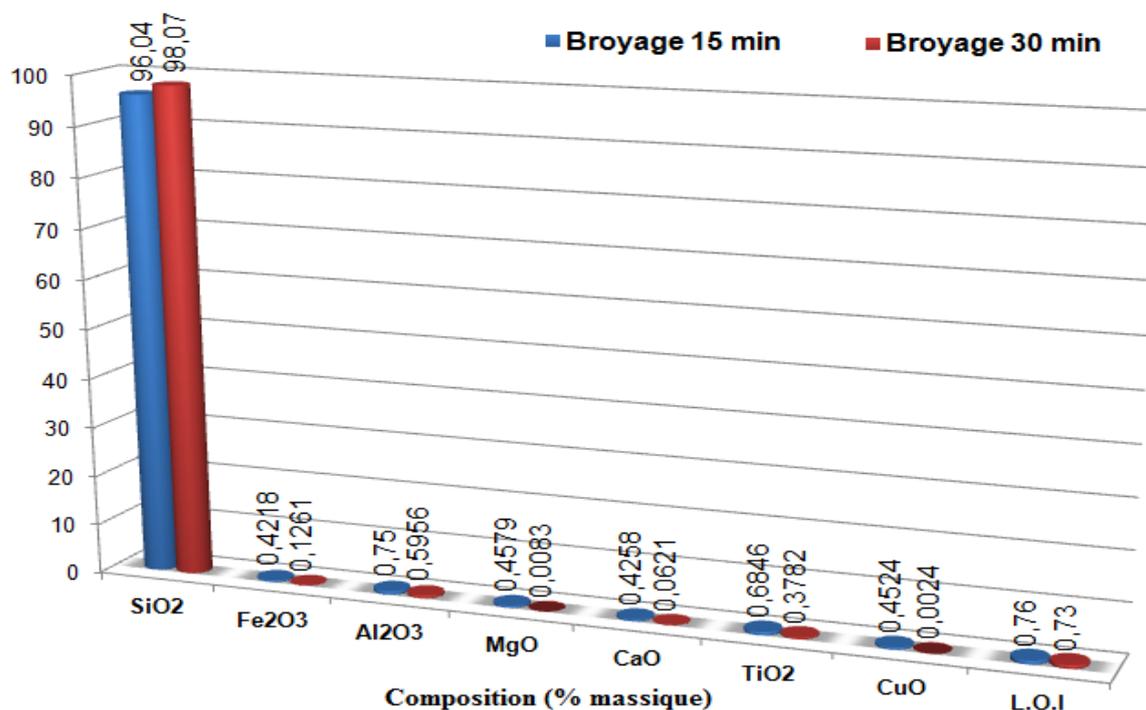
##### **IV.3.1.a. Sable brut**

Les résultats de l'analyse chimique du sable brut d'El Arricha sont regroupés dans le tableau IV.3. Ces résultats sont obtenus selon le protocole expérimental détaillé au chapitre précédent.

**Tableau IV.3** : Composition chimique (% massique) du sable brut d'El Arricha aux différents temps de broyage

Composition	Broyage 15 min	Broyage 30 min
SiO <sub>2</sub>	96.04	98.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4218	0.1261
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.75	0.5956
MgO	0.4579	0.0083
CaO	0.4258	0.0621
TiO <sub>2</sub>	0.6846	0.3782
CuO	0.4524	0.0024
L.O.I	0.76	0.73

La figure IV.4 montre l'histogramme de la composition chimique (% massique) du sable brut d'El Arricha.



