

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

Guelmine Roqiya & Gana Zeyneb

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA TECHNOLOGIE DE
DOPAGE DES COMPOSES DU SILICIUM NATUREL**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Rokbi Mansour	Professeur	Président
Mekideche Salih	Doctorant	Examineur
Farsi Chouki	MCA	Encadreur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2022

Remerciements

بسم الله الرحمان الرحيم

الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه... الحمد لله السميع العليم ذي الفضل العظيم... الحمد لله والشكر لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لو لا أن هدانا الله.. و الصلاة و السلام على الهادي الكريم رسولنا وحبينا محمد عليه وعلى آله و صحبه أجمعين" أما بعد يطيب لنا أن نتقدم ببالغ الشكر والتقدير لأستاذنا ومعلمنا ومرشدا في هذا العمل الذي كان سندا منحتنا لنا الحياة الدراسية الاستاذ المشرف " فارسي شوقي " راجين من الله العلي القدير أن يرفع شأنه ويجازيه بفضله الكريم على كل ما قدمه لنا في مسيرتنا الدراسية ليكون بذلك أبا نقدي به ونعود إليه دوما ببارك الله فيه وحفظه لنا فله كل التقدير والاحترام. كما نتقدم بالشكر لكل أساتذتنا الكرام في مسيرتنا الدراسية في كل أطوارها على مجهوداتهم المقدمة لنا فلولاهم ما كنا هنا... وأتوجه بالشكر والتقدير للأساتذة المشرفين على لجنة المناقشة كل من :استاذ منصور ركبي واستاذ مكيدش صلاح كما أتقدم بالشكر الخاص لكل الأساتذة الذين قدموا يد العون خلال دراستنا على رأسهم الأستاذ الفاضل جراد عبد القادر والأستاذ الكريم ركبي منصور والاستاذ موسى زاوي على إرشاداتهم ومساندتهم لنا خلال سنوات الدراسة ببارك الله لكم وجعلها في ميزان حسناتكم يارب

Dédicace

إلى نور العيون ورمش الجفون و البلم الشافي... والقلب الصافي و الحنان الكافي... إلى من
تقع جنتي تحت أقدامها... إلى أروع أم في الوجود...أمي الغالية زهية حفظها الله لي؛ أهدي
نبضات قلبي وبهجة حياتي وأنيسها لك كل نجاحي وفخري وعزتي أُمي إلى أبي الفاضل
الشامخ المكارم والراسخ الفاضل سندي المتين وأنيسي المعين أبي صالح رعاك الله إلى دفئ
البيت وسعادته لسندي وعزتي إلى الأرواح المتشابهة بروحي لكم إخوتي " حمزة ، أيوب،
إلى كل أصدقائي لمن منحتم الحياة بقرب جوارهم لكم امتناني " سارة ،شيماء ،ياسين
لمن ضحكت الايام ...واخلاصي كل باسمه لكل من عهد الزمان بقربه وتغمدت الروح بؤنسه
..لنلك اللحظات والسنين العابرة أهديها ذكرياتي وفرحتي .. بجواره وذبلت الوجوه بعسرها
لمن شدد قلبه وانصغرت القلوب ببعده إلى تلك النفوس .. لمن حببنا الله في قلبه وحببنا فيه
لصدقة صارت أخوة وعلم خلق الأبوة نتنفس ضيق الوقت وتنفرج المكارب ..العابرة ألوح
دعاء خالص من القلب تجزى .. إلى كل قلب وعقل وردة شكر وطيب خاطر ...ببهجة قلوبنا
القلوب الطيبة في دعوة مرجوة دائمة " أستودعكم الله الذي لا يضيع ودائعه في الدنيا
عسى جنة الخلد تجمعنا " ..والآخرة

قلمين رقية

Dédicace

إلى من أوصانا بهم الرحمن حين قال

”وَاخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذَّلِيلِ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا“

إلى من أفضلها على نفسي ولم لا فلقد ضحت من أجلي، ولم تدخر جهداً في سبيل إسعادي على الدوام إلى من وضع المولى – سبحانه وتعالى – الجنة تحت قدميها ووقرها في كتابه العزيز.. أُمي فضيلة حفظها الله لي... إلى صاحب السيرة العطرة، والفكر الُمستنير؛ فلقد كان له الفضل الأءول في بلوغي التعليم العالي ويبقى من يسيطر على ذهني في كل مسلك اسلكه صاحب الوجه الطيب والأفعال الحسنة، فلم يبخل علي طيلة حياته والذي سعيد... إلى نور عيوني وبصيرتي في هذه الحياة.. من استند عليه، ومن قسوته الحكمة اخي الغالي دراجي حماه المولى لقلبي ورعاه والى من ساعدني ولم يبخل عليا كان عوناً لي زوج اختي وبمثابة اخي ثاني عز الدين .. إلى من تسعد عيني بروية وجوههم، ويفرح فؤادي بسماع رنات ضحكاتهم إلى من يسري حبه في عروقي، من أتشارك معهم الدم والصدق والحنان اخوتي زوينة فريال نسرين راشا.. دون ان انسى بهجة وروح الذي يتملى المنزل بصوتهم .. وضحكاتهم اولاد اختي محمد وحنين.. هناك أناس ينحتون في أعماقنا مشاعر رائعة يخلدون فينا ذكرى لا تمحى.. زهفو إلى رؤياهم.. ولنا الفخر بحبهم.. ولنا الشرف بصحبتهم (0 صديقاتي وزملائي الذي اصبح بيننا رابط الاخوة فرقنا بطن واحد فقط .. فليحفظهم الله وليدم

قانة زينب

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Propriétés de la silice naturelle	
Introduction	4
I-1-Historique des matériaux méso poreux à base de silice	4
I-1-Synthèse des matériaux mésoporeux à base de silice	7
I-2 Étude des Caractéristiques des silices comme produit initial du silicium	8
I.3 La silice	8
I.3.1. Définition	8
I.3.2 Caractéristiques de la silice	8
I.3.3 Propriétés de la silice	9
I.3.4 Propriétés physiques des silices	9
I-4- Sable de silice	11
I-4-1-Propriétés du sable de silice pour une utilisation en fonderie pureté chimique	12
I-4-2-Distribution de taille	12
I-5-Céramiques réfractaires	13
I-5-1-Minéralogie des Matériaux réfractaires	13
I-6-L'Argile	14
I-7-Les fibres de verre	15
I-7-1-Applications des textiles en fibre de verre et en silice	15
I-7-2-Matières premières de silicium	16
I-8-Le quartz	17
Chapitre II : Dopage des composés du silicium naturel	
Introduction	19
II-1-Le Silicium	19
II-1-1 Silicium minéral	20
II-1-2 Le silicium organique	20

II-1-3 Les quatre types de silicium	21
II-2-Generalite sur l'operation de Ddopage	22
II-2-1 Dopage par diffusion	23
II-2-2 Dopage par implantation ionique	23
II-3 Dopage des semi-conducteurs	23
II-4 Dopage de type N et de type P	24
II-5 Technologie d'obtention du silicium dope	25
II-5-1 Silicon Valley atomique	25
II-6 Etapes principales et la technologie d'obtention de monocristaux de silicium semi-conducteur	27
II-6-1 Préparation et purification du tri-chloro-silane	28
II-7 Production du silicium dopé nucléaire (nus)	28
II-7-1 Méthode de réception	28
II-7-2 Le silicium dopé nucléaire	29
II-7-3 Exemple d'utilisation du quartz avec du silicium DOPE dans les briquets manuels pour l'allumage du gaz	29
II-8 Fabrication de circuits intégrés en carbure de silicium (SiC)	30
II-8-1 Fabrication de transistors SiC	31
II-8-1-1 La fabrication de circuits SiC	31
II-9 Dopage au bore du silicium amorphe hydrogéné	31
II-9-1 Notion de dopage au bore – cas du silicium cristallin (c-Si)	31
II-10 Méthodes de dopage des couches de silicium dans le processus de sublimation	31
Chapitre III : Domaine d'utilisation de silicium	
III-1 Silicium dans les alliages d'aluminium coulé ;Alliages d'aluminium coulé	34
III-1-1 Le rôle du silicium dans la coulée des alliages	34
III-1-2 Le silicium guérit les fissures chaudes	35
III-1-3 Effet du silicium sur les propriétés des alliages d'aluminium	36

III-2 Application de la fumée de micro silice dans les matériaux de construction	37
III-2-1 Applications de micro-fumées de silice	37
III-2-2 Avantages de l'ajout de silice microparticulaire	38
III-2-3 Avantages de l'ajout de microparticules de silicate	38
III-2-4 Propriétés physiques de la microsilice	38
III-2-5 Avantages significatifs de l'ajout de microbulles de silice au ciment	38
III-2-6 Applications de la micropoudre de silice dans divers procédés industriels La micropoudre de silice	39
III-2-6-1 Microparticules de silice dans l'industrie cimentière	39
III-2-6-2 Micro fumée de silice dans l'industrie du caoutchouc	39
III-2-6-3 Utilisation de la poudre de microsilice pour lier les granulés	40
III-2-6-4 L'utilisation de la fumée de microsilice dans l'industrie des engrais	40
III-2-6-5 La fumée de silice comme isolant La fumée de silice	40
III-2-7 Industries qui utilisent la fumée de micro-silice	40
III-2-7-1 Industrie réfractaire	40
III-2-7-2 Industrie du béton et du mortier	41
III-2-7-3 Béton de microfumée de silice haute performance (CHP)	41
III-2-7-4 Béton à haute résistance aux microfumées de silice	41
III-2-7-5 Micro béton projeté à la fumée de silice	41
III-2-7-6 Mortier et mortier de micropoudre de silice	42
III-2-8 Revêtements anti-fumée à base de microsilice	42
III-2-8-1 Poudre de microsilice dans les matériaux muraux et de décoration	43
III-2-9 Pourquoi faut-il ajouter de la silice au béton ?	43
III-2-10 Quelle quantité de silice fumée est ajoutée au béton ?	44
III-2-10-1 Le processus de mélange de la poudre de silice	44
III-2-10-2 Construction en poudre de silice	44
III- Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques	45

III-3-1 Le raffinage de la silice	45
III-3-2 Du silicium métallurgique au silicium solaire	46
III-3-3 Méthode Siemens: Procédé chimique	47
III-3-4 fabrication de cellules, plaques et modules solaires photovoltaïques	48
III-3-5 Cristallisation de la silice et formation de plaques	48
III-3-6 On distingue les impuretés	49
III-3-7 Silicium multicristallin (mc-Si)	49
III-3-8 Sciage des plaques	50
III-3-9 Silicium multicristallin en rouge	50
III-3-10 Silicium multicristallin en ruban	50
III-3-11 Fabrication des cellules	51
III-3-12 Principes de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin	51
III-3-13 L'assemblage des modules	52
III-4 L'utilisation du silicium dans l'industrie médicale	53
III-4-1 Pourquoi le silicium est-il bon du point de vue d'un chirurgien ?	53
III-4-2 Stérilité absolue	53
III-4-3 Cœur en silicium	54

Chapitre IV: Analyse et contrôle qualité des roches noires dans la production de silice

IV-1 Partie expérimental	56
Introduction	56
IV-1-1 Préparation des Echantillons	56
IV-1-1-1 Préparation des roches noires	56
IV-1-1-2 Concassages et broyage	56
IV-1-1-3 Analyse granulométrique par tamisage	57
IV-1-2 Les caractéristiques des roches noires	59
IV-1-2-1 La Densité	59

IV-1-3Analyse par Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	60
IV-1-3-1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)	60
IV-1-4Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	62
IV-1-4-1 LE PRINCIPE DE DIFFRACTION DES RAYONS X	62

Chapitre V: Résultat et discussions

V-1 Densité	64
V-2 Analyse minéralogiques-FTIR	65
V-3 Analyse minéralogiques-DRX	66
V-4 Composition minéralogique	69
Conclusion général	70
Références bibliographiques	71

Liste des figures

Figure I.1. Principales familles de solides poreux et leur distribution en taille de pore	4
Figure I.2. Représentation schématique des phases méso structurés de la famille M41S: a) MCM-41, b) MCM -48 et c) MCM-50	5
Figure I.3. Structure vermiforme de type MSU	6
Figure I.4. Représentation schématique de quelques phases mésostructurées de la famille SBA-n	6
Figure I.5. Schéma simplifié de la synthèse des matériaux mésoporeux à base de silice	8
Figure I.6. Structure multi-échelle des silices de pyrohydrolyse.	11
Figure I.7 . Classification des produits du système silice-alumine AFNOR NF B40-002	13
Figure I.8. Synthesis of silica particles from bentonite clay	15
Figure I.9. Représentation des types de fibres de verre	16
Figure I.10 : Le Quartz	17
Figure II.1: L'utilisation du silicium	19
Figure II.2: Le silicium minéral.	20
Figure II.3: Le silicium organique est une molécule obtenue en laboratoire.	21
Figure II.4: Types de molecules a base de Silicium	21
Figure II.5: Exemple de mélange de deux produits par diffusion.	22
Figure II.6: Dopage de type N et de type P	24
Figure II.7 : Technologie de dopage au silicium dans les réacteurs RBMK-1000.	25
Figure II.8: Schéma d'obtention de polysilicium métallurgique	27
Figure II.9: Four à arc pour la production de polysilicium métallurgique 27a- schéma du four à arc, b- four à une électrode, c- et four à trois électrodes.	
Figure II-10: Photo d'un briquet manuelle contenant du quartz avec silicium dopé.	29
Figure II-11: Etapes de la création d'une d'étincelle par choc piézoélectrique.	30
Figure III.1: silicium métallique	36
Figure III.2: Silice dans les matériaux de construction	37
Figure III.3: Ciment par micropoudre de silice	39

Figure III-4 : Fumée de silice pour matériaux réfractaires	40
Figure III-5: Micro fumée de silice pour revêtement de peinture	42
Figure III-6 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin	45
Figure III-7 : Procédé Siemens	47
FigureIII- 8 : Mécanisme de ségrégation des impuretés lors de la cristallisation	48
FigureIII-9 : Tirage des lingots	49
FigureIII-10 : Mise en forme des lingots de silicium multicristallin	49
FigureIII-11: Plaquesdesiliciumcristallinet scieà fil	49
Figure III-12 : Etirage d'un ruban de silicium	50
Figure III-13: Empilement des couches d'une cellules photovoltaïque au silicium cristallin	51
Figure III-14 : Assemblage des modules photovoltaïques	52
Figure IV-1 : la roche noire	55
Figure IV-2 : Concassages des roches noires a-broyage b-concassage manuel	56
Figure IV-3 : Tamisage de poudre roche noire	57
Figuer IV-4 : Messire de la densité	58
Figure IV-5 : Schéma de principe d'un spectromètre FTIR	59
Figure IV-6 : Appareil de FTIR	60
Figure IV-7: Organisation tri - périodique d'un cristal.	61
Figure IV.8 : Diffusion des rayons x et phénomène de diffraction.	62
Figure IV-9 : Appareille de mesure de la Diffraction des Rayons X (DRX)	62
Figure-V-1 courbe FTIR de la roche noire.	64
Figure-V-2 courbe FTIR de l'argile.	65
Figure-V-3 courbe DRX de la roche noire.	67
Figure-V-4 courbe DRX de l'argile.	68

Liste des tableaux

Tableau I.1. Types de la silice industrielle	9
Tableau I.2. Comparaison des propriétés physiques des silices.	10
Tableau I.3. Pureté chimique du sable de silice	12
Tableau I.4. Exemples de compositions verrières (%)	16
Tableau IV-1 : Résultat de tamisage	57
Tableau :V-1: Principales bandes infrarouges l'absorption et ses liaisons associées.	65
Tableau V-2 : Analyse minéralogiques-DRX de roche noire.	69
Tableau V-3 : Analyses chimiques-FX de roche noire.	69
Tableau V-4 : Analyses chimiques argile	69

Introduction générale

Introduction générale :

La technologie du dopage du silicium de l'état naturel est réalisée par des préparations mécaniques puis chimiques et finalement par pulvérisation simultanée de silicium et de dopant.

Les difficultés importantes s'englobent dans la création de films semi-conducteurs monocristallins avec des propriétés proches de celles d'un monocristal. Le mélange comme un alliage du silicium ou du germanium avec des éléments des groupes III et V est réalisé en introduisant dans la masse fondue une impureté ou ligature appropriée avec une teneur élevée en impureté correspondante.

On utilise généralement le phosphore, l'arsenic et le bore pour doper le silicium.

La transition des jonctions p-n se fait par l'aluminium et le plomb, seulement le problème qui se pose c'est le degré de pureté requis

Ce domaine intéresse beaucoup de chercheurs surtout la technologie d'alliage de silicium avec de l'or qui est déterminée par les caractéristiques de la diffusion de l'or.

Lorsque le silicium est dopé au bore, ces derniers atomes jouent le rôle d'accepteurs. Le bore est trivalent, et donc l'une des liaisons tétravalentes dirigées des atomes de silicium vers l'atome de bore restera libre.

Dans ce travail on a donné une large description sur le silicium de l'état naturel à partir des silicates jusqu'à sa purification et dopage. On est passé par la démonstration de quelques types de procédés de traitement des différents matériaux contenant le silicium et ses combinaisons ou alliages jusqu'à l'obtention d'un concentré plus riche apte à être dopé.

La technologie du dopage du silicium n'est pas facile, vu ces différentes méthodes internationales existantes. Malheureusement c'est une chose très importante qui est la base des énergies renouvelables comme celle de l'énergie solaire.

L'introduction de ces technologies dans notre pays va donner plusieurs avantages qui vont accroître l'effet économique des industries qui se basent sur le gain de l'énergie électrique.

Le silicium qui est un matériau très largement utilisé dans presque tous les secteurs doit être non seulement dopé mais aussi utilisé adéquatement dans plusieurs procédés technologiques.