**Figure IV.4:** Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable brut d'El Arricha

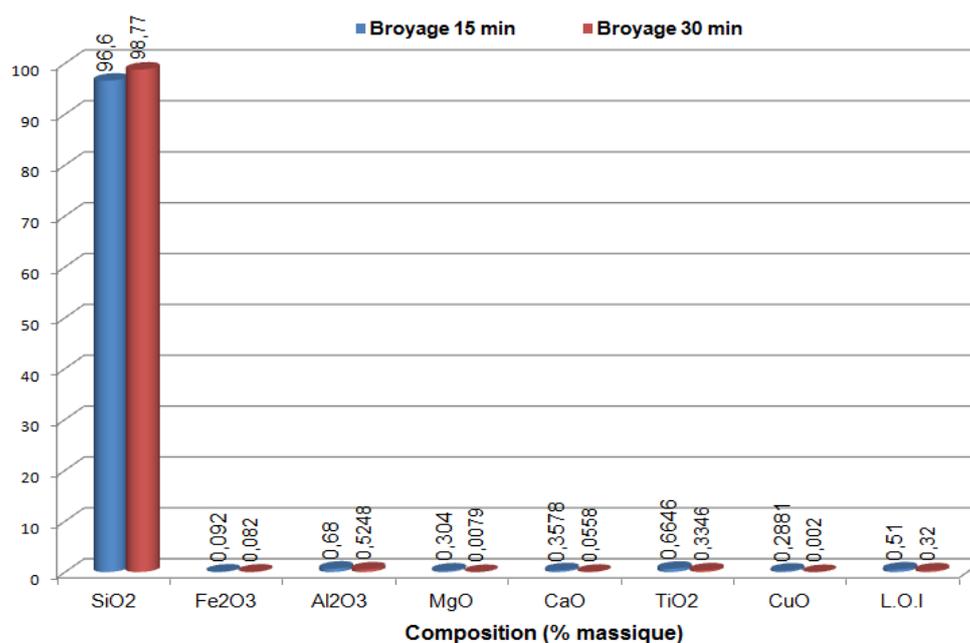
### IV.3.1.b. Sable lavé

Les résultats de l'analyse chimique du sable lavé d'El Arricha sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.4 :** Composition chimique (% massique) du sable lavé d'El Arricha aux différents temps de broyage.

Composition	Broyage 15 min	Broyage 30 min
SiO <sub>2</sub>	96.60	98.77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.092	0.0820
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.68	0.5248
MgO	0.304	0.0079
CaO	0.3578	0.0558
TiO <sub>2</sub>	0.6646	0.3346
CuO	0.2881	0.0020
L.O.I	0.51	0.32

La figure IV.5 montre l'histogramme de la composition chimique (% massique) du sable lavé d'El Arricha.