Chapitre I

Propriétés de la silice naturelle

Introduction

La croûte terrestre est une riche source de divers minéraux, dont le plus dense est la silice, qui contient du quartz SiO_2 qui est un composé de deux éléments riches en leur présence, à savoir le silicium et l'oxygène, pour former de la silice cristalline (oxyde de silicium, quartz), qui est un minéral important utilisé dans diverses industries technologiques extraites de divers matériaux naturels tels que le sable et la pierre, l'argile et les plantes, etc.

I-1 Historique des matériaux méso poreux à base de silice

Présentation du clin de la structure siliceuse depuis 1990. Nouvelles perspectives grâce aux gros pores avec la capacité de lier des molécules sur le squelette inorganique intermédiaire de la matière [1,2].

Suivant la définition de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) trois types de matériaux en vedette [3] :

- Pores solides de diamètre inférieur à 2 nm
- Solides mésoporeux avec des diamètres de pores entre 2 et 50 nm.
- Grands pores solides d'un diamètre supérieur à 50 nm

Les solides poreux structurés présentent des distributions de taille de pores étroites, qui ont ainsi une porosité maîtrisée. De plus, cette porosité est un organe spatial régulé. La Figure I.1 est la présentation des trois catégories avec un exemple de solides poreux accompagné de leur distribution en taille de pore.

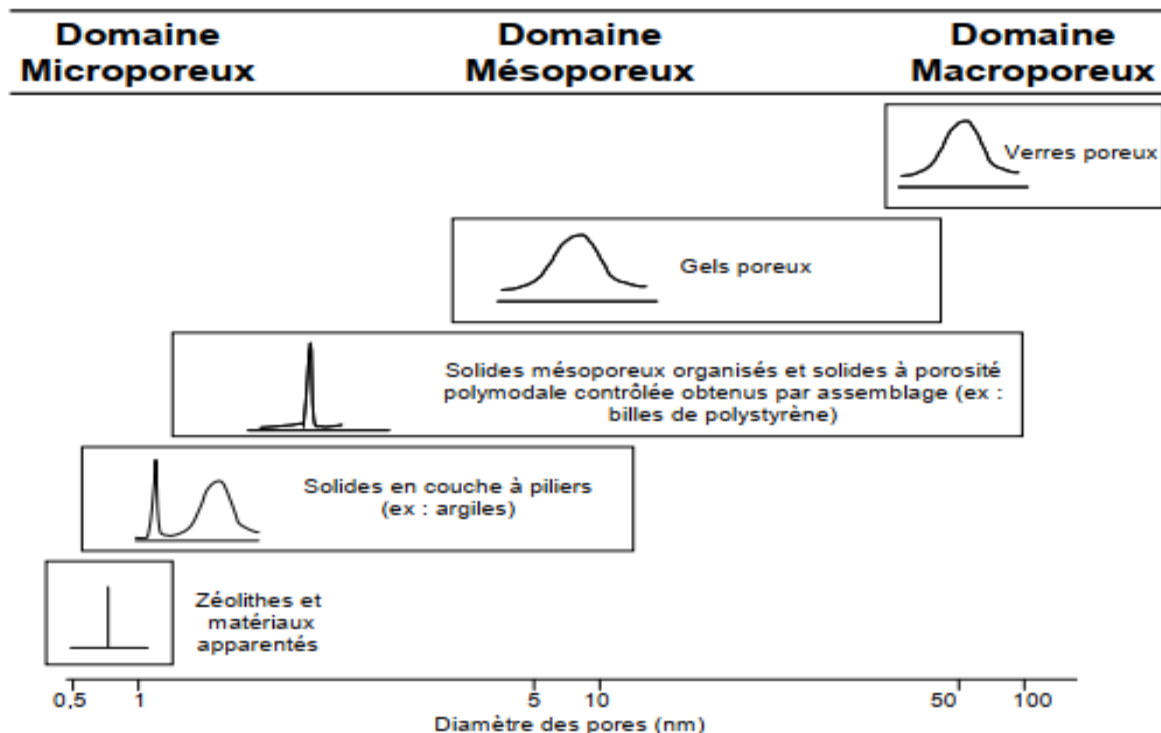


Figure I.1. Principales familles de solides poreux et leur distribution en taille de pore [4]

Au cours de ce travail nous nous sommes intéressés à la silice poreuse structurée en raison de ses propriétés poreuses importantes. Les solides obtenus présentent de larges pores (2 à 15 nm), une grande taille de pores ($1 \text{ à } 2 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) et une surface spécifique élevée de l'ordre de $1000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

Les premiers travaux sur les solides poreux structurés remontent à 1990 [1]. Yanagisawa et al. Synthèse publiée de matériaux constitutifs de type tensioactif Ammonium quaternaire de formule $C_n H_{2n+1} N^+ (CH_3)_3$ ou $C_n TMA^+$ avec $12 < n < 18$. Ces tensioactifs sont pris en sandwich entre des feuilles structurales de silicate de sodium hydraté lamellaire, kanémite de formule $NaHSi_2O_5 \cdot 3H_2O$, et permet de former un réseau cylindrique après restructuration de l'ensemble. solides obtenus appelée FSM-n (FSM : plié feuille mésoporeuse), avec $12 < n < 18$.

Une équipe de recherche de Mobil Oil a déposé un brevet en 1991 Des matériaux similaires, obtenus en introduisant un milieu de synthèse précurseur à partir de Les zéolithes sont mêmes des tensioactifs de type ammonium quaternaire [5]. ces molécules L'organisation en micelles joue le rôle d'agent structurant et apporte des volumes plus importants importants que ceux couramment utilisés pour la synthèse des zéolithes.

Depuis, une nouvelle famille de silicates et d'aluminosilicates a été découverte, appelée M41S. [2,6,7]. Il comprend notamment les étages du MCM-41 de structure hexagonale, du MCM-48 de Structure cubique et MCM-50 pour la structure laminaire (MCM : Mobil Composition of Matter).

D'autres travaux ont suivi ces découvertes par enthousiasme et possibilités Fourni par ce matériau à larges pores. (figure I.2)

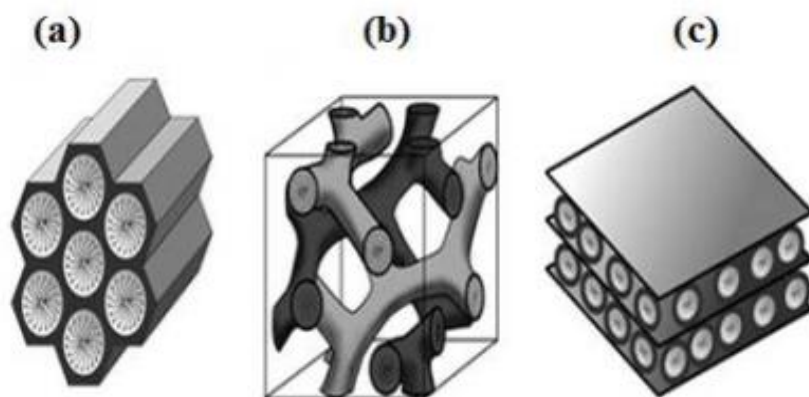


Figure I.2. Représentation schématique des phases mésostructurées de la famille M41S: a) MCM-41, b) MCM-48 et c) MCM-50 [8].

En 1994, le G.D. Stucky est une nouvelle façon de texturer les matériaux organisés des cellules folliculaires appelées la famille SBA-n (SBA : Santa Barbara Amorphous). Huo et al. présentent un rapport sur la synthèse des premiers matériaux poreux préparés sous forme de tensioactifs anioniques et cationiques SBA-n [9]. Ces combinaisons ont conduit aux matériaux de composition SBA-1, SBA-2 et SBA-3 [10,11]. En 1995, Tanev et al. [12]

propose une nouvelle voie de synthèse utilisant des tensioactifs neutres. La première famille d'amines primaires est le matériau obtenu appelé HMS (Hexagonal Mesoporous Silica). Bagshaw et al. Puis il a présenté un deuxième ensemble de matériaux, les composés MSU-n (MSU : Michigan State University) appelés oxydes polyéthoxylés [13].

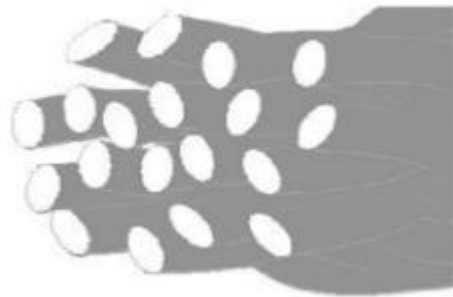


Figure I.3. Structure vermiforme de type MSU [14].

De plus, Zhao et al. Fabriqué à partir d'un tensioactif non ionique utilisant d'autres types de matériaux de la famille SBA-n tels que SBA-11 et SBA-12 comme tensioactifs polyoxyéthylés ou SMO de copolymères à blocs de type SBA-15 et SBA-16 [15, 16]

Dans ce dernier de nombreuses structures telles que CMI [17], FDU [18], KIT [19], type TUD [20] etc. ont été découverts depuis plus d'années. Les solides structuraux moyens ont été introduits par Zhao [21].



Figure I. 4. Représentation schématique de quelques phases mésostructurées de la famille SBA-n [22-23].

I-2-Synthèse des matériaux mésoporeux à base de silice

En général, la pose de matériaux poreux nécessite l'utilisation de quatre composants majeurs [26, 27,28].

1. molécule de surfactant (agent de structure) anionique, cationique, non ionique ou neutrediriger la structure finale du matériau,
2. Une source de silice (silice fumée, silicate de sodium, TEOS (tétraéthoxysilane), TMOS(tétraéthoxysilane...) Solvant (eau, éthanol.....)

3. Un catalyseur acide, basique ou neutre selon la composition recherchée.

La synthèse peut être planifiée comme suit :

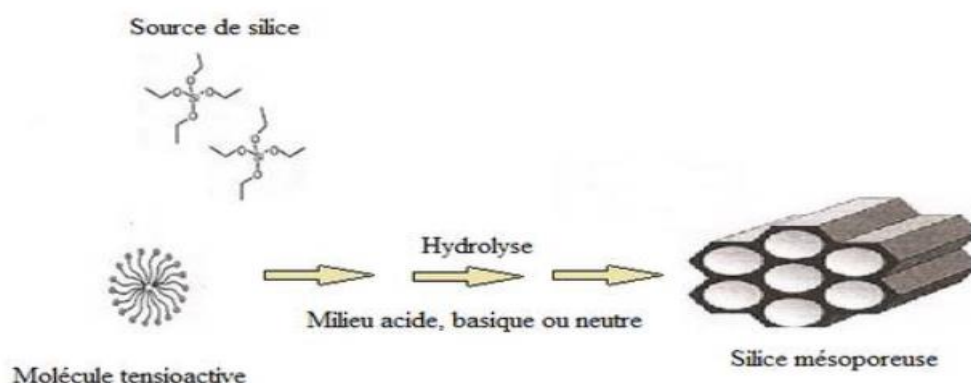


Figure I. 5. Schéma simplifié de la synthèse des matériaux mésoporeux à base de silice [28].

I-3 Étude des Caractéristiques des silices comme produit initial du silicium :

I.4 La silice

I.4.1. Définition

La silice ou oxyde de silicium, de formule SiO_2 , est composée de deux éléments : le silicium(Si) et l'oxygène (O), sont les deux métaux les plus abondants dans la croûte terrestre, constituant 12% (en masse) de la lithosphère. La silice est le principal composant des roches cristallines et le principal composant des roches clastiques. Le minéral à base de silice le plus célèbre est le quartz. [29]

I.4.2 Caractéristiques de la silice

Nom IUPAC Dioxyde de silicium

Apparence poudre de couleur blanche

Formule brute SiO_2

Masse molaire $60,0843 \pm 0,0009 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ O 53,26 %, Si 46,74 %

T° fusion $1650 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 75 \text{ }^\circ\text{C})$

T° ébullition $2230 \text{ }^\circ\text{C}$

Solubilité $0,12 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ (eau)

Masse volumique 2,2 solide

Dureté 7

PH neutre [29]

I.4.3 Propriétés de la silice

Avec d'autres éléments tels que l'aluminium, le magnésium, le fer, le calcium, le sodium, le potassium et la silice, ils forment un groupe de minéraux appelés silicates qui composent la majeure partie de la croûte terrestre.

Selon les conditions de formation (pression et température), la silice se présente sous différentes formes polymorphes : quartz, calcédoine, opale, tridymite, cristobalite, kosite et stichovite. [30]

Tableau I.1 : Types de la silice industrielle [29]

Minéral	densité	Indice de refraction
Silice fibreuse	1.96	1.40
Mélanophlogite	2.05	1.42
Verre de silice	2.20	1.46
Tridymite	2.26	1.47
Cristobalite	2.33	1.48
Kéatite	2.50	1.52
Quartz	2.65	1.55
Coésite	3.0	1.59
Stishovite	4.35	1.78

I.4.4 Propriétés physiques des silices

Les propriétés physiques de la silice dépendent principalement de son procédé de fabrication, que nous venons de décrire. Les propriétés physiques spécifiques sont notamment la surface spécifique, la taille des particules primaires et des agrégats, ainsi que la porosité.

Le Tableau I.2 rassemble les principales caractéristiques physiques des silices en fonction de leur mode de préparation

Tableau I.2. Comparaison des propriétés physiques des silices. [31]

caractéristique	Silice pyrogénées		Silice préparé par d'autre méthode		
	Silice fumé	Silice de L'arc	Silice de précipitation	xéoeogels	aérogels
Surface spécification BET (m ² g)	50-600	25-300	30-800	100-250	250-400
Dimension des particules primaire (nm)	5-50	5-500	5-100	3-20	3-20
Dimension d'agrégat agglomérat	*	2-15	1-40	1-20	1-15
Densité (g/cm ²)	2.2	2.2	1.9-2.1	2.0	2.0
Volume (ml/100g)	1000-2000	500-1000	200-2000	100-200	800-2000
Diamètre moyenne des pores (nm)	Non poreux jusqu'au 300m ² /g	Non poreux	>3	2-20	>25
Diamètre de d'stribution des pores	*	*	Grand large pore	Plus étroite	Plus étroite

Ils s'agrègent sous l'action des forces colloïdales, pour former une seconde structure de particules secondaires, les agrégats.

Dans le cas de la silice pyrogénée, ce phénomène est irréversible, et même sous l'action des forces de cisaillement, il est impossible de casser cette structure secondaire. Il est à noter que la silice dite « Stuber » (c'est-à-dire préparée par hydrolyse d'un alcoxyde) est en fait composée de particules colloïdales individuelles

Du fait de la structure triangulaire des conglomérats, leur taille peut atteindre plusieurs dizaines de microns. Dans certaines conditions, ces agglomérats peuvent se décomposer sous l'effet des forces de cisaillement et revenir à l'état granulaire. Ces trois niveaux de volume sont indiqués sur la figure. I.6 pour la silice pyrogénée.[32]

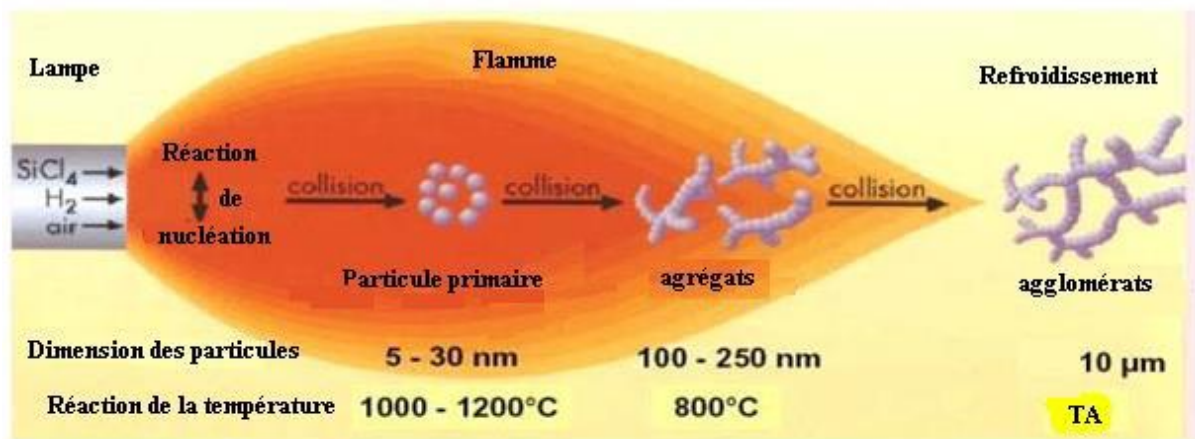


Figure I.6. Structure multi-échelle des silices de pyrohydrolyse. [33]

La taille des particules primaires, ainsi que la densité, le degré d'agrégation et l'agglomération déterminent la porosité et la spécificité de surface de la silice.

L'agglomération de la silice acide en chaînes aboutit à une structure non poreuse : elle n'a pas de surface interne contrairement au gel de silice.

Par conséquent, les gels ont généralement une surface spécifique plus élevée que la silice pyrogénée.

Cependant, les propriétés renforçantes de l'élastomère étant dues au rôle de la surface externe, de la silice colloïdale a été utilisée. De plus, plus les particules primaires sont petites, plus la formation d'agrégats est importante.

La taille des particules primaires influence également la surface spécifique : plus les particules primaires sont grosses, plus la surface spécifique est petite.

De cette manière, les atomes de silicium forment des liaisons covalentes avec les quatre atomes d'oxygène immédiatement adjacents. La distance interatomique Si-O est de 0,152 nm, la distance Si-Si est de 0,312 nm et la valeur angulaire Si-O-Si couvre une large plage de 120 à 180°.[34]

I-5- Sable de silice

La plupart des moules et noyaux de sable sont à base de sable de silice car c'est matériau de moulage le plus facilement disponible et à moindre coût. D'autres sables sont utilisés pour les applications spéciales où une réflectivité plus élevée, une chaleur plus élevée une conductivité ou une dilatation thermique inférieure est nécessaire.

I-5-1-Propriétés du sable de silice pour une utilisation en fonderie pureté chimique

Tableau I.3.Pureté chimique du sable de silice

SiO ₂	95–96% minimum	Plus la silice est élevée, plus le sable est réfractaire
Perte au feu	0,5% max	Représente les impuretés organiques
Fe ₂ O ₃	0,3% max	L'oxyde de fer réduit la réfractarité
CaO	0,2% max	Augmente la valeur de la demande d'acide
K ₂ O, Na ₂ O	0,5% max	Réduit la réfractarité
Valeur de la demande d'acide à pH4	6 ml max.	Demande d'acide élevée défavorable affecte les liants catalysés par l'acide

I-5-2-Distribution de taille

La distribution granulométrique du sable affecte la qualité des pièces moulées. Grossier les sables granuleux permettent la pénétration du métal dans les moules et les noyaux, ce qui finit de surface des pièces moulées. Les sables fins donnent une meilleure finition de surface mais nécessitent une teneur en liant plus élevée et la faible perméabilité peut provoquer des gaz défauts dans les pièces moulées. La plupart des sables de fonderie appartiennent à la gamme de tailles suivante:

Le sable de zircon a une densité élevée [35][36] et une conductivité thermique élevée qui, ensemble, font refroidir les pièces moulées plus rapidement que le sable de silice. Le froid l'effet du sable de zircon peut être utilisé pour produire des gradients thermiques favorables qui favorisent la solidification directionnelle donnant des moulages plus sains. Le thermique le coefficient de dilatation du zircon est très faible (Fig.12.2) de sorte que la dilatation les défauts peuvent être éliminés. Le zircon a une réfractarité plus élevée que la silice, de plus, il ne réagit pas avec l'oxyde de fer, de sorte que des évité. Le sable de zircon a généralement une granulométrie fine, avec un numéro AFS compris entre 140 et 65 (granulométrie moyenne 115–230 microns), les plus fréquemment utilisées la note est d'environ 100 AFS.

Le zircon est probablement le plus utilisé des sables non siliceux. C'est utilisé avec des liants chimiques pour les pièces moulées en acier de haute qualité et pour le fer critique pièces moulées telles que les distributeurs hydrauliques qui contiennent des noyaux complexes, presque totalement enfermé par du métal, rendant le retrait du noyau après la coulée difficile. Zircon a une faible valeur de demande d'acide et peut être utilisé avec tous les systèmes de liants chimiques.

Le processus de coulée Cosworth utilise la faible dilatation thermique du zircon poncer les noyaux et les moules pour couler des pièces moulées aux dimensions précises. Le haut le coût du sable de zircon rend la récupération nécessaire et la récupération thermique des moules et noyaux liés par résine est fréquemment pratiquée.

I-6-Céramiques réfractaires

I-6-1-Minéralogie des Matériaux réfractaires

Argiles de type kaolinite, à faible teneur en impuretés (alcali, oxyde de fer, oxyde de titane...) sont les plus utilisés dans la fabrication de produits réfractaires. À lors de leur frittage, ils se déshydroxyent jusqu'à 700°C, puis se décomposent entre 1000 et 1100°C.

Il précise le diagramme silice-alumine représenté à la (Fig. 11, p. 28) sous métallurgie des produits obtenus après cuisson à haute température et donne indications sur leur liberté. Ce graphique montre que la résistivité du réfractaire augmente avec la quantité d'alumine et qu'à haute température, la mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ avec 72% Al_2O_3) est le seul composé identifiable entre la silice et l'alumine prouvant sa présence.

Deux zones de composition métallurgique différente et réfractaires.

- Système eutectique silice-mullite (5,5 % Al_2O_3 - 94,5 % SiO_2) de, mp 1595°C. Jusqu'à 1595°C les phases solides en équilibre sont la silice et la mullite [37]
- système mullite - eutectique alumine (69% Al_2O_3 - 31% SiO_2) avec fondant à 1840 degrés Celsius. Jusqu'à cette température les phases solides sont en équilibre : mullite et alumine [37]

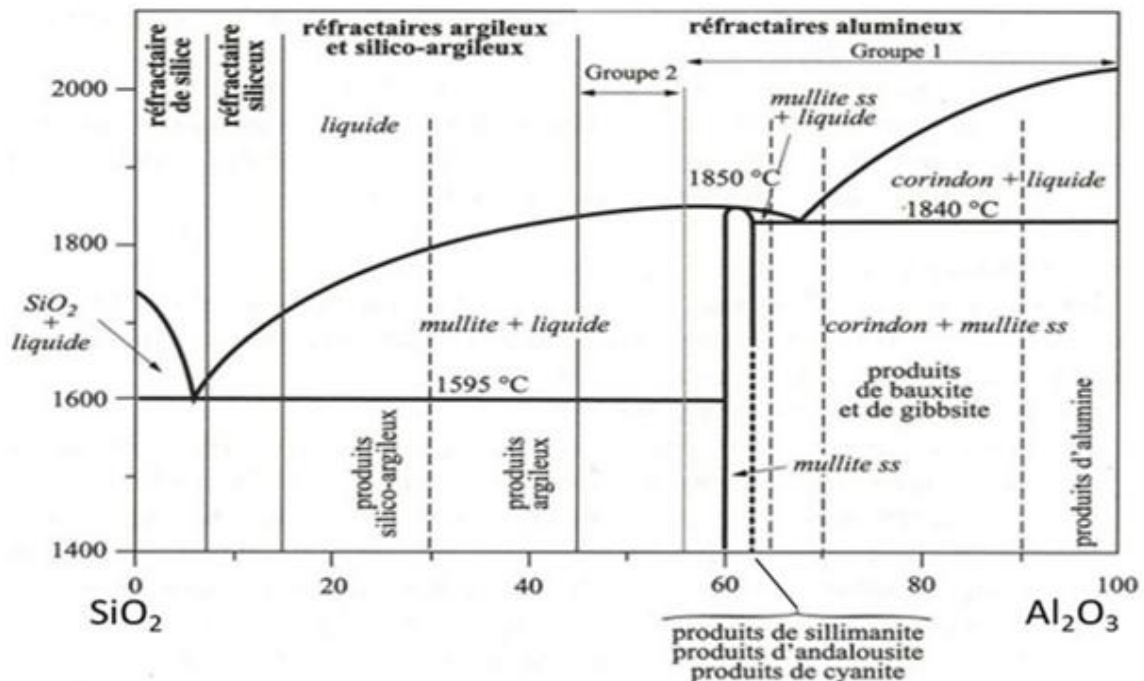


Figure I.7 .Classification des produits du système silice-alumine AFNOR NF B40-002[39]

Il existe trois silicates d'alumine cristallins naturels anhydres utilisés Matières premières dans l'industrie réfractaire (Fig. 11). Ce sont : la sillimanite, l'andalousie et la kyanite, toutes trois de formule Al_2SiO_5 (Al_2O_3 : 63% - SiO_2 : 37%).

La sillimanite est un bon matériau qui est de plus en plus rarement exploité. la kyanite est connue depuis longtemps dans les gisements industriels ainsi que souvent en Andalousie Plus d'impuretés que ses prédécesseurs [37].

I-7-L'Argile

L'argile est une formation rocheuse qui définit la gamme granulométrique Il contient des particules minérales dont le diamètre des grains est inférieur à deux μm ($2 \mu m$).

En tant que matière première, l'argile est un mélange de minéraux argileux et inclusions cristallines sous forme de débris rocheux de formation infinies divers.

L'intérêt porté ces dernières années à l'étude des argiles par de nombreux laboratoires dans le monde se justifie par l'abondance dans leur nature et leur importance, les surfaces qu'elles développent, la présence de charges électriques sur cette surface et notamment l'interchangeabilité des cations entre feuillets . Appelés aussi cations compensateurs, ces cations sont les principaux responsables de l'hydratation, du gonflement, de la plasticité et de la capacité de réfraction, et confèrent à ces argiles des propriétés d'imperméabilité.

L'argile bentonite est une source potentielle de silice, qui contient de la smectite comme minéral argileux principal. Comme le composant alumine est présent dans les argiles avec la silice, une gamme de méthodes hydrométallurgiques acides et alcalines sont utilisées pour les isoler les unes des autres [41], [42], [43], [44]. Habituellement, les acides sont utilisés pour le traitement de l'argile plutôt que les alcalis [45] et le HCl est préféré aux autres acides en raison de la séparation facile du filtrat du résidu [46]. Pour une élimination efficace de l'alumine des argiles, la calcination est une étape critique ; la solubilité de l'alumine augmente après traitement thermique dans la plage de température de 500 à 900 °C [47], [48].

Auparavant, l'argile de kaolin a été étudiée pour la production de sulfate d'aluminium et il a été constaté que le chauffage de l'argile à 700 ° C pendant 1 h suivi d'une lixiviation acide avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) étaient les conditions optimales pour extraire l'alumine [43]. Dans un autre travail, l'élimination du composant alumine du kaolin pour produire de l'alumine pure a été étudiée et le processus recommandé impliquait la calcination de l'argile à 600 ° C pendant 1 h suivie d'une lixiviation avec HCl. Cependant, la synthèse de particules de silice à partir d'argile de bentonite n'a pas été étudiée auparavant et nécessite des recherches dans ce domaine.

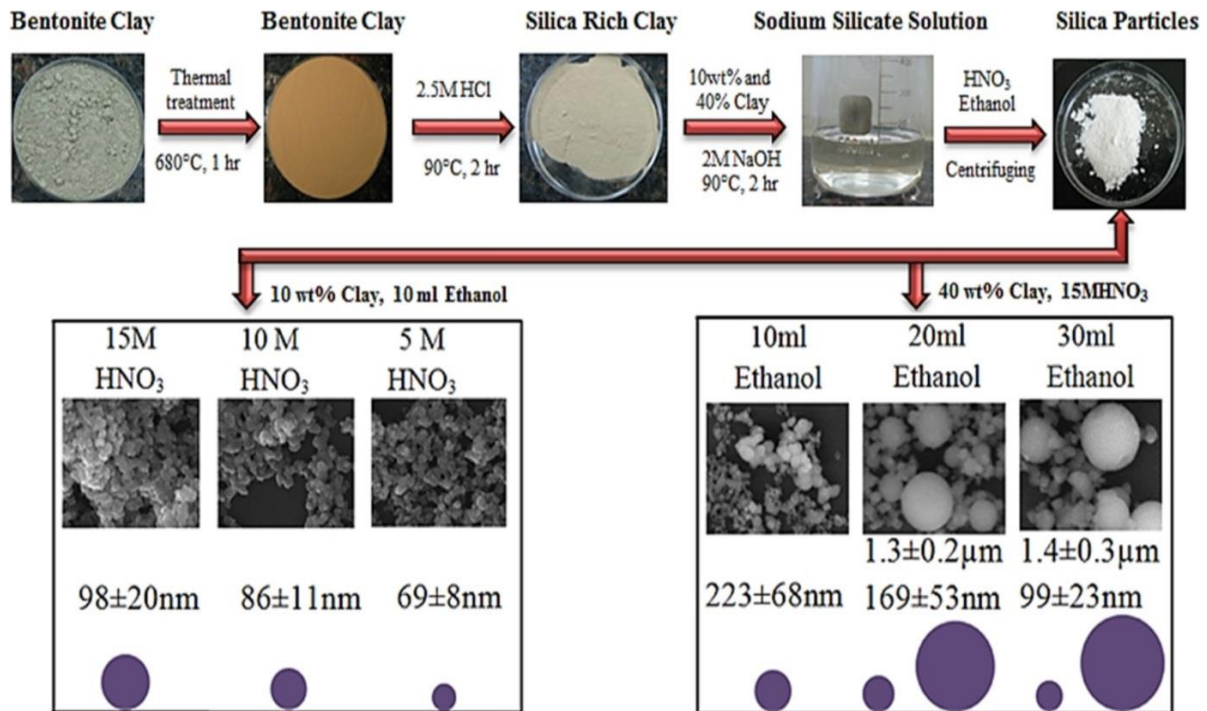


Figure I.8. Synthesis of silica particles from bentonite clay [49].

I-8-Les fibres de verre

La fibre de verre est basée sur un mélange de minéraux naturels et de composés artificiels. Les trois ingrédients principaux sont le sable siliceux, le carbonate de soude et le calcaire. D'autres ingrédients peuvent être du borax, de la magnésite et de l'alumine calcinée. Le sable de silice crée un verre qui aide à la résistance. La cendre de soude et le calcaire aident à abaisser la température de fusion du sable avant qu'il ne soit converti en fibres.

Dans un four d'échauffage, les trois ingrédients de base fondent ensemble jusqu'à ce que du verre fondu se forme. De là, le verre est formé en fibres et refroidi. Ces fibres peuvent être longues et filiformes, ce qui est préféré pour les textiles, ou courtes et coupées.

I-8-1-Applications des textiles en fibre de verre et en silice

Avec une résistance élevée à la chaleur et une stabilité structurelle, les textiles en fibre de verre et en silice ont des applications dans diverses industries et scénarios. Ils peuvent être utilisés pour :

- Scellage
- Isolant
- Barrières anti-feu
- Rideaux de fournaise

Ces textiles ont leur place dans des industries comme l'aérospatiale, la production chimique et la métallurgie[50].



Figure I.9. Représentation des types de fibres de verre

I-8-2-Matières premières de silicum

Plusieurs types de compositions de verre sont utilisées comme matières premières, selon l'utilisation spécifique à laquelle les fibres sont destinées. Pour les fibres de renfort, les principaux flacons utilisés sont les suivants[51] :

Tableau II.4. Exemples de compositions verrières(%)

	Verre de type E	Verre de type C	Verre de type AR
SiO ₂	53-55	60-65	61
Al ₂ O ₃	14-15	3,5- 6	/
CaO	17-23	14	5
MgO	1	3	/
Na ₂ CO ₃	0,8	10	17
B ₂ O ₃	0-8	5	/
Fe ₂ O ₃	0,3	0,5	0,3
TiO ₂	0,5	/	/
ZrO ₂	/	/	10

II-9-Le quartz

C'est la forme la plus courante et la plus connue, elle résiste particulièrement bien aux agents atmosphériques grâce à sa dureté et son insolubilité, et constitue donc la majeure partie des roches sédimentaires clastiques telles que le sable et le grès, et parfois le seul composant lorsque les grains de quartz sont cimentés par de la silice secondaire :

Quartzite sédimentaire. Le quartz a plusieurs types : cristal de roche ou quartz de verre, améthyste, citrine, quartz fumé avec des éléments radioactifs.[35]



Figure I-10 : Le Quartz [52]

La silice cristalline est solide, chimiquement inerte et possède un point de fusion élevé - des propriétés recherchées dans l'industrie. [30]

Chapitre II :
Dopage des composés du
silicium naturel

Introduction

Le silicium est extrait du quartz ou du sable, qui contiennent tous deux d'énormes réserves planétaires de silice ou d'oxyde de silicium SiO_2 . Les industries chimiques et de l'aluminium utilisent principalement le silicium métal, qui représente 20 % de la production mondiale de silicium, pour produire du silicium et des alliages métalliques. Vous contribuerez à la production de silicium de qualité solaire pour l'industrie solaire. Les principaux fabricants sont Dow Corning Corporation, Elkem AS et Globe Specialty Metals Inc. et Grupo Ferroatlantica SL et AMG Advanced Metallurgical Group NV [53]

II-1 Le Silicium

Le deuxième élément le plus répandu dans la croûte terrestre est le silicium, qui en constitue 27,80 %.

C'est un semi-conducteur, comme le carbone. De plus, il est utilisé en électronique pour cette propriété.

Tout au long de notre vie, la quantité moyenne de silicium dans notre corps est de 7 grammes. Cela fait du 12ème élément celui qui est le plus présent en nous.

Il est nécessaire à la vie sur Terre. Au même niveau que les quatre éléments constitutifs de la vie : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote.

Sans lui, les micro-organismes comme les bactéries et les germes sont incapables de survivre ou de se reproduire. Il est également essentiel au développement des plantes et à leur défense contre les maladies. [54]

Le silicium n'existe jamais dans la nature en tant que corps pur ; au lieu de cela, il est toujours intimement lié à un autre atome ou molécule. Il s'agit donc toujours d'un composant d'une molécule, qui peut prendre une forme **minérale ou organique**. Le premier est le seul que l'on puisse trouver naturellement dans la nature. Le second ne peut être obtenu qu'en laboratoire.

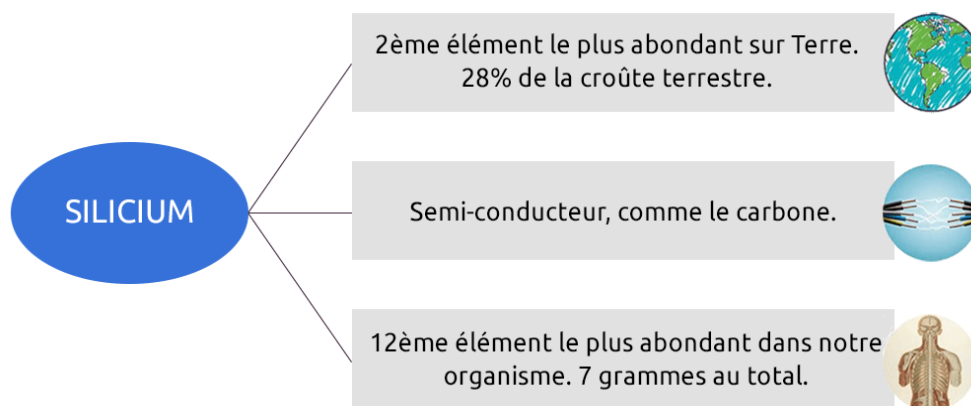


Figure II.1:L'utilisation du silicium

II-1-1 Le silicium minéral

Les molécules minérales qui incluent cette substance comprennent la silice et les silicates que l'on peut trouver dans des matériaux comme le sable, le quartz et même les pierres précieuses.