**Figure IV.5:** Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable lavé d'El Arricha

### IV.3.2. Sable de Hassi Messaoud

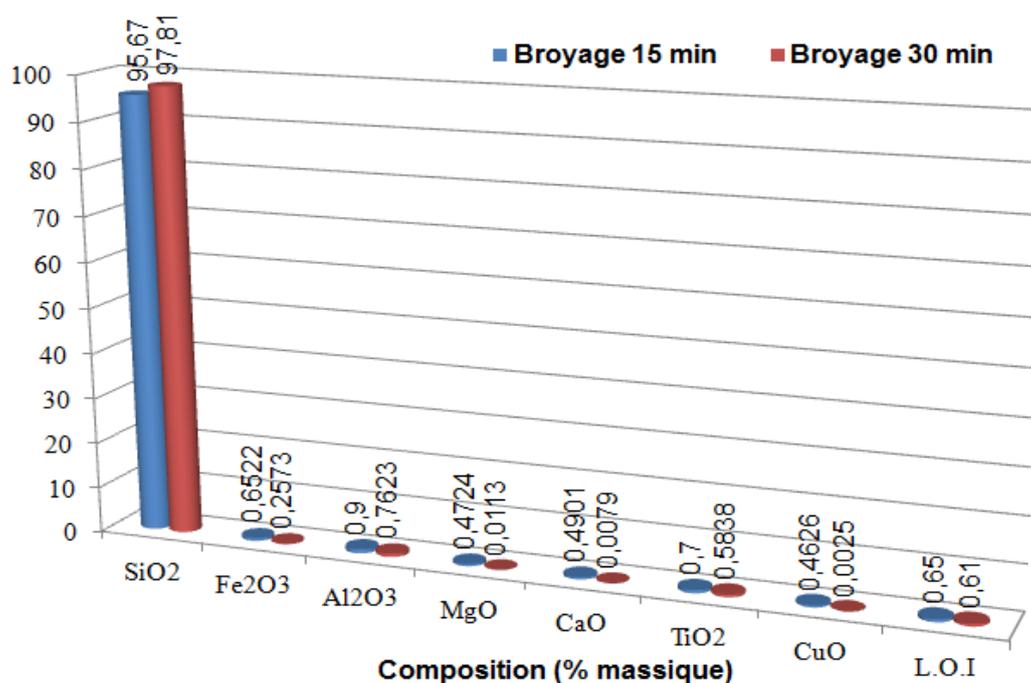
#### IV.3.2.a. Sable brut

Les résultats de l'analyse chimique du sable brut de Hassi Messaoud sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.5 :** Composition chimique (% massique) du sable brut de Hassi Messaoud aux différents temps de broyage.

Composition	Broyage 15 min	Broyage 30 min
SiO <sub>2</sub>	95.67	97.81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6522	0.2573
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	0.7623
MgO	0.4724	0.0113
CaO	0.4901	0.0079
TiO <sub>2</sub>	0.7	0.5838
CuO	0.4626	0.0025
L.O.I	0.65	0.61

La figure IV.6 montre l'historgramme de la composition chimique (% massique) du sable brut de Hassi Messaoud.



**Figure IV.6:** Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable brut de Hassi Messaoud

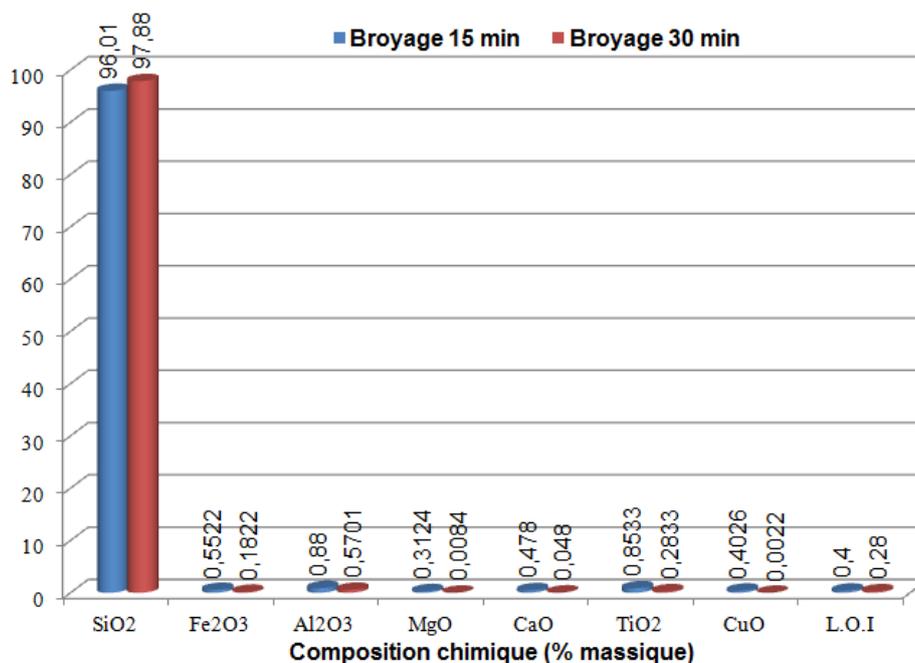
### IV.3.2.b. Sable lavé

Les résultats de l'analyse chimique du sable lavé de Hassi Messaoud sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.6 :** Composition chimique (% massique) du sable lavé de Hassi Messaoud aux différents temps de broyage

Composition	Broyage 15 min	Broyage 30 min
SiO <sub>2</sub>	96.01	97.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5522	0.1822
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.88	0.5701
MgO	0.3124	0.0084
CaO	0.478	0.0480
TiO <sub>2</sub>	0.8533	0.2833
CuO	0.4026	0.0022
L.O.I	0.40	0.28

La figure IV.7 montre l'histogramme de la composition chimique (% massique) du sable lavé de Hassi Messaoud.