Ces formes sont peu ou jamais solubles dans l'eau. Cela signifie qu'un atome de silice ne peut pas se séparer d'une molécule minérale dans un environnement contenant de l'eau. L'atome ne peut pas être utilisé par un organisme s'il ne se sépare pas.



Figure II.2: Le silicium minéral.

Le silicone métallique n'a aucun avantage pour la santé. Presque tous les êtres vivants sont constitués d'eau. Cela signifie que l'extraction de la silice n'est pas nécessaire pour eux. Seuls les végétaux et les micro-organismes sont capables de transformer les molécules d'eau minérale insolubles (silicium et silicates) en une molécule d'eau minérale soluble appelée acide. Acide orthosilicique (ou OSA). Il peut se dissoudre dans l'eau dans laquelle vivent ces organismes et rendre l'oligo-élément biodisponible. En d'autres termes, la métamorphose (changement de forme, de nature ou de structure tel qu'un objet, un objet ne peut plus être reconnu. L'homme transformé en animal.) leur permet d'utiliser le silicium pour survivre.

Parce qu'une personne ne peut subir cette transformation, elle doit passer par ces organismes pour obtenir l'élément silicium.

II-1-2 Le silicium organique

Les molécules de silicium organique ne se trouvent pas dans la nature. Il est traité en laboratoire pour préserver sa solubilité dans l'eau et donner aux grains des propriétés dissolvantes. Il est donc liposoluble. Ensuite, il peut se déplacer à travers des tissus ressemblant à de la peau.

Ainsi, la molécule organique est très efficacement absorbée par les organismes. Le monométhylsilanetriol, souvent appelé MMST, est la seule molécule de silice véritablement organisée biochimiquement.



Figure II.3: Le silicium organique est une molécule obtenue en laboratoire.

II-1-3 Les quatres types de silicium:

Les quatre types de silicone :

- L'élément silicium, qui n'existe pas seul dans la nature. C'est toujours un composant d'une molécule. C'est l'oligo-élément bénéfique pour l'organisme.
- Le silicium minéral présent dans les roches et le sable est insoluble dans l'eau. Il n'est pas utile pour le corps humain car il n'apporte pas à l'organisme d'oligo-éléments (non assimilables).
- Le silicium minéral biodégradable et assimilable (AOS) est produit grâce au processus de « digestion » par les plantes et les micro-organismes de la silice insoluble dans l'eau. Elle est assimilable et permet de profiter des bienfaits de la silice.
- Nous obtenons en laboratoire du silicium synthétique (MMST), qui n'existe pas dans la nature. Il se dissout dans l'eau et le grain. Il est plus assimilable et plus efficace. Sol cela est présent. [55]

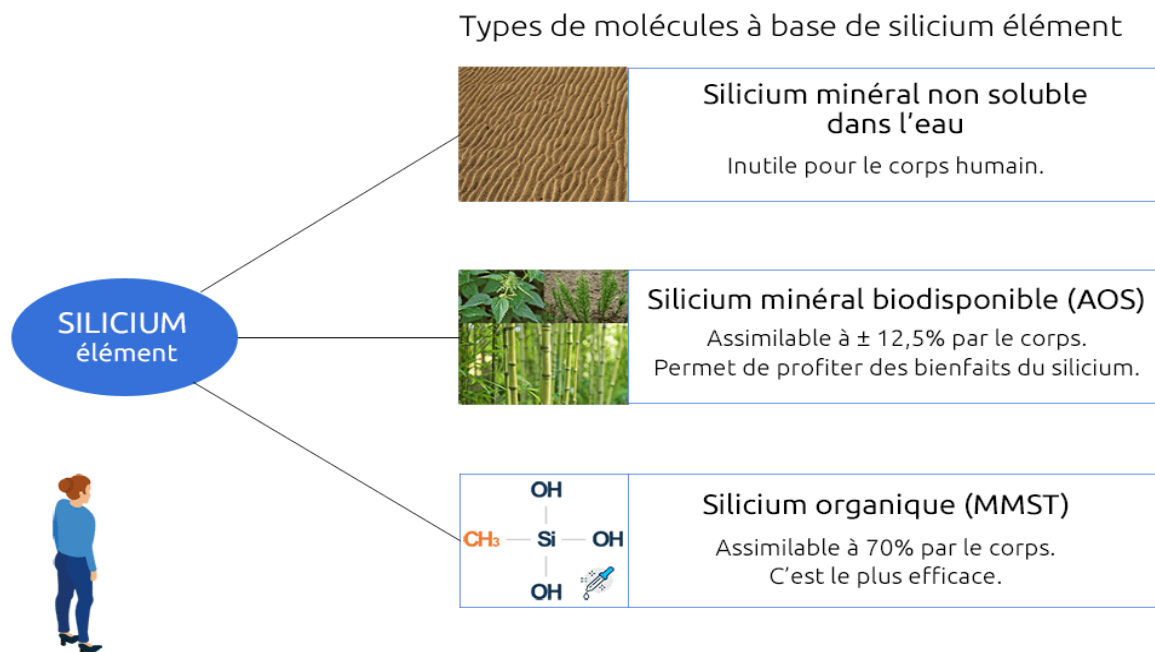


Figure II.4: Types de molécules a base de Silicium

II-2-Generalite sur l'operation de Ddopage

Le dopage est le processus d'introduction d'impuretés donneuses ou acceptrices dans le matériau semi-conducteur d'origine. Ce matériau est soit la tranche de silicium d'origine, soit la couche supraaxiale (c'est une technique de croissance dirigée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux ayant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans des réseaux cristallins).

Fondamentalement, deux méthodes principales de dopage sont utilisées :

- Alliage par diffusion.
- Implantation ionique.

II-2-1 Dopage par diffusion

Elle est réalisée par diffusion d'impuretés dans un substrat semi-conducteur de silicium à une température de $T = (1150-1300) \text{ C}$ (rappelons que la température de fusion de la silice est de 14200 C).

On peut distinguer la dispersion générale de la dispersion locale en fonction de la méthode de conduite.

La diffusion générale se produit sur toute la surface du substrat semi-conducteur. Suite à la diffusion, une fine couche de diffusion se produit, par exemple, dans le segment semi-conducteur de conductivité de type n, Une couche similaire diffère d'une couche épitaxiale en ayant une répartition déséquilibrée de l'impureté $N(x)$ sur toute sa profondeur .[56]

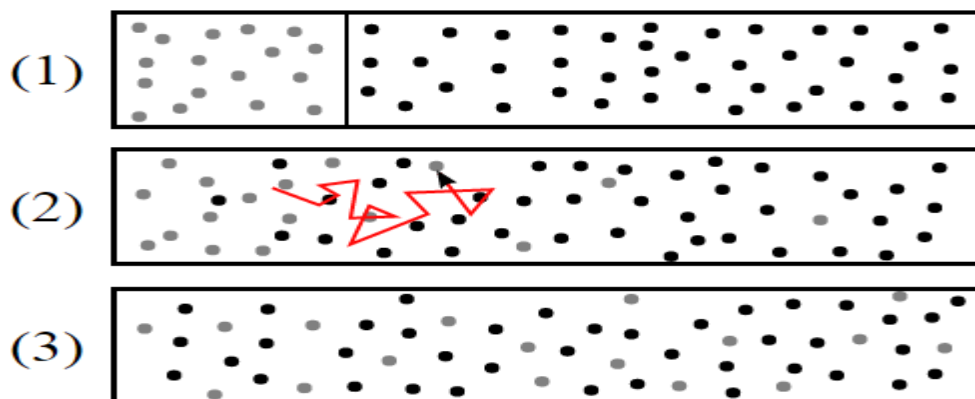


Figure II.5:Exemple de mélange de deux produits par diffusion.[57]

II-2-2 Dopage par implantation ionique

Dans la méthode de dopage par implantation ionique, les impuretés chargées sont accélérées par un champ électrique pour leur donner l'énergie nécessaire pour pénétrer dans le matériau cible. Cette méthode permet l'utilisation d'une grande variété d'éléments dopants. Une répétabilité élevée et un dopage local sont rendus possibles par le faisceau mono-énergie et la chambre à vide.

Lorsqu'un ion accélère, son énergie chimique augmente et il s'enfonce plus profondément dans le réseau cristallin du substrat dopé. De cette façon, le profil de dopage est établi en contrôlant la dose et l'énergie.

L'un des effets négatifs du dopage des implants ioniques est le trouble cristallin sévère qui résulte des collisions d'ions avec les atomes du matériau. Il en résulte des défauts qui augmentent la probabilité de collision tout en diminuant [56].

II-3 Dopage des semi-conducteurs

Dopage des semi-conducteurs, introduction dosée d'impuretés ou de défauts structuraux dans un semi-conducteur afin de modifier ses propriétés physiques (électriques, magnétiques, optiques, mécaniques, etc.). Le dopage par impuretés des semi-conducteurs est le plus répandu. Les propriétés électriques des semi-conducteurs dopés dépendent de la nature et de la concentration des impuretés introduites. Pour obtenir des semi-conducteurs à conductivité électronique (type n) avec une concentration très variable d'électrons de conduction, des impuretés donneuses sont généralement utilisées, qui forment des niveaux d'énergie dans la bande interdite près du bas de la bande de conduction. Pour obtenir des semi-conducteurs à conductivité de trou (type p), des impuretés accepteuses sont introduites, qui forment des niveaux dans la bande interdite près du sommet de la bande de valence. Les atomes de telles impuretés à température ambiante (300 K) sont presque complètement ionisés (énergie d'ionisation $\leq 0,05$ eV), de sorte que leur concentration détermine la concentration des porteurs de charge majoritaires.

Pour Ge et Si, les éléments du sous-groupe Va de la forme abrégée du système périodique des éléments (P, As, Sb) servent de donneurs, et les éléments du sous-groupe IIIa (B, Al, Ga) servent d'accepteurs. Pour les semi-conducteurs de type A III B V, les donneurs sont des éléments du sous-groupe VIa (S, Se, Te), ainsi que Sn, les accepteurs sont des éléments des sous-groupes IIa (Be, Mg) et IIb (Zn, Cd). Les impuretés Si et Ge dans les semi-conducteurs de type A III B V, selon les conditions d'obtention des cristaux et des couches épitaxiales, peuvent présenter à la fois des propriétés de donneur et d'accepteur. Le type et l'amplitude de la conductivité des semi-conducteurs A II B VI et A IV B VI sont généralement contrôlés par un écart par rapport à la composition stœchiométrique, qui fournit une concentration donnée de défauts ponctuels intrinsèques (lacunes, atomes interstitiels). En règle générale, les impuretés répertoriées forment des solutions solides de substitution dans les semi-conducteurs et ont une solubilité élevée (10^{18} – 10^{20} atomes/cm³) dans une large plage de températures. Ils ont de petites sections efficaces de capture des porteurs de charge, sont des centres de recombinaison inefficaces et ont donc peu d'effet sur la durée de vie des porteurs.

Les impuretés de métaux lourds, nobles et de terres rares (Fe, Ni, Cr, Nb, W, Cu, Ag, Au, Nd, Sm, Gd, Er, etc.) forment des niveaux "profonds" dans la bande interdite, ont de grands porteurs capturent les sections efficaces et sont des centres efficaces de recombinaison, ce qui conduit à signifier. Réduire la durée de vie des transporteurs. Ces impuretés ont une faible solubilité. Ils sont utilisés pour produire des semi-conducteurs à courte durée de vie ou à haute

résistivité. Par exemple, les impuretés Fe, Ni, Cr sont utilisées pour obtenir des cristaux semi-insolants de composés III-V à large gap (GaAs, GaP, InP).

L. p. est généralement réalisé directement dans les processus de croissance de monocristaux et de structures épitaxiales. La quantité requise d'impuretés est introduite dans la masse fondue, la solution ou la phase gazeuse. Il est nécessaire de répartir uniformément l'impureté dans la masse du cristal ou sur l'épaisseur de la couche épitaxie. Avec la cristallisation directionnelle à partir de la masse fondue, une distribution uniforme des impuretés sur la longueur du lingot est obtenue en maintenant sa concentration constante dans la masse fondue. L'homogénéité de la distribution des impuretés dans les monocristaux peut être augmentée en appliquant un champ magnétique à la masse fondue. Le champ magnétique appliqué à la masse fondue conductrice entraîne l'apparition de forces pondéromoteur, qui réduit l'intensité de la convection et les fluctuations de température et de concentration d'impuretés qui lui sont associées. Une répartition uniforme lors de l'épitaxie à partir de la phase liquide est obtenue par cristallisation à température constante, et dans le cas de l'épitaxie en phase gazeuse - à une concentration constante d'impuretés dans la phase gazeuse au-dessus du substrat. [58]

II-4 Dopage de type N et de type P

Les schémas suivants montrent des exemples de dopage du silicium avec du phosphore (dopage N) ou du bore (dopage P). Dans le cas du phosphore (à gauche), un électron supplémentaire est introduit. Dans le cas du bore (à droite), il manque un électron ; c'est donc un trou électronique qui est introduit. [55]

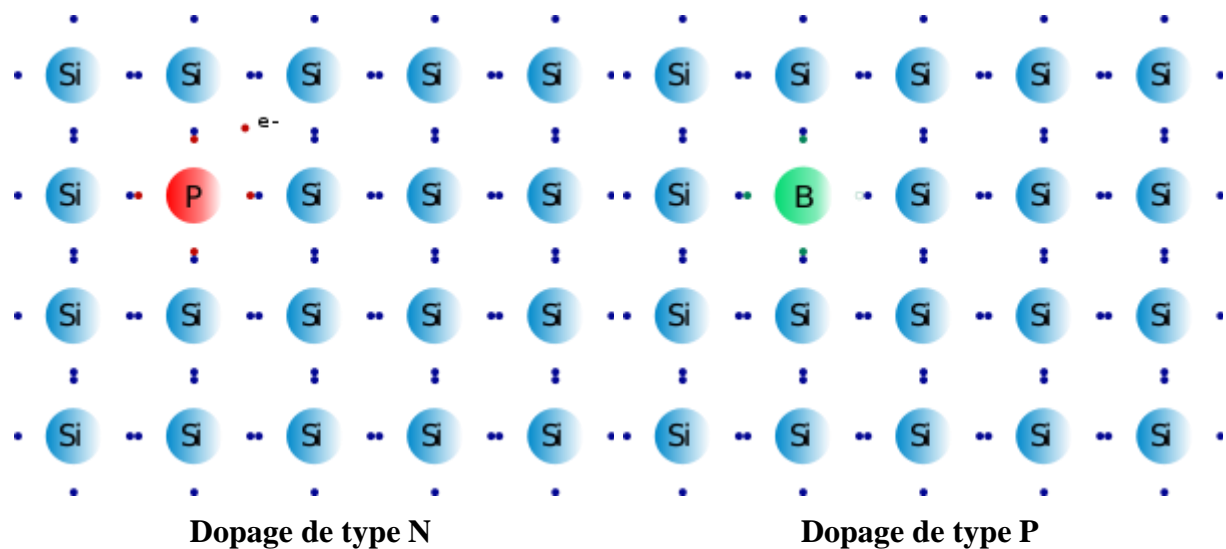


Figure II.6: Dopage de type N et de type P [55]

II-5 Technologie d'obtention du silicium dope



Figure II.7 : Technologie de dopage au silicium dans les réacteurs RBMK-1000[59]

II-5-1 Silicon Valley atomique

Outre la production d'isotopes importants pour l'économie nationale, le LNPP est engagé dans le dopage par transmutation du silicium. En raison de ses propriétés semi-conductrices, le silicium et ses composés sont largement utilisés dans la microélectronique et les convertisseurs de courant de forte puissance, dans l'énergie solaire, l'instrumentation et les communications. Les monocristaux de silicium ayant subi un dopage par transmutation neutronique acquièrent des propriétés uniques. Ce sont précisément ces monocristaux alliés les plus précieux d'un diamètre allant jusqu'à 85 mm qui sont produits à la centrale nucléaire de Leningrad. Aujourd'hui, le LNPP fournit jusqu'à 90% des besoins du marché domestique en silicium dopé. Tout d'abord, pour les industries de la défense, de l'espace et des transports, ainsi que pour les domaines où l'ultra-stabilité et la super fiabilité des dispositifs à semi-conducteurs sont nécessaires. Si nous nous tournons vers des images compréhensibles pour une personne moderne, alors chaque mois, LNPP allie du silicium en quantités suffisantes pour fabriquer 300 000 téléphones mobiles.

State Corporation Rosatom utilise du silicium dopé aux rayonnements (RLS) pour la production industrielle, cette technologie est utilisée dans les centrales nucléaires russes existantes avec des réacteurs RBMK.

La technologie RLC repose sur les transformations nucléaires d'atomes sous l'influence de neutrons thermiques, à savoir la transformation par transmutation neutronique de ^{30}Si en phosphore à la suite d'une irradiation avec des neutrons thermiques dans un réacteur nucléaire. Le silicium dopé aux radiations est utilisé pour fabriquer des semi-conducteurs électroniques de puissance et des dispositifs spéciaux d'une fiabilité et d'une qualité accrue.

Le champ d'application du silicium dopé aux radiations est extrêmement large : dispositifs semi-conducteurs de puissance, inserts DC pour convertir AC en DC, convertisseurs photo électroniques de puissance pour centrales solaires, diodes et thyristors puissants pour le transport ferroviaire et routier électrifié, semi-conducteur haute tension et courant fort. dispositifs pour la physique nucléaire et l'électronique, dans l'instrumentation de mesure électronique; dans les convertisseurs d'énergie photoélectroniques, dans les systèmes d'ingénierie optique, etc.

Le LNPP effectue un dopage par rayonnement de cristaux de silicium d'un diamètre allant jusqu'à 305 mm, le volume de silicium dopé par rayonnement est de 300 tonnes par an. Le point fondamental du dopage par transmutation neutronique est que les dopants ne sont pas introduits dans le matériau source depuis l'extérieur, mais se forment lors de l'irradiation directement à partir des atomes du matériau dopé. La méthode est basée sur des réactions nucléaires qui ont lieu dans un cristal de silicium. Sous l'influence d'un flux de neutrons thermiques, il se produit la formation d'un isotope radioactif ^{31}Si et sa désintégration ultérieure avec formation de phosphore stable ^{31}P . Le ^{31}P résultant crée une conduction de type n. Dans RBMK-1000, le spectre neutronique est beaucoup plus doux que dans les réacteurs de recherche et de puissance à eau légère. En raison de la grande taille du réacteur, le flux de neutrons thermiques dans le cœur a l'uniformité requise pour doper une chaîne verticale de lingots de silicium. De plus, la densité de flux neutronique lors du fonctionnement du RBMK-1000 à une puissance donnée reste pratiquement constante pendant toute la durée d'irradiation. Tous ces facteurs conduisent à une diminution du nombre de défauts de rayonnement dans le matériau irradié, ce qui assure in fine la haute qualité du dopage au silicium. Au LNPP, le silicium est dopé à l'aide des canaux d'irradiation d'un réacteur refroidi à l'eau. Les complexes d'irradiation des réacteurs LNPP sont équipés de systèmes automatisés de contrôle du flux neutronique, qui permettent d'assurer la qualité et la fabricabilité requises du procédé d'alliage des lingots de silicium. Il convient de noter que la modification par rayonnement des propriétés d'autres matériaux cristallins, y compris les pierres semi-précieuses et précieuses dans des volumes allant jusqu'à plusieurs tonnes, peut être fournie dans les mêmes canaux [60].

II-6 Etapes principales et la technologie d'obtention de monocristaux de silicium semi-conducteur :

- obtenir du silicium technique (métallurgique), transformation du silicium technique en -----
- composé gazeux, sa purification,
- production de silicium polycristallin par réduction d'hydrogène,
- croissance de monocristaux.
- Obtenir du silicium technique

La chaîne de production du silicium commence par le dioxyde de silicium (silice) SiO_2 . La silice est largement distribuée dans la nature sous forme de sable, de quartz et d'argile.

La réduction du silicium à partir de SiO_2 est réalisée par un procédé carbothermique dû à l'interaction du dioxyde de silicium avec le carbone à une température d'environ 1800°C .
 $\text{SiO}_2 (\text{tv}) + 2\text{C} (\text{s}) = \text{Si} (\text{s}) + 2\text{CO} (\text{gaz})$

La charge est introduite dans la charge sous forme de quartzite - sable quartzueux contenant au moins 98% de SiO_2 .

Le carbone est obtenu à partir de charbon de bois, de coke, de suie, de copeaux de bois.

Le processus est réalisé dans des fours à arc électrique d'une puissance énorme - de 8 à 25 mégavolts-ampères (MVA). L'énergie est fournie à l'aide d'une, deux ou trois électrodes en graphite, tandis que l'intensité du courant est de 40 à 80 kA.

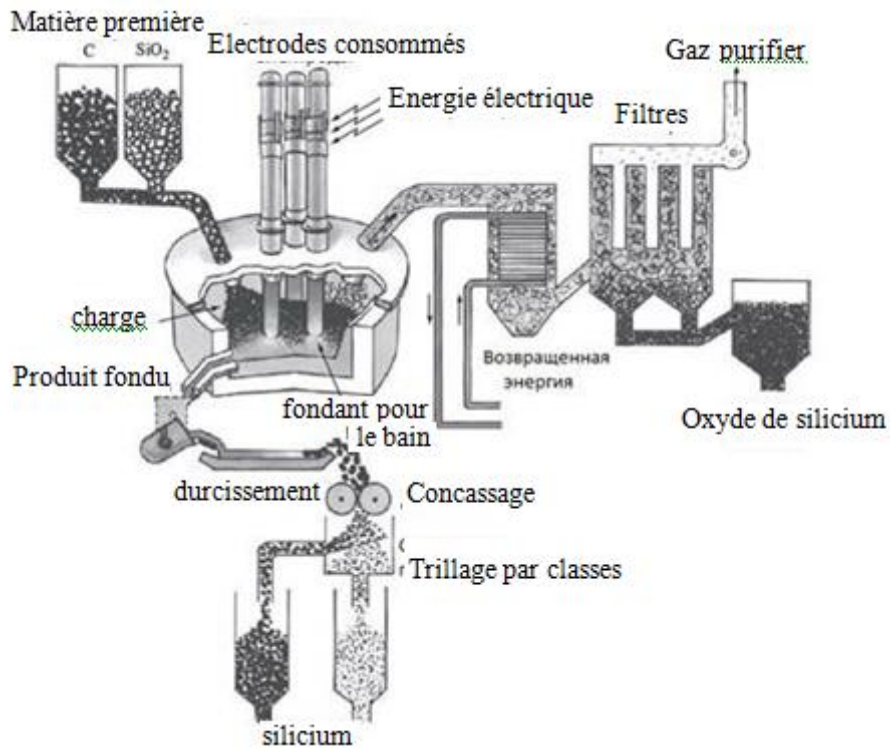


Figure II.8: Schéma d'obtention de polysilicium métallurgique

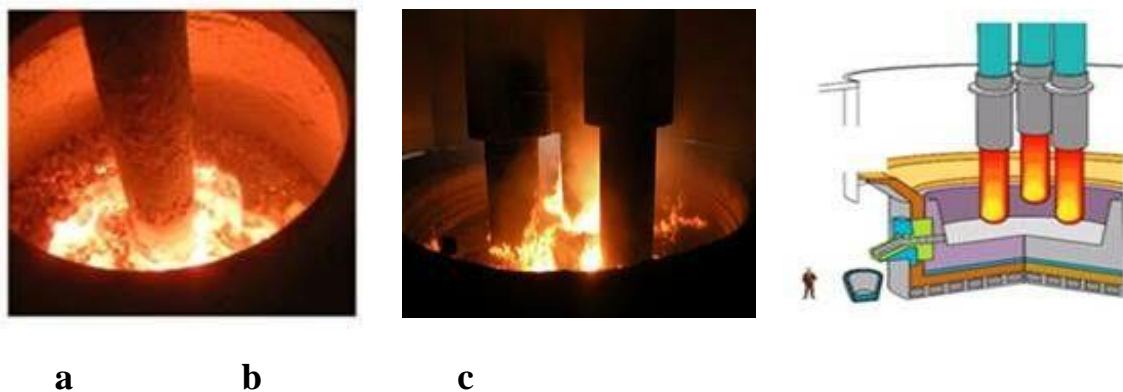


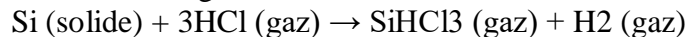
Figure II.9: Four à arc pour la production de polysilicium métallurgique a- schéma du four à arc, b- four à une électrode, c- et four à trois électrodes

Le silicium est libéré du four de fusion dans des moules en fonte garnis de blocs de charbon à une température de 1500-1600°C. La masse des lingots atteint 1200 kg. Ensuite, il est broyé en morceaux d'environ 100 mm

La pureté du silicium technique (métallurgique) est de 98 à 99% Si, son coût est de 1,5 à 2 dollars par kilogramme. À l'étranger, ce silicium est appelé MG-Si (silicium de qualité métallurgique).

II-6-1 Préparation et purification du tri-chloro-silane

Pour une purification ultérieure, le silicium est transformé en composé gazeux : il est chloré pour obtenir du tri-chloro-silane gazeux SiHCl_3 :



Le **tri-chloro-silane** gazeux passe à travers des cyclones et des filtres pour séparer les particules. Ensuite, le mélange gaz-vapeur entre pour la condensation, la séparation par distillation et le traitement multiple dans des colonnes de distillation.

II-7 Production du silicium dopé nucléaire (nus)

II-7-1 Méthode de réception :

Dans le dopage par transmutation neutronique (NTD), les dopants ne sont pas introduits dans un semi-conducteur, mais sont générés ("convertis") à partir d'un atome de la substance de base (silicium) par des réactions nucléaires provoquées par l'irradiation de la substance de base avec des neutrons thermiques. NTD permet la production de silicium monocristallin avec une répartition particulièrement homogène des atomes d'impuretés. Lorsque la substance irradiée est du silicium, le flux de neutrons provenant de l'isotope du silicium Si^{30} produit l'isotope radioactif ^{31}Si , qui se désintègre ensuite en isotope stable P31. Le P31 résultant crée une conductivité N. La technologie NTD diffère de la technologie métallurgique ou chimique en ce que le dopant n'est pas introduit de l'extérieur, mais est obtenu à partir du matériau irradié lui-même.

II-7-2 Le silicium dopé nucléaire

Est le silicium dopé par transmutation neutronique (Neutron transmutation doped silicon) est du silicium ultra pur, dans lequel certains des atomes d'isotope ^{30}Si ont été transmutés en atomes de phosphore P31 par le rayonnement neutronique du réacteur, créant une conductivité d'impureté de type n. Traditionnellement, un tel dopage est créé en mélangeant une très petite quantité de phosphore dans le bain de silicium.

Avantages de DN du Si par rapport à la métallurgie :

Avec la méthode métallurgique, il est très difficile d'obtenir une grande uniformité de la distribution de l'impureté introduite.

Seule la méthode ND du Si permet d'obtenir un silicium monocristallin de haute qualité répondant aux exigences modernes de l'électronique de puissance et de l'industrie électrique en termes de précision et d'uniformité de "l'introduction" des dopants, de reproductibilité et de stabilité des propriétés.

II-7-3 Exemple d'utilisation du quartz avec du silicium DOPE dans les briquets manuels pour l'allumage du gaz

1. Système de création de l'étincelle par piézoélectricité du Silicium dopé



Figure II-10: Photo d'un briquet manuelle contenant du quartz avec silicium dopé

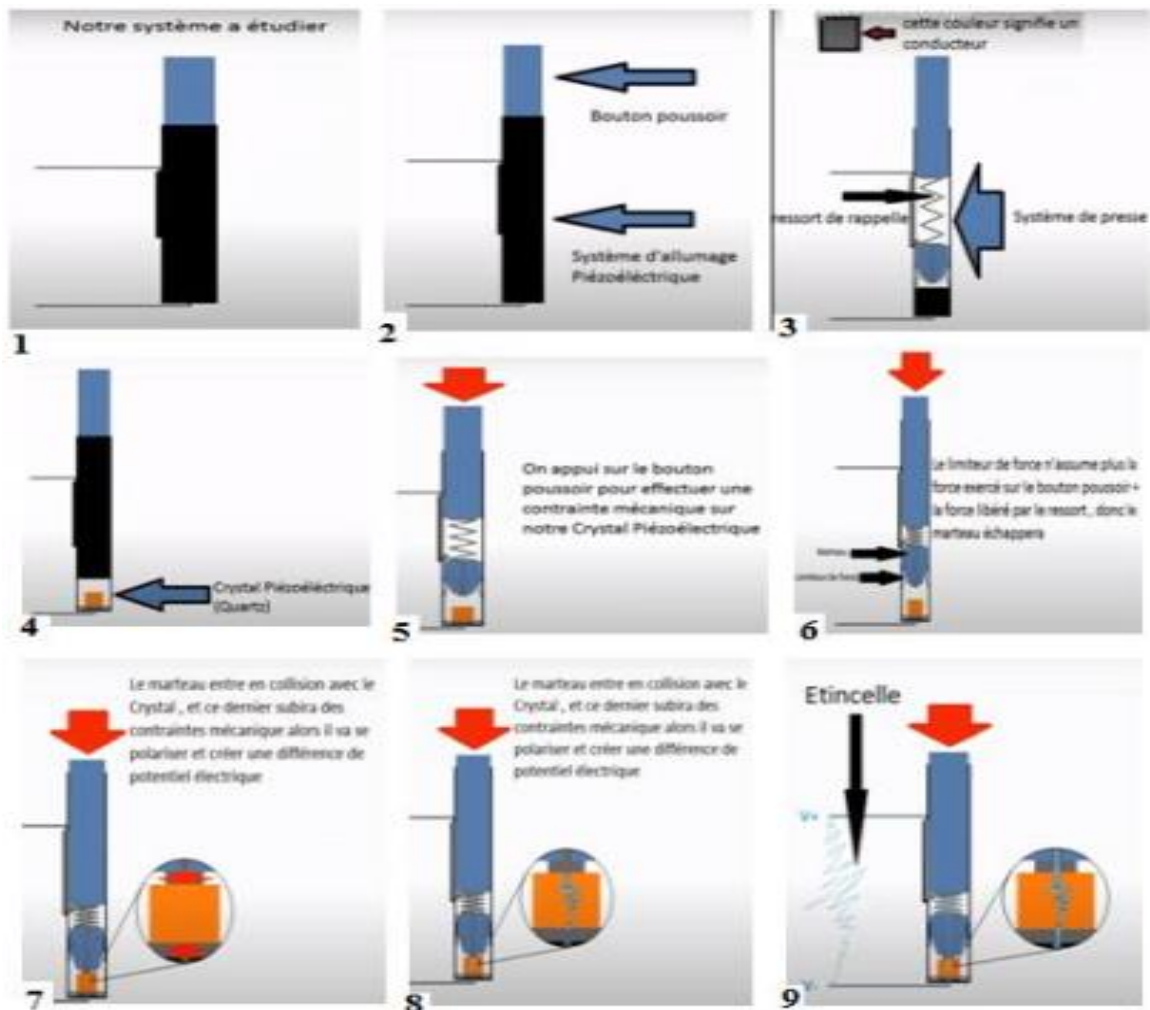


Figure II-11: Etapes de la création d'une d'étincelle par choc piézoélectrique.[61]

II-8 Fabrication de circuits intégrés en carbure de silicium (SiC)

Le composant le plus approprié pour les semi-conducteurs de puissance est le carbure de silicium, un matériau semi-conducteur à large bande dont les propriétés spécifiques permettent un fonctionnement à des températures élevées. Les propriétés positives du carbure de silicium sont une commutation rapide et efficace des tensions et courants élevés, une tension de claquage élevée, une bonne résistance aux radiations et une conductivité thermique élevée. Les inconvénients du son coût élevé et la température élevée requise pour le traitement.

La température des fours en carbure de silicium doit atteindre 2000°C, tandis que la température de fabrication des circuits en silicium ou GaAs est de 1200°C. Récemment, des fours verticaux à haute température ont fait leur apparition sur le marché. Ils utilisent des dissipateurs thermiques en MoSi₂ ou en graphite [62].

II-8-1 Fabrication de transistors SiC

II-8-1-1 La fabrication de circuits SiC

comme la fabrication de circuits silicium, consiste en des procédés de lithographie, de gravure et de dépôt de film par pulvérisation ou évaporation, dopage, diffusion ou électrolyse. Les températures sont plus élevées, de l'ordre de 1400 °C pour ces procédés pour déposer une couche diélectrique d'oxynitride, ou 1800-2000 °C pour activer les dopants implantés [62].

II-9 Dopage au bore du silicium amorphe hydrogéné:

Le but du dopage du silicium amorphe hydrogéné au bore est la possibilité de changer la nature des porteurs de charge libres et l'amplitude de sa conductivité électrique, condition préalable aux applications électroniques [63].

II-9-1 Notion de dopage au bore – cas du silicium cristallin (c-Si):

Lors de l'introduction des atomes de bore en substitution dans le réseau cristallin de silicium, les trois électrons périphériques du bore s'engagent dans des liaisons de valence avec trois atomes de silicium voisins, formant l'atome de bore B3 neutre

L'atome de bore B3 neutre correspond à un niveau énergétique extrinsèque EA vide d'électrons. Ce niveau est situé près de la bande de valence.

L'ionisation de l'atome de bore peut avoir lieu par le transfert vers celui-ci d'un électron de valence appartenant à un atome de silicium voisin, c'est-à-dire par la transition d'un électron de la bande de valence vers le niveau extrinsèque EA

De ce fait, l'atome de bore se transforme en ion négatif stable ; ce dernier engage alors une quatrième liaison de valence avec un atome voisin de silicium [64].

II-10 Méthodes de dopage des couches de silicium dans le processus de sublimation

L'épitaxie par faisceau moléculaire (MBE) de silicium est une technologie établie pour la croissance de couches de silicium, de solution solide de silicium-germanium, de siliciures et de diélectriques, ainsi que de structures multicouches à basse température [65, 66]. Cette méthode permet de contrôler l'épaisseur, le niveau de dopage des couches et la netteté de la frontière entre elles. Les couches dopées dans ce procédé sont obtenues par co-évaporation du silicium à l'aide d'un faisceau d'électrons et d'un dopant issu d'une cellule de Knudsen. Le choix du type d'élément d'alliage, d'une part, est limité par la nécessité d'avoir une faible pression de vapeur à basse température (200°C), et, d'autre part, de fournir des flux jusqu'à $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à des températures ne dépassant pas $\sim 1100^\circ\text{C}$. Pour ces raisons, les impuretés les plus couramment utilisées dans la technologie du silicium, l'arsenic et le phosphore, s'évaporent trop rapidement et le bore trop lentement pour contrôler efficacement leurs flux. Par conséquent, l'antimoine est principalement évaporé pour former des couches de

type n, tandis que le gallium et, moins fréquemment, l'aluminium sont évaporés pour les couches de type p [67–68]. En raison du faible coefficient d'adhérence de ces impuretés et de la dépendance du niveau de dopage de la couche à la température du substrat, leur concentration dans les couches de silicium ne dépasse pas 10^{18} cm^{-3} [66].

Pour augmenter le niveau d'alliage dans un certain nombre de travaux on utilise des faisceaux de dopage bore alliés à ionisation directe et à faible teneur en carbone et d'arsenic [69, 70] dans une couche d'accumulation à température de substrat $T_s = 700 - 900^\circ\text{C}$. Cependant, l'insertion ionique processus plutôt difficile, mais l'apparition dans les couches des défauts doivent être soigneusement recuits [71]

D'autre part, la méthode de sublimation du Silicium, à l'aide de laquelle la formation des couches individuelles, ainsi que des multicouches structurelle [72].