**Figure IV.7:** Histogramme de la composition chimique (% massique) du sable lavé de Hassi Messaoud

Le tableau ci-dessous résume les résultats relatifs au taux de silice pour les deux sables (El Arricha et Hassi Messaoud) broyés à 15 et 30 min. Ces résultats montrent que le sable d'El-Arricha est plus riche en silice avec un taux de 98,77% (broyage de 30 min) par rapport à celui de Hassi Messaoud.

**Tableau IV.7 :** Récapitulatif de la teneur de silice pour les deux sables (El Arricha et Hassi Messaoud) broyés à 15 et 30 min.

Sable		Taux de silice	
		Broyage de 15 min	Broyage de 30 min
El Arricha	Brut	96,04	98,07
	Lavé	96,60	98,77
Hassi Messaoud	Brut	95,67	97,81
	Lavé	96,01	97,88

### IV.3. Détermination de la granulométrie après le broyage

La granulométrie ou l'analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

La granulométrie ou l'analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0,063 mm.

On appelle tamisat ou passant l'ensemble de grains qui passent à travers le tamis, et le refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

Le tableau suivant donne la classification granulométrique selon la norme ASTM.

**Tableau IV.8 :** Classification granulométrique selon la norme ASTM

Granulat	Argiles fines	Limons et argiles	Sables fin	Sable moyen	Sable grossier	Gravier fin
Diamètre (mm)	0 - 0,053	0,053 - 0,063	0,075 - 0,5	0,5 - 2	2 - 15	15 - 20

La granulométrie des deux sables brut et lavé d'El Arricha et de Hassi Messaoud après broyage a été déterminée. Les résultats sont regroupés dans le tableau VI.9. A noter que la granulométrie peut être définie comme une mesure de la dispersion de la taille des grains.

**Tableau IV.9 :** Granulométrie des deux sables brut et lavé d'El Arricha et de Hassi Messaoud après le broyage

Sable	Temps de broyage	Taille des grains de sable ( $\mu\text{m}$ )	
		Brut	Lavé
El Arricha	15 min	125	125
	30 min	75	75
Hassi Messaoud	15 min	200	185
	30 min	175	145

Les résultats ci-dessus montrent que selon la norme ASTM, les deux sables brut et lavé d'El Arricha et de Hassi Messaoud après broyage sont considérés comme sable fin avec une granulométrie qui varie entre 0,075 et 0,2 mm.

#### IV.4. Discussion des résultats

L'analyse des deux types de sable brut avec un temps de broyage de 15 min a montré que la silice est la plus dominante avec un taux élevé qui avoisine 96% pour les deux sables d'El Arricha et de Hassi Messaoud. Le taux des autres constituants varie entre 0,4 et 0,9 %.

Après lavage nous pouvons remarquer qu'il y a une légère augmentation du taux de silice pour les deux sables d'El Arricha et de Hassi Messaoud. Ainsi, nous pouvons remarquer aussi une légère diminution des différents taux des impuretés.

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que le procédé de lavage des deux sables d'El Arricha et de Hassi Messaoud, avec un temps de broyage de 15 min, a permis d'éliminer les impuretés et les matières argilières mais d'un pourcentage faible. Ainsi, pour ce temps de broyage, lors de l'analyse chimique, l'acide fluorhydrique (HF) n'a pas pu éliminer

convenablement toutes les impuretés à cause de la taille des grains. Cependant, pour avoir de la silice pur il est impérativement nécessaire de procéder à un temps de broyage supérieur.

D'autre part, un broyage d'une durée de 15 min permet de minimiser l'énergie dépensée et d'obtenir un sable de bonne qualité. Un sable avec ces caractéristiques peut être utile pour certaines applications qui ne demandent pas un sable ultra pur tels que les fonderies et l'industrie du verre.

Pour un broyage d'une durée de 30 min des deux types de sable brut d'El Arricha et de Hassi Messaoud, les résultats d'analyse chimique montrent que le taux de silice s'est amélioré et avoisine 98%. Le taux des autres constituants varie entre 0,002 et 0,7 %.