La pression de vapeur élevée du silicium près du point de fusion permet d'utiliser la sublimation du silicium pour obtenir des flux moléculaires. Par rapport à l'évaporation du silicium de la masse fondue, il y a moins de molécules polyatomiques dans la vapeur de Si, ce qui est l'une des conditions préalables à la croissance de couches à structure parfaite. De plus, la source de sublimation de silicium est de conception simple et fournit un flux propre d'atomes. En utilisant une source découpée dans un lingot de silicium dopé, des couches dopées peuvent être développées. Une stationnarité élevée du flux d'atomes d'impuretés est atteinte après un certain temps après le début de la sublimation, ce qui est une circonstance importante lors de la croissance de couches uniformément dopées sur l'épaisseur. La gamme de dopants utilisés est beaucoup plus large que dans le MBE [72–73].

La sublimation du silicium MBE a été utilisée avec succès pour développer des structures épitaxiales multicouches utilisées pour fabriquer des dispositifs. En particulier, les structures avec des couches de silicium dopées à l'erbium lors de la croissance présentent une forte intensité de photo- et d'électroluminescence [74, 75]. Il convient de noter que ces dernières années, certains chercheurs ont commencé à utiliser des sources de sublimation en complément de la méthode traditionnelle. Par exemple, dans [71], une telle source a été utilisée pour faire croître des couches de silicium dopées au phosphore à une concentration de $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Malgré le fait qu'à l'heure actuelle, théoriquement et expérimentalement les régularités ont été étudiées les lois du transfert de nombreuses impuretés de la source de sublimation du silicium dans la couche, il reste les conditions de la méthode de formation des couches par sublimation du silicium qui est moins étudiée dans des conditions l'extrusion sublimation du silicium, dopé au gallium.

Chapitre III :
Domaine d'utilisation de
silicium

Introduction

A travers ce que le monde assiste à une révolution technologique émergente qui permet d'apporter des solutions industrielles à tous les niveaux de ses différentes productions et besoins au profit du consommateur, disons que la technologie est toujours en développement continu, comme les utilisations de la technologie pour l'élément silicium sont parmi les utilisations les plus courantes dans diverses industries différentes en raison de sa nécessité dans le processus de la vie industrielle lors de son retour. Il présente de nombreux avantages dans toutes ses différentes productions, y compris (**les alliages d'aluminium, l'industrie cimentière et fabrication de cellules, plaques et modules solaires photovoltaïques, l'industrie médicale**)

III-1 Silicium dans les alliages d'aluminium coulé ; Alliages d'aluminium coulé

La composition chimique tabulaire des alliages d'aluminium coulé peut comprendre jusqu'à dix éléments d'alliage spécifiques, sans compter la colonne "autres" ou "somme des impuretés". Tous ces éléments ne sont pas les éléments d'alliage primaires pour chaque alliage d'aluminium : certains éléments sont primaires ou impuretés dans certains alliages et peuvent être interchangeables dans d'autres. Le zinc, par exemple, est une impureté dans la plupart des alliages d'aluminium coulé, et seulement dans certains c'est le principal élément d'alliage.

Les principaux éléments d'alliage des alliages d'aluminium coulé dans différentes normes comprennent :

- le silicium,
- le cuivre,
- le magnésium
- le zinc
- l'étain.

Les éléments restants peuvent être des éléments mineurs, des modificateurs de structure et des impuretés.

III-1-1 Le rôle du silicium dans la coulée des alliages

Le silicium est sans aucun doute le composant d'alliage le plus important dans la grande majorité des alliages d'aluminium moulés. Ces alliages doivent leurs soi-disant «bonnes propriétés de coulée» au silicium, c'est-à-dire la capacité de remplir facilement les moules et de se solidifier en pièces moulées sans fissuration à chaud. Le rôle important du silicium en tant qu'élément d'alliage dans les alliages d'aluminium coulé est le suivant :

1. La chaleur latente élevée de solidification du silicium assure une fluidité bonne ou satisfaisante de l'ensemble de l'alliage.
2. Le silicium a une solubilité limitée en solution solide (maximum 1,65%) et forme un eutectique avec l'aluminium à une teneur assez élevée (12%). Ceci conduit au fait que

dans un alliage même avec une teneur en silicium de quelques pour cent, la solidification se produit principalement dans un régime proche de l'isotherme. Dans ce cas, l'alliage d'aluminium coulé atteint une résistance significative, car il subit peu ou pas de retrait thermique, ce qui est très important pour éviter la fissuration à chaud.

3. Plus un alliage d'aluminium contient de silicium, plus son coefficient de dilatation thermique est faible.
4. Le silicium est une phase très dure, il contribue donc de manière significative à la résistance à l'usure d'un alliage d'aluminium.
5. Les composés de silicium avec d'autres éléments, tels que le magnésium, augmentent la résistance de l'alliage d'aluminium et le rendent thermodurcissable.
6. Une teneur élevée en silicium peut entraîner une instabilité dimensionnelle de la pièce moulée, en particulier à des températures élevées. Par conséquent, par exemple, lors de l'utilisation d'un alliage d'aluminium coulé AL2 pour des pièces d'instruments de haute précision, un traitement thermique de stabilisation spécial est fourni.[76]

L'aluminium pur se solidifie "isotherme", c'est-à-dire à température constante. Les compositions eutectiques (aluminium et 12 % de silicium, comme la silumine normale) se solidifient également de manière quasi « isotherme », c'est-à-dire dans une plage de température très étroite. Les alliages d'aluminium eutectiques se solidifient progressivement de la surface du moule vers le centre thermique de la section de coulée. Ils se caractérisent par une très faible épaisseur du front entre la partie déjà solidifiée de la coulée et le métal liquide restant. Ce durcissement minimise la tendance à la fissuration à chaud.

III-1-2 Le silicium guérit les fissures chaudes

La présence de silicium évite généralement la fissuration à chaud et améliore également la fluidité des alliages d'aluminium coulés. Aussi peu que 5% de silicium dans l'alliage fournit un degré suffisant de solidification isotherme pour empêcher la fissuration à chaud et en même temps augmenter la fluidité de l'alliage. Les fondeurs se réfèrent souvent aux alliages d'aluminium avec une large plage de températures de solidification comme "difficiles à couler". Cependant, ce n'est pas la large gamme de températures de solidification qui les rend difficiles, mais plutôt la forme caractéristique, non isotherme, des courbes de refroidissement, ainsi qu'une fluidité insuffisante. Ces deux problèmes sont dus au manque de silicium suffisant. L'alliage d'aluminium moulé américain 332 (9,5% Si-3,0% Cu-1,0% Mg), son analogue domestique le plus proche - AL25, a une plage de température de solidification relativement large, mais comme il contient une quantité importante de silicium, il a une bonne fluidité et proche du durcissement isotherme.

Les alliages d'aluminium coulé à haute teneur en silicium (séries américaines 3xx et 4xx, groupes I et II selon GOST 1583-93) "passent" une partie importante de leur solidification sur la "plate-forme" eutectique de la courbe de refroidissement. Lorsque le refroidissement atteint des températures inférieures à cette "plate-forme", une grande partie de l'alliage dur s'est déjà formée et seules les phases aux températures de solidification les plus basses sont encore liquides (généralement des eutectiques avec du

civre et/ou du magnésium). À ce moment-là, les alliages ont déjà réussi à former une structure suffisamment solide et résistante. Cette structure est capable de résister avec succès au retrait pendant le refroidissement restant de la "plate-forme" eutectique jusqu'à la solidification complète sans formation de fissures à chaud.[76]

III-1-3 Effet du silicium sur les propriétés des alliages d'aluminium

Avec une augmentation de la teneur en silicium, le coefficient de dilatation thermique de l'alliage, ainsi que sa densité, diminuent. Le silicium augmente la résistance à l'usure de l'alliage d'aluminium, ce qui fait souvent des pièces moulées en alliage aluminium-silicium un remplacement intéressant des fontes grises, par exemple dans l'industrie automobile. Par exemple, l'alliage hypereutectique américain 390 est largement utilisé dans la fabrication de pièces de moteurs, de pompes, de compresseurs, de pistons et de boîtes de vitesses.

Silex et outil de coupe. L'importance de la contribution du silicium à l'amélioration des propriétés de coulée des alliages d'aluminium a un inconvénient. Plus il y a de silicium dans l'alliage, notamment dans le domaine hypereutectique, plus l'usure de l'outil de coupe est importante lors de son usinage. Avec l'avènement des matériaux en diamant polycristallin, le problème de l'usure des outils de coupe a cessé d'être aussi pertinent lors du choix d'un alliage de coulée approprié. Cependant, lors de l'usinage de pièces moulées avec un outil de coupe en aciers rapides, des outils de coupe en carbure et d'autres matériaux moins résistants à l'usure, cette circonstance doit être prise en compte.[76]



Figure III.1: silicium métallique [76]

III-2 Application de la fumée de micro silice dans les matériaux de construction



Figure III.2: Silice dans les matériaux de construction

La silice fumée a été découverte comme sous-produit dans la fabrication du silicium métal. Cependant, en raison de ses propriétés physiques et chimiques, il s'est avéré efficace. C'est aussi une pouzzolane réactive (substance d'origine volcanique). Il est ajouté au béton pour assurer une résistance et une durabilité élevées. En raison de sa petite taille de particules, la silice fumée peut combler les vides dans les particules de béton. L'ajout de silice fumée au mortier, au béton de ciment et même au béton réfractaire peut aider dans de nombreuses applications.

III-2-1 Applications de micro-fumées de silice

Applications de micro-fumées de silice

- De petites particules de micro-poussière de silice fournissent un effet de remplissage dans le béton et améliorent la durabilité et la résistance.
- Les propriétés rhéologiques du ciment peuvent être améliorées par l'ajout de Silica Micro-Fume. Silice
- Meilleure résistance à la flexion
- La réaction des agrégats de strontium peut être évitée.
- Haute résistance à la compression.
- Les produits de ciment et de béton de mauvaise qualité présentent une durabilité accrue et un coût moindre lorsque de la fumée de silice est ajoutée à leur formulation.
- Amélioration de la perméabilité

III-2-2 Avantages de l'ajout de silice microparticulaire

- Amélioration de la résistance à la corrosion
- Amélioration de la durabilité et de la résistance à l'abrasion
- L'ajout de silice augmente la rétention d'eau, réduisant ainsi le ressuage lors de l'application du béton
- Exposition à des produits chimiques hautement réactifs qui n'affectera donc pas la durabilité des matériaux ajoutés à la poudre de silice. Les environnements contenant des sulfates et des chlorures ne raccourcissent pas la durée de vie des matériaux.
- Le béton projeté contenant du silicate peut s'épaissir en même temps [77]

III-2-3 Avantages de l'ajout de microparticules de silicate

- Meilleure résistance à la corrosion
- Augmentation de la durabilité et de la résistance à l'usure par corrosion
- L'ajout de silicate augmente la rétention d'eau et réduit ainsi le ressuage du béton
- L'exposition à des produits chimiques hautement réactifs n'affecte pas la durée de vie des matériaux ajoutés à la poudre de silice. Les environnements contenant des sulfates et des chlorures ne raccourcissent pas la durée de vie des matériaux.
- Dans le même temps, le béton projeté contenant du silicate peut s'épaissir

III-2-4 Propriétés physiques de la microsilice

- Petite taille de particules sphériques dans la plage de 100 à 200 nm
- La fumée de silice a une densité élevée d'environ 500 à 700 kilogrammes par mètre cube, ce qui en fait un complément idéal pour augmenter la densité du mélange de ciment global.
- La fumée de microsilice contient environ 85 à 97% de SiO_2 (dioxyde de silicium)
- Les autres composants de la poudre de microsilice sont le carbone et le soufre avec de petites quantités d'oxydes de fer, d'aluminium, de magnésium, de sodium, de calcium et de potassium [77]

III-2-5 Avantages significatifs de l'ajout de microbulles de silice au ciment

L'ajout de microbulles de silice au ciment ordinaire peut aider à obtenir les propriétés suivantes :

- Meilleure liaison entre les particules de ciment
- La cohésion entre les particules de ciment est considérablement améliorée
- Augmentation de la résistance à la compression de la silice - Molécules de particules qui remplissent vides dans le mélange de ciment et prévenir la fissuration
- L'effet de remplissage de la fumée de silice laisse un minimum de vides dans le mélange de ciment et réduit la perméabilité
- Le ciment additionné de fumée de silice a une chaleur d'hydratation plus faible

- Meilleure durabilité globale du mélange de ciment
- Silice la fumée offre une plus grande résistance aux environnements alcalins.
- La fumée de silice a d'excellentes propriétés hydrofuges, aidant à réduire les déchets d'application en réduisant le ressuage.
- Meilleure économie globale car moins de ciment est nécessaire en raison du mélange silice-vapeur.
- Problème de ségrégation significativement réduit dans le ciment

III-2-6 Applications de la micropoudre de silice dans divers procédés industriels. ; La micropoudre de silice

a une large gamme d'applications industrielles. Les diverses industries où il sera utile comprennent les projets hydroélectriques, la construction, les projets de conservation de l'eau, les projets de ponts et la construction de routes et de ports. Nous soulignons les applications importantes de la poudre de microsilice dans les projets industriels comme suit :



Figure III.3: Ciment par micropoudre de silice [77]

III-2-6-1 Microparticules de silice dans l'industrie cimentière

Comme mentionné ci-dessus, l'ajout de microparticules de silice au ciment améliore ses propriétés physiques et chimiques. Par conséquent, il est souvent utilisé dans des mélanges avec du béton pour augmenter la durabilité et la résistance dans les projets de construction.

III-2-6-2 Fumées fines de silice dans l'industrie du caoutchouc

L'ajout de fumée de silice au caoutchouc offre une excellente résistance au cisaillement, au retrait, à l'allongement et au vieillissement. Il améliore également les propriétés isolantes du caoutchouc.

III-2-6-3 Utilisation de la poudre de microsilice pour lier les granulés

Les matériaux en poudre sont transformés en granulés pour améliorer la surface du matériau ou pour faciliter le transport et la manutention. En ajoutant de fines particules de silice au mélange de granulés, les propriétés adhésives du mélange peuvent être améliorées.

III-2-6-4 L'utilisation de la fumée de microsilice dans l'industrie des engrais

La poussière de silice empêche les engrais de s'agglutiner.[77]

III-2-6-5 La fumée de silice comme isolant La fumée de silice

a une résistance élevée à la chaleur et aux produits chimiques. Par conséquent, il est utilisé pour l'étanchéité, le revêtement, le gainage et d'autres processus d'isolation.

III-2-7 Industries qui utilisent la fumée de micro-silice



Figure III-4 :Fumée de silice pour matériaux réfractaires

III-2-7-1 Industrie réfractaire

L'ajout de silice pyrogénée aux bétons réfractaires contribue à une densité de particules plus élevée. Sa présence signifie également qu'il faut moins d'eau pour obtenir des propriétés d'écoulement similaires. Les micro-fumées de silice sont utilisées dans les frites, les coulées et les réfractaires fondus.

De plus, sa présence garantit des températures plus basses dans le processus de frittage et crée de la mullite dans la structure de la matrice cimentaire. La réduction de la perméabilité signifie que le produit final résiste à la pénétration de laitier, de gaz ou de métal. Ainsi, l'ajout de silice pyrogénée aux réfractaires donne un produit à haute résistance qui est non poreux et stable à des températures élevées.

III-2-7-2 Industrie du béton et du mortier

Les applications de la poudre de microsilice dans le béton peuvent être divisées en trois domaines principaux : béton à haute performance, béton à haute performance et béton projeté.

III-2-7-3 Béton de microfumée de silice haute performance (CHP)

Comme son nom l'indique, il s'agit d'un matériau en béton avec une durabilité accrue et une résistance élevée. Il se caractérise par une résistance élevée à la corrosion, une faible perméabilité chimique et une résistance à l'abrasion. Le matériau a également une résistivité électrique très élevée. En raison de sa résistance à l'abrasion, il est utilisé dans les trottoirs, les parkings, les ponts routiers, les structures offshore et les revêtements. Les composants de la microfumée de silice sont également résistants aux attaques chimiques des sulfates, des nitrites, des chlorures et des acides.[77]

III-2-7-4 Béton à haute résistance aux microfumées de silice

Avec une résistance supérieure à celle du béton traditionnel, il permet une flexibilité dans la conception architecturale et technique. Avec une résistance à la flexion de 2000 psi, il a également un module de Young élevé d'environ 7 millions de psi. Par exemple, cela peut aider à réduire le nombre de supports nécessaires pour construire un gratte-ciel. Cela réduit les coûts de construction globaux et crée plus d'espace libre dans la structure du bâtiment. Il peut également être utilisé pour fabriquer des éléments préfabriqués en béton, ce qui accélère l'ensemble du processus de construction et permet de gagner du temps.. Le béton à haute résistance a une résistance à la compression élevée de 20 000 psi et sa résistance initiale aide à accélérer l'achèvement des projets préfabriqués.

III-2-7-5 Micro béton projeté à la fumée de silice

Le béton projeté à la fumée de silice est une aubaine pour les applications à haute résistance, en particulier celles qui disposent de moins d'espace. Il est utilisé pour aligner les puits de mine, stabiliser les roches et renforcer les anciennes structures de construction telles que les ponts. Sa force de liaison élevée et sa résistance chimique en font le meilleur choix pour le revêtement de poteaux et de colonnes marins. La poudre de silice minimise la perte de réflexion de

à 50r et maintient le mélange atomisé ensemble alors qu'il est encore humide. Une couche de pulvérisation plus fine peut donner d'excellents résultats (jusqu'à 12 pouces) qui nécessitent généralement 2 à 3 passages de pulvérisation. La fumée de microsilice peut être ajoutée au béton projeté en utilisant des méthodes sèches et humides.

III-2-7-6 Mortier et mortier de micropoudre de silice

La micropoudre de silice est utilisée comme additif dans les mortiers et les mélanges de mortier. Fournit plus de force et d'adhérence entre les ingrédients mélangés. Ces propriétés de réparation cimentaires sont particulièrement bénéfiques pour les mortiers verticaux et aériens. Le mortier peut être utilisé pour remplir et renforcer les structures existantes. La fumée de silice diminue la ségrégation du ciment et réduit le ressuage. Sa faible perméabilité aide à sceller les fuites de gaz et de produits chimiques. En tant qu'option légère, il peut être utilisé dans les zones de construction sensibles au poids. Les boues de fumée de silice peuvent fournir une excellente imperméabilisation dans les puits de pétrole. Il convient également pour sceller les fissures, les abrasions et réparer les fuites.

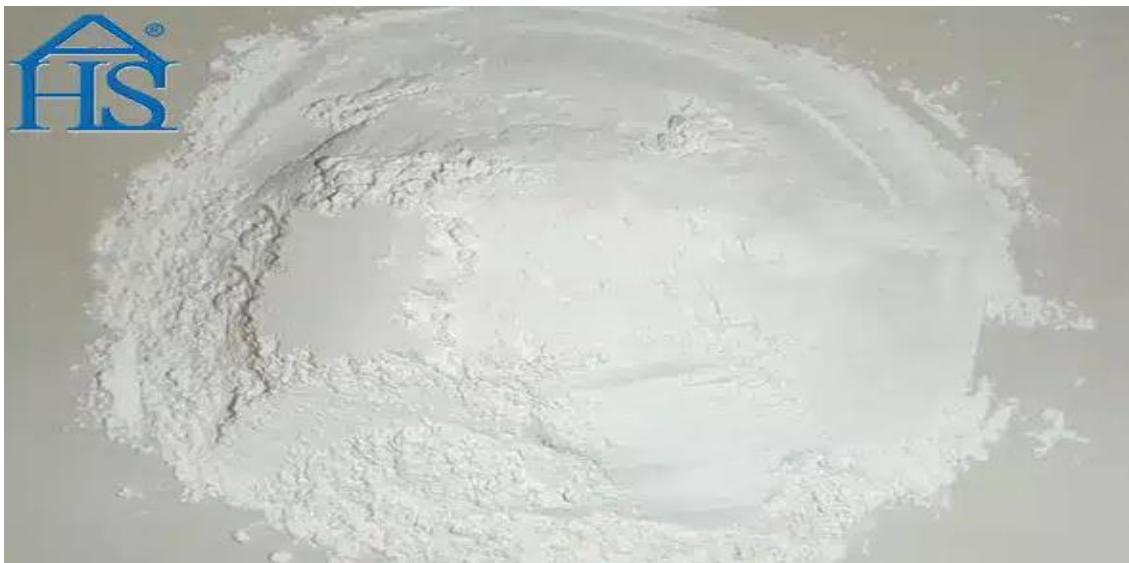


Figure III-5: Micro fumée de silice pour revêtement de peinture

III-2-8 Revêtements anti-fumée à base de microsilice

La fumée de silice est un composant important des revêtements. Fournit les propriétés de surface suivantes :

- Amélioration de la rhéologie et de la formation de film – Fournit des propriétés anti-sédimentation et de durcissement qui aident à la distribution uniforme des agrégats dans les mélanges d'asphalte.
- Résistant à l'eau et à la corrosion – La fumée de silice et les pigments anticorrosion améliorent la résistance à l'eau et les performances du revêtement.
- Résistance à l'abrasion – La fumée de silice renforce les composites et les élastomères, ce qui améliore la résistance à l'abrasion sans augmenter la viscosité du composé coûteux.
- Meilleur écoulement - Les revêtements en poudre nécessitent moins d'accumulation d'humidité et un bon écoulement pour rester efficaces pendant l'application. L'ajout de fumée de silice améliore la stabilité au stockage et les performances de manipulation.

- Contrôle de la brillance – Les propriétés réfléchissantes des revêtements peuvent être modifiées en conséquence en ajoutant de la silice fumée.

III-2-8-1 Poudre de microsilice dans les matériaux muraux et de décoration

La poudre de microsilice polyvalente est la meilleure matière première pour la production de mortier d'isolation thermique et de mortier polymère. Fournit une finition efficace et durable sur les murs vieilliss. Son pouvoir adhésif en fait un matériau idéal pour la décoration murale.

Parce que les peintres aiment avoir une surface lisse pour une application efficace et efficiente de la peinture, ils préparent des murs texturés avec du mastic au silicate. Crée une couche hydrofuge qui pourrait affecter votre peinture à l'avenir.

III-2-9 Pourquoi faut-il ajouter de la silice au béton ?

1. Production de béton à haute résistance (au-dessus de C70) avec de la silice, qui peut grandement améliorer la résistance et l'efficacité de pompage du béton ;
2. Production de béton auto-scellant à haute résistance à l'eau (\geq P30) utilisé dans les tunnels, les tunnels et les sous-sols des gratte-ciel ;
3. La distribution granulométrique des particules de silice est raisonnable, dense, dure, bonne résistance à l'usure, peut grandement améliorer le durcissement à la traction, la compression, la résistance aux chocs et la résistance à l'usure, la résistance aux chocs peut être améliorée de 0,5 à 2,5 fois
4. La silice fumée peut augmenter la conductivité thermique, altérer l'adhésif et augmenter les propriétés ignifuges.
5. Il peut réduire la température maximale exothermique de la réaction de durcissement de la résine époxy, réduire le coefficient de dilatation linéaire du matériau durci et le taux de retrait du matériau durci, éliminant ainsi les contraintes internes et empêchant la fissuration.
6. En raison de la taille fine des particules et de la distribution raisonnable de la fumée de silice, les précipitations et le délaminage
- 7 peuvent être efficacement réduits et éliminés. Silice fumée pure, faible teneur en impuretés, propriétés physiques et chimiques stables, de sorte que le matériau durci présente de bonnes performances d'isolation et de protection contre les arcs.
8. La production de béton marin et chimique, en raison de sa densité élevée, empêche efficacement les ions sulfate et chlorure de pénétrer dans le béton, ainsi que l'érosion, et empêche la corrosion des armatures de béton, prolongeant ainsi la durée de vie du béton.
9. La composition chimique de la microsilice est le dioxyde de silicium. (SiO_2) est un matériau inerte, et la plupart des acides et alcalis ne participent pas à la réaction chimique, y compris la décomposition de la vapeur de silice. La surface de l'objet a une forte capacité anti-corrosion et anti-cavitation augmentée de 3 à 16 fois.

10. La densité de tassement de la silice pyrogénée est faible : une entre 0,2 et 0,8, une entre 1,0 et 2,2. En tant que charge polymère, le dosage est inférieur à celui des autres charges minérales, le poids de chargement est faible, ce qui peut économiser le dosage du polymère, réduisant ainsi le coût du produit.

11. Silice Résistance au gel : microsilice après 300 à 500 cycles rapides de gel-dégel, faible degré de module d'élasticité relatif de 10 à 20 %, tandis que béton normal après 25 à 50 cycles, faible degré de module d'élasticité relatif de 30 à 73 % . Cela peut améliorer la résistance au gel du béton.

12 Poudre de silicate à résistance précoce : Le béton de silicate raccourcit le temps d'induction et présente des propriétés de résistance précoce. Ces fonctionnalités sont très bonnes!

13. Les fumées de silicate dans la conservation de l'eau, les autoroutes, les projets de ponts et le béton ont non seulement besoin des paramètres de base ci-dessus, mais ont également des exigences très strictes en matière de résistance à la corrosion, à l'usure et à l'abrasion. Il est impératif de le mélanger avec du silicate.

14. Silica Smoke est un mélange de béton hautement actif, résistant à l'eau, à haute résistance et à résistance initiale adapté aux besoins de construction rapides. le processus de construction de tunnels, de passages souterrains et de grandes excavations pour soutenir la mise en place de béton projeté à haute résistance ; Projets de construction sous-marine (pieux, barrages, plates-formes pétrolières, etc.)) mixte[77]

III-2-10 Le processus de mélange de la poudre de silice

Microconcrete et du béton coulé doit être effectué dans la salle d'essai strictement selon les proportions de la structure. Lors du mélange de béton avec de la poudre de microsilice, la poudre de microsilice doit être ajoutée au malaxeur immédiatement après l'ajout de l'agrégat. Il existe deux méthodes d'addition. Assemblez

(1), puis ajoutez de la poudre de micro silice, un mélange de ciment sec, puis ajoutez de l'eau et d'autres additifs.

(2) Dispersion de granulats grossiers + 75 % d'eau + fumée de silice + 50 granulats fins, mélanger pendant 15 à 30 secondes, puis verser le ciment + additif + 50 granulats fins + 25 % d'eau, remuer jusqu'à consistance lisse. Temps de malaxage 20-25% ou 50-60 secondes plus long que le béton traditionnel. Ne jamais ajouter de poudre de silice au béton déjà mélangé

III-2-10-1 Construction en poudre de silice

Il n'y a pas de différence significative entre la construction en béton de poudre de micro silice et le béton ordinaire, mais il doit être bien agencé et avoir de fortes vibrations pendant la construction. La résistance initiale du béton microsilicate raccourcit le temps de prise final. Que faut-il considérer lors du plâtrage? Dans le même temps, l'ajout de poudre de microsilice améliore l'adhérence du béton et réduit considérablement le lessivage de l'eau, ce qui rend le plâtrage quelque peu difficile[77].

III- 3 Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques

Le fonctionnement du capteur photovoltaïque n'étant pas particulièrement coûteux, l'impact environnemental est nécessairement localisé en amont de la chaîne, lors de la production et en fin de vie, lors de son démantèlement. Il est donc utile de connaître les techniques de production afin de bien comprendre d'où viennent les différents flux de matière et d'énergie et comment ils sont utilisés, i. H les plus établis, chaque constructeur développant bien sûr ses propres variantes.

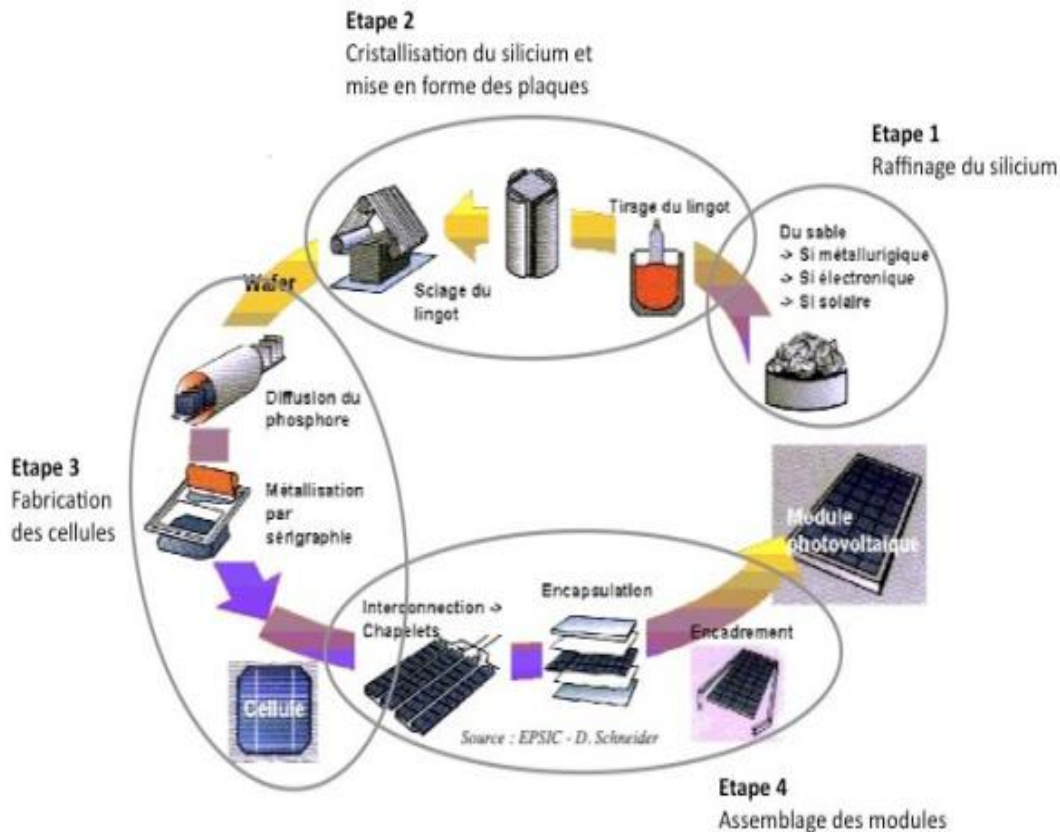


Figure III-6 : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin

Comme vous pouvez le voir sur la figure 2, il y a plusieurs étapes entre le cristal et le panneau solaire fini. L'affinage du silicium s'effectue en deux étapes : d'abord l'extraction du silicium du minerai de quartz, puis la purification de ce silicium par différentes techniques. Après nettoyage, il est plaqué et activé par une série de traitements spécifiques. Les cellules photovoltaïques sont ensuite assemblées et installées dans les modules.

III-3-1 Le raffinage de la silice

93% du marché du photovoltaïque en 2006 repose encore sur la technologie silicium (polycristallin, monocristallin et ruban). Sur la base d'un besoin de 15 tonnes/MW, l'industrie

photovoltaïque aura besoin d'environ 40 000 tonnes de silice annuellement pour produire 5 GW de panneaux photovoltaïques dont 90% sont en silice. Selon l'US Geographical Survey, environ 5 millions de tonnes de silice ont été produites dans le monde en 2007 ; L'industrie photovoltaïque représente ainsi un peu moins d'un pour cent de ce total.

Ce matériau est obtenu à l'issue du processus de purification, qui peut être divisé en deux étapes principales [78]. Four à arc, un outil courant en métallurgie

Un four à arc, un outil courant dans l'industrie métallurgique, est utilisé pour convertir le quartz en MG-Si, ou silice de qualité minérale. La pureté du MG-Si varie de 98 à 99 %. La deuxième transition est une conversion pure à 99,9999 % du silicium métallique en silicium de qualité solaire, ou SoG-Si. La méthode traditionnelle, héritée du développement de l'électronique, utilise des réacteurs chimiques pour produire du silicium polycristallin, ou poly-Si. C'est l'étape la plus énergivore de tout le processus de fabrication d'un module photovoltaïque. Compte tenu du coût de cette étape et de la possibilité de se permettre une pureté moindre, des stratégies de production de silicium solaire à partir de nouveaux procédés chimiques et métallurgiques sont explorées.

III-3-2 Du silicium métallurgique au silicium solaire

Le silicium solaire (SoG-Si), également appelé silicium polycristallin (poly-Si), est obtenu par la purification métallurgique du silicium et sert à fabriquer des lingots de silicium. Il existe plusieurs voies de production de silice solaire de qualité que l'on peut regrouper en deux grandes familles : la voie chimique et la voie mécanique. Actuellement, la voie chimique contrôle la quasi-totalité du marché, avec deux procédés principaux dérivés du trichlorosilane (75 %) et du monosilane (25 %). Elle nécessite plus d'énergie que la voie métallurgique et présente l'inconvénient du danger lié à l'utilisation de produits chlorés. L'un des objectifs de l'industrie électronique dans laquelle elle travaille est qu'elle permette d'obtenir un matériau avec un degré de pureté plus élevé.

III-3-3 méthode Siemens: Procédé chimique

méthode Siemens Cette famille de procédés est basée sur la forte attraction de l'atome de silicium (Si) sur les ions chlore (Cl⁻). Ils produisaient régulièrement des composés gazeux contenant du Du Généralement constitué de chlorosilanes, le silicium est purifié par distillation avant d'être déposé sous forme de silicium polycristallin par décomposition thermique. Les trois principales variations de silane sont le trichlorosilane, le monosilane et le tétrachlorosilane [79]. Cette filière génère des quantités importantes de déchets chlorés et nécessite d'opérer sur de grands sites industriels soumis à des exigences réglementaires strictes (sites Seveso dans l'UE). Plusieurs méthodes de recyclage peuvent être mises en œuvre ; elles concernent les produits chimiques chlorés, l'hydrogène et la chaleur.[79]

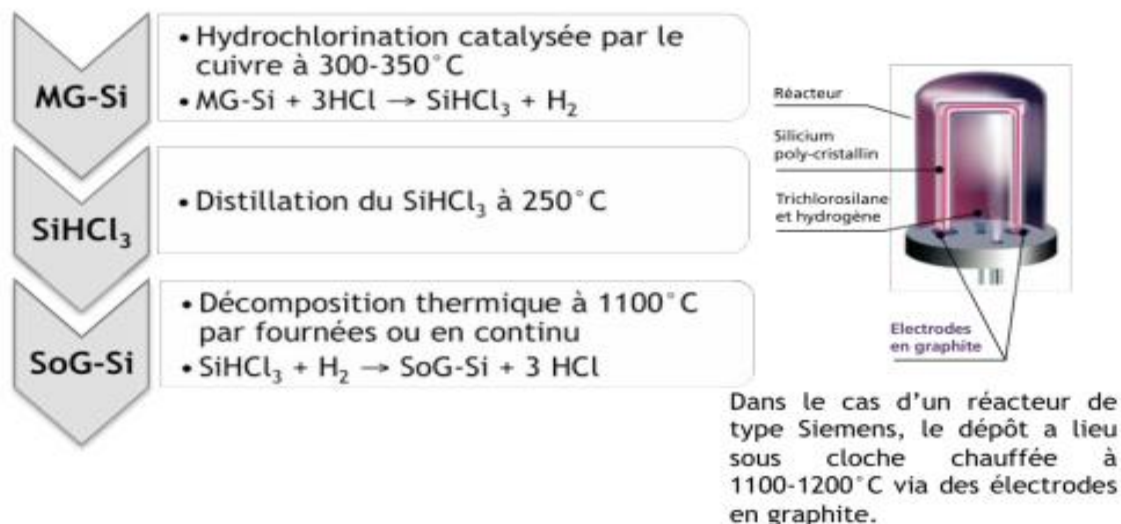


Figure III-7 : Procédé Siemens [80]

Dans le procédé Siemens modifié, le dépôt est réalisé en continu dans un réacteur à lit fluidisé. Les grains de silice sont formés sur des particules de précurseur de silice en suspension dans un mélange gazeux silane/hydrogène à 600–800 °C, et ils sont collectés par gravité dans le fond du réacteur. L'avantage de cette dernière alternative est qu'elle utilise moins d'énergie et prend moins de temps à déposer. Cette méthode, qui était auparavant réservée au monosilane, est maintenant appliquée aux dépôts de silicium à base de trichlorosilane. Autres procédés chimiques Il existe d'autres procédés de purification chimique qui utilisent du chlore et qui diffèrent de plusieurs manières [81]. Dans tous les cas, la première étape consiste à séparer le Si de toutes les impuretés métalliques en réagissant le MG-Si broyé avec du dioxyde de chlore (Cl₂) ou du chlorure d'hydrogène (HCl). Le résultat de cette interaction est la formation de complexes chloro-métal facilement solubles comme FeCl₃, AlCl₃ et BCl₃ ainsi que des chlorosilanes de type SiHCl₃ ou SiCl₄. Les procédures suivantes permettent l'extraction de Si pur à partir de silanes chlorés en utilisant diverses méthodes de distillation, d'échange d'ions ou de pyrolyse. La deuxième approche la plus développée dans le silane utilise une triple distillation de trichlorosilane pour créer du monosilane SiH₄ et ses composés apparentés.