Après lavage, le taux de silice du sable d'El Aricha a augmenté de 1% tandis que pour le sable de Hassi Messaoud aucun changement n'a été constaté. Pour les impuretés, on peut dire qu'il y a un faible changement. Par contre, nous pouvons remarquer une nette diminution des différents taux des impuretés par rapport au sable brut.

D'après ce qui précède, le sable d'El Arricha contient un taux de silice plus élevé que celui de Hassi Messaoud. Les faibles teneurs en argile ( $< 1$ ) sont d'autres paramètres importants qui témoignent aussi de la qualité du sable.

D'autre part, l'analyse granulométrique a montré que les deux sables brut et lavé d'El Arricha et de Hassi Messaoud après broyage d'une durée de 15 et 30 min sont considérés comme un sable fin selon la norme ASTM avec une granulométrie qui varie entre 0,075 et 0,2 mm.

### **Conclusion**

Cette étude a été effectuée pour déduire l'influence du temps du broyage sur la qualité du sable, sachant que les normes du laboratoire utilisent un temps de broyage de 30 minutes. Cependant, le temps de broyage de 30 min est l'idéal pour avoir de la silice de grande pureté, mais le temps de broyage de 15 min peut être utilisé pour avoir de la silice d'une pureté acceptable selon le domaine d'utilisation.

---

---

# Conclusion Générale

---

---

## CONCLUSION GENERALE

### Conclusion générale

Le travail mis en œuvre dans le cadre de ce mémoire nous a permis d'étudier l'influence du temps de broyage sur la qualité du sable (le taux des impuretés, le taux de silice et la granulométrie) selon un procédé utilisant le sable comme étant la source de silice. Ce travail a été réalisé au niveau de l'entreprise Adwan Chemicals Algeria, à Fornaka (Wilaya de Mostaganem). Notre stage au sein de cette entreprise nous a permis de consolider nos connaissances théoriques par la pratique et d'avoir une idée très précise sur le procédé du sable.

Concernant le temps du broyage du sable, il joue un rôle très important pour améliorer les propriétés chimiques et plus précisément le taux de silice car c'est l'une des priorités de l'entreprise Adwan Chemicals Algeria.

Dans notre étude on a utilisé l'analyse granulométrique afin de classer et mesurer la dispersion de la taille des différents grains constituant l'échantillon de sable des deux types, d'El-Arricha et de Hassi Messaoud.

Pendant notre travail nous avons diminué le temps de broyage dans le but de gagner du temps, d'économiser l'énergie, de réduire le coût et montrer que le temps de broyage joue un rôle très important concernant les propriétés du sable, sachant que la norme du laboratoire concernant le temps du broyage est de 30 min et à ce temps-là qu'on a obtenu une farine de silice de grande teneur en SiO<sub>2</sub>. Ainsi, la finalité de cette étude est de comprendre les corrélations existant entre le temps de broyage et le taux de silice

Les résultats de ces analyses montrent que le sable d'El-Arricha est le plus riche en silice avec un taux de 98,77 % par rapport à celui de Hassi Messaoud avec un taux de 97,88 % en utilisant un broyage de 30 min. D'ailleurs le sable d'El-Arricha est le plus utilisé et le plus demandé.

D'autre part, un broyage d'une durée de 15 min permet de minimiser l'énergie dépensée, gagner du temps et obtenir un sable de bonne qualité. Lors du brayage de 15 min, le sable d'El-Arricha a donné une farine de silice avec un taux de 96,60 % et celui de Hassi Messaoud avec un taux de 96,01 %. Un sable avec ces caractéristiques peut être utile pour certaines

## CONCLUSION GENERALE

applications qui ne demandent pas un sable ultra pur tels que les fonderies et l'industrie du verre.

### **Perspectives :**

En perspective, il faut travailler sur la durée de lavage du sable pour réduire la consommation de l'eau et le temps de séchage. Nous préconisons aussi d'effectuer une étude par diffraction des rayons X afin de déterminer l'influence de la cristallinité et de la taille des cristallites sur la qualité du produit fini. Les résultats de cette étude vont aussi nous renseigner de la teneur en quartz du sable utilisé.

### **Recommandations:**

Nous recommandons de mettre en place deux procédés de broyage, celui de 30 min et un autre d'une durée de 15 min afin de diminuer la consommation en énergie de broyage ainsi que le temps nécessaire à cette opération. Cela va se répercuter directement sur le prix de vente de la farine de silice.

---

# Références Bibliographiques

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BARBOSA, V.F.F.**, MacKenzie, K.J.D. & Thaumaturgo, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica : sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2, 309-317 (2000).
- [2] **BOUDLAL Omar**, «étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations», Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [3] <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/617185/les-differents-types-de-sable>.
- [4] <http://www.fediex.be/upload/files/Etude%20sable.pdf>.
- [5] <http://www.sibelco.fr/item.img/medias/images/sibelcofrance-fds-sable-siliceux-2010-1.pdf>.
- [6] <http://www.sibelco.fr/item.img/medias/images/sibelcofrance-fds-sable-siliceux-2010-2.pdf>.
- [7] **SCHMIDT S.**, the formation of sodium formate on glass surfaces : examination of historical objects In : Berliner Beiträge zur Archäometrie, 11, pp. 137-183, 1992.
- [8] **ESSELIMANI Abdelhadi**, Etude de l'influence physico-chimique de la qualité du sable sur le rendement de la filtration du silicate de sodium (ADWAN, Mostaganem), mémoire de Magister, Université de Mostaganem, 2012.
- [9] **NEKOUS Mohamed**, «Elaboration du silicium à partir du sable du désert Algérien», mémoire de magister, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2013.
- [10] **KHALIFA Marouan**, ATYAOUI Malek, HAJJI Messaoud, OUERTANI Rachid et EZZAOUIA Hatem, « Purification of metallurgical-grade silicon powder via chemical attack by hydrofluoric and nitric acids followed by thermal treatment» Materials Science in Semiconductor Processin 16, 1742–1746, 2013.
- [11] **DUXSON, P.**, MALLICOAT, S.W., LUKEY, G.C., KRIVEN, W.M., VAN DEVENTER, J.S.J. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects 292, 8-20 (2007).
- [12] [http://www.mi-france.fr/doc/01\\_FR\\_Silice\\_fact\\_sheet.pdf](http://www.mi-france.fr/doc/01_FR_Silice_fact_sheet.pdf).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13] **RAHMOUN Ilham**, «Réalisation et caractérisation de silicium poreux pour des applications optoélectroniques », thèses d'université des sciences et de la technologie d'Oran (Mohamed Boudiaf) ,2009.
- [14] <https://www.adwanchem.com>
- [15] <https://www.adwanchem.com/doc/arabic.saoudit.industry/>
- [16] <https://www.adwanchem.com/dz/algeria.managment/pdf>
- [17] **BOUNOUAR Malika**, «Etude de la purification du silicium destiné à la réalisation de cellules photovoltaïques». Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [18] **RONEESAC F.**, « Analyse chimiques et techniques instrumentales » DUNOD, Paris, 2004.
- [19] **MATHIEU H.**, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Paris, 1996.
- [20] **ZELLAGUI Rahima**, «Réalisation et étude des propriétés électroniques des couches de silicium poreux», mémoire de magister, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [21] **HAUMESSER P.H.**, «Elaboration par croissance Czochralski, caractérisation spectroscopiques et propriétés laser de monocristaux dopés par l'Ytterbium», thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, France, 2000.
- [23] **BENAHMED BENABDALLAH Nadia**, propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe, université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2006.
- [22] **DÉGOULANGE Julien**, Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2008.
- [23] **NOURINE Fatima** et **NAIMI Fatiha**, Amélioration de la qualité du sable traité à l'ENAVA d'Oran, mémoire d'ingénieur, institut de chimie industrielle, Université de Mostaganem, 1993.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

[24] **DJEDID Walid**, Augmentation de la teneur en silice dans le sable de deux régions de la wilaya d'Adrar, mémoire de Master, Université d'Adrar, 2017.

[25] **AMERI Billel**, Impact Environnemental sur l'Etude Physico-chimique Durant les Etapes de Traitement de Sable (Adwan, Mostaganem), mémoire de Magister, Université de Mostaganem, 2012