III-3-4 fabrication de cellules, plaques et modules solaires photovoltaïques

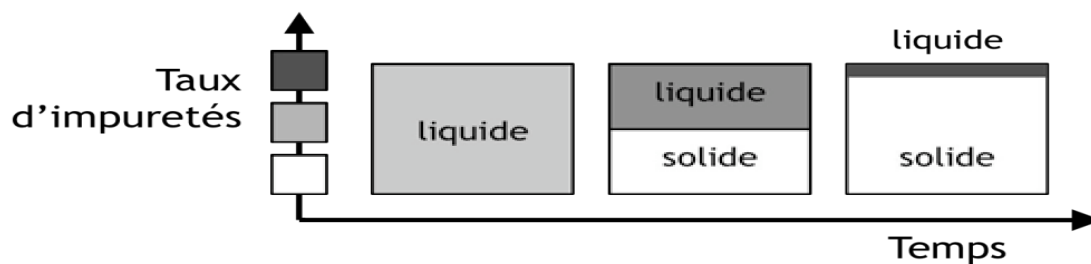
Une expertise spécifique à l'industrie photovoltaïque est utilisée à ce stade du processus de fabrication [82].

La silice solaire ou polycristalline sera encore fondue et resolidifiée en lingots ou rubans, où les plaques de silice seront cassées. Ces plaques subiront des modifications internes qui leur permettront de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ils seront ensuite reliés entre eux et protégés des influences extérieures dans un module photovoltaïque. La création des autres composants du système, en particulier le matériel électrique, tels que les câbles et les ondules, ne sera pas abordée en détail.

III-3-5 Cristallisation de la silice et formation de plaques

Ce sont les dernières étapes du traitement du silicium avant la fabrication de la cellule photovoltaïque bien nommée. La silice subira un autre cycle de purification avant d'être uniformément dopée et brisée en plaques après refroidissement. La solidification contrôlée du silicium polycristallin dissous constitue le processus de cristallisation. L'élément dopant, souvent issu de l'alésage qui produit un dopant de type P, viendra s'ajouter à la charge de silicium que l'on fusionne. Le produit final du matériau est un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné d'atomes de silicium. Remarque : En référence aux modules, le silicium multicristallin, qui est produit par cristallisation contrôlée du silicium polycristallin, est souvent appelé polycristallin.[82]

La ségrégation est utilisée pour éliminer les impuretés. Les impuretés migreront vers les zones où la solidification se produit en dernier car elles sont plus solubles en phase liquide qu'en phase solide. Ils se concentreront sur le dessus du lingot en cas de refroidissement qui ne se produit pas au fond.



FigureIII- 8 : Mécanisme de ségrégation des impuretés lors de la cristallisation

III-3-6 On distingue les impuretés:

métaux : Fe, Cr et Mn pour les

impuretés les plus chères : B, Ga, Al, As et P

oxygène O, carbone C et azote N.

Seuls réduisent le rendement de la cellule, qui normalement forme

complexes qui réduisent la conductivité du matériau.

Trois grandes voies de cristallisation sont envisageables, selon le choix technologique du constructeur [83]. Le procédé Czochralski produit des lingots cylindriques de silicium monocristallin ou sc.Oui, la silice solidifiée directionnellement produit des briques multicristallines ou mc.Lorsque le ruban est extrait selon certaines procédures, de la silice multicristalline est contenue dans le ruban.

Silicium monocristallin (sc-Si) Ce matériau est constitué d'un monocristal et a une seule couleur grise. Il est produit via le procédé Czochralski ou CZ, qui consiste à faire pousser ou à

évaporer un lingot cylindrique à partir d'une "souche" monocristalline. Les cellules finales ont l'un des meilleurs taux de performance, à 15 % ; cependant, il y a un coût énergétique plus élevé pour leur préparation.

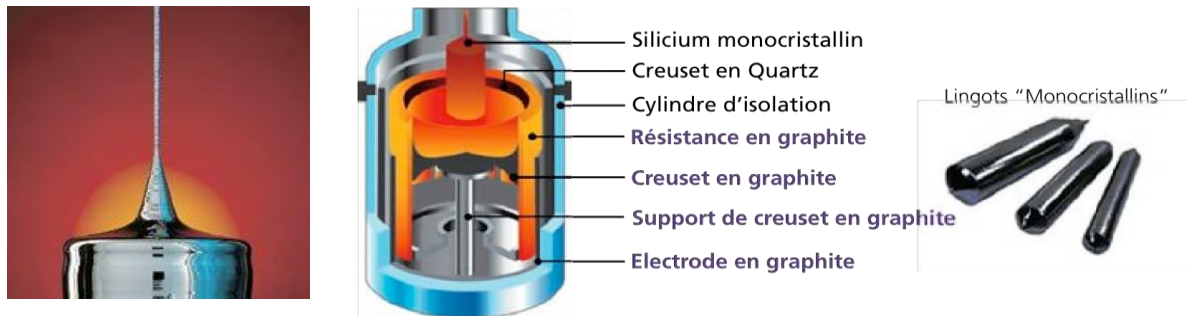


Figure III-9 : Tirage des lingots

III-3-7 Silicium multicristallin (mc-Si)

Ce matériau gris est constitué d'une mosaïque irrégulière de cristaux monocristallins de silice de différentes tailles et directions. Il est obtenu par coulage de lingotière, où un lent processus de refroidissement se déroule sur plusieurs dizaines d'heures. Son point de départ est moins énergivore et le rendement ultime de la cellule n'est que d'environ 12 %.

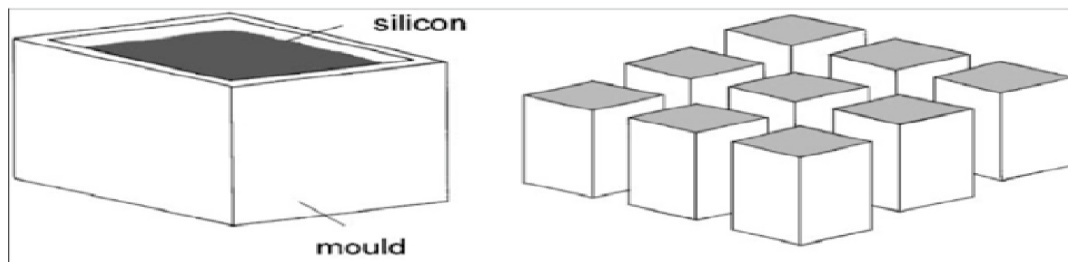


Figure III-10 : Mise en forme des lingots de silicium multicristallin

III-3-8 Sciage des plaques

Les lingots monocristallins et les briques polycristallines sont ensuite découpés en bandes à la scie à fil d'environ 250 mm d'épaisseur, l'opération se déroulant en présence de l'ory, une solution organique contenant des abrasifs en suspension.

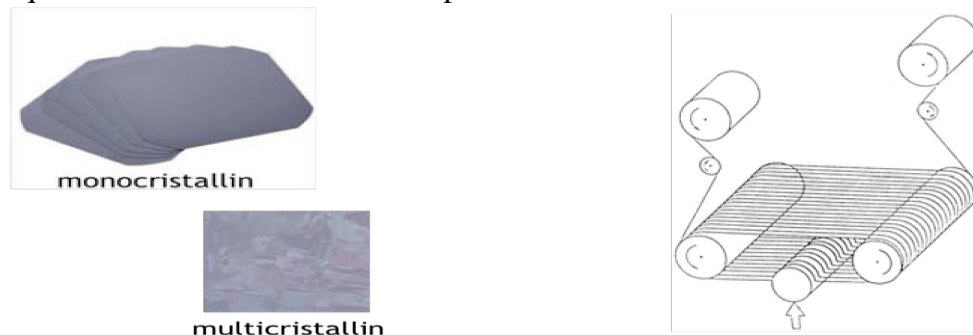


Figure III-11: Plaques de silicium cristallin et scie à fil [85],[82]

III-3-9 Silicium multicristallin en rouge

Cette dernière option technologique combine les procédés de cristallisation de la silice et de formation de la silice et présente l'avantage de minimiser les pertes de matière. Il est produit en forçant un ruban de silice sur une structure de support ou un tube après avoir été chauffé dans un bain de silice.

III-3-10 Silicium multicristallin en ruban

Cette dernière option technologique combine les procédés de cristallisation de la silice et de formation de la silice et présente l'avantage de minimiser les pertes de matière. Il est produit en forçant un ruban de silice sur une structure de support ou un tube après avoir été chauffé dans un bain de silice.

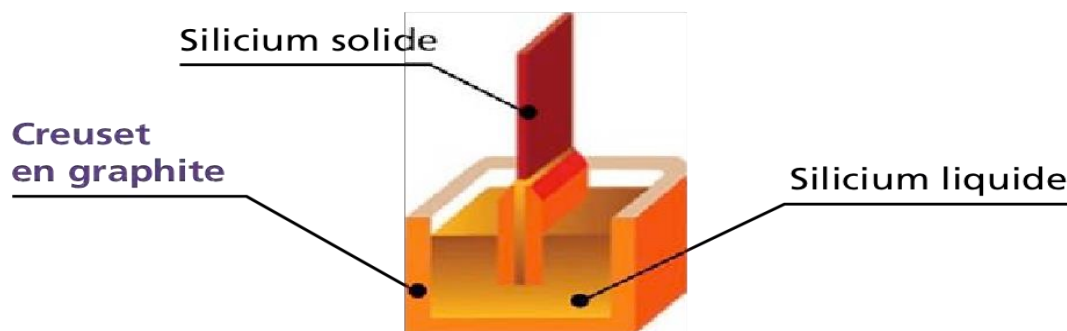


Figure III-12 : Etirage d'un ruban de silicium [80]

III-3-11 Fabrication des cellules

La particularité des cellules au silicium réside dans le fait que le matériau support et le composant actif sont un seul et même matériau. Ceci est rendu possible par le prix abordable du silicium par rapport à d'autres matériaux semi-conducteurs. Après le retrait des plaques, la création des cellules permettra d'utiliser les propriétés semi-conductrices de la silice et de convertir l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

III-3-12 Principes de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin

Lorsque de l'énergie est appliquée à un matériau semi-conducteur, il se transforme d'un matériau électriquement isolant en un conducteur. Cette énergie permet aux électrons de se séparer du noyau de l'atome et de se déplacer librement dans la structure du matériau. Lorsque cette énergie est fournie sous forme de lumière, les photons ou « particules de lumière » transfèrent leur énergie aux électrons. Ensuite, nous discutons de l'effet photoélectrique. L'idée derrière une cellule photovoltaïque est de profiter de ce mouvement d'électrons et de le transformer en un courant électrique utile. Pour ce faire, on utilise une électrode collectrice reliée à un circuit électrique externe pour extraire des électrons du matériau.

- 1 Grille de métallisation avant
- 2 Couche antireflet
- 3 Surface avant dopée n et texturée
- 3-4 Jonction et champ électrique
- 4 Substrat p
- 4-5 BSF, « champ » arrière
- 5 Dopage p+
- 6 Métallisation d'aluminium
- 7 Métallisation soudable

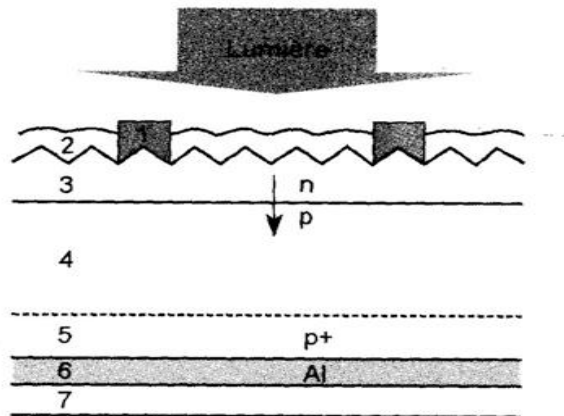


Figure III-13: Empilement des couches d'une cellule photovoltaïque au silicium cristallin [86]

Toute l'astuce consiste à forcer les électrons à s'écouler dans l'électrode plutôt qu'à se recombiner avec des atomes chargés positivement à l'intérieur du matériau. Cela nécessite que le matériau contienne un champ électrique permanent interne. Pour ce faire, deux zones sont créées, l'une chargée positivement et l'autre négativement, qui formeront ensemble une jonction p-n. Cette jonction assure la fonctionnalité de la diode en permettant au courant de circuler dans un seul sens et, par conséquent, en orientant le mouvement des électrons

III-3-13 L'assemblage des modules

Les modules ont pour but de protéger les cellules de l'environnement extérieur et de faciliter leur fonctionnement en minimisant au maximum les pertes optiques et les pertes d'énergie. rendements apportés par l'échauffement des cellules actives.



Figure III-14 : Assemblage des modules photovoltaïques

III-4 L'utilisation du silicium dans l'industrie médicale

Absolument sans danger pour le contact direct avec le sang et les milieux biologiques, tubes capillaires et autres tubes médicaux en silicone stérilisés à plusieurs reprises, fiables et durables pour toutes les tâches de chirurgie et de pharmacologie. Le silicium est un polymère organosilicié, également appelé "polyorganosiloxane". Les macromolécules de silicium sont des chaînes d'atomes de silicium et d'oxygène accompagnés de différents radicaux. Les polymères de silicium ont trouvé une large application pratique depuis les années 1940. C'est alors que les résines, les plastiques, les liquides, le caoutchouc de silicium ont commencé à entrer fermement dans nos vies. Dans divers domaines, dont la médecine. En raison de l'ensemble unique de propriétés, le silicium n'a pas de concurrents parmi les autres matériaux de cette industrie. La bioinertie et la biostabilité du silicone sont inégalées. Mais ces propriétés sont essentielles pour une utilisation dans la pratique médicale et l'équipement médical.[87]

III-4-1 Pourquoi le silicium est-il bon du point de vue d'un chirurgien ?

La première utilisation de silicium comme implant a eu lieu en 1948. Déjà la première expérience de ce type a montré que les implants en silicone n'irritent pas les tissus corporels, ne sont pas toxiques, ne provoquent pas de réactions allergiques ni de rejet. Les propriétés uniques du silicium ne sont pas épuisées pour autant : hydrophobicité, anti-adhésion et hémocompatibilité sont à mentionner. Cela permet au silicone d'être utilisé avec succès en cardio et neurochirurgie, urologie, chirurgie plastique et reconstructive, etc.

III-4-2 Stérilité absolue

La résistance à la stérilisation est l'un des avantages importants du silicium. Une large plage de température de fonctionnement (de -60°C à $+150 - 200^{\circ}\text{C}$) vous permet de stériliser les produits en silicone avec de l'air à 180°C , dans un autoclave avec de la vapeur surchauffée à $120 - 130^{\circ}\text{C}$, faire bouillir pendant un temps arbitrairement long. Le silicium étant chimiquement inerte, il résiste parfaitement aux effets des acides et des alcalis, des solutions salines, de l'ammoniac, du peroxyde d'hydrogène, de l'alcool éthylique, de l'acétone. Le silicone gonfle dans l'essence, les solvants et les hydrocarbures chlorés. Mais ce gonflement est réversible. Les propriétés exceptionnelles des silicones ont déterminé leur utilisation dans la technologie médicale. Il n'y a pratiquement aucun domaine de chirurgie où les silicones ne seraient pas utilisés, et il n'y a aucune zone du corps où ils ne seraient pas injectés. Les produits en silicium sont utilisés en général, cardiovasculaire, intracavitaire, neurochirurgie, chirurgie maxillo-faciale, ophtalmologie, oto-rhino-laryngologie, orthopédie, urologie, gynécologie, dentisterie, anesthésiologie. Et cette liste n'est pas encore complète. Depuis plus de vingt ans, à la place de la méthode au peroxyde dans la fabrication des dispositifs médicaux, une méthode spéciale « platine » (catalytique) de vulcanisation du silicone est utilisée. Cette méthode est largement utilisée dans la pratique mondiale pour obtenir des produits particulièrement critiques : implants, endoprothèses, etc.[87]

III-4-3 Cœur en silicium

Tout le monde connaît les sondes, les drains, les tubes, les systèmes de transfusion sanguine et les gouttes en silicium ; mais de nouveaux produits médicaux étonnants à base de silicium ont déjà été créés et mis en œuvre :

- fils électriques implantables ;
- électrodes pour stimulateurs cardiaques ;
- des modèles de cœurs artificiels portés au stade d'expérimentations animales ;
- les systèmes implantables pour lutter contre l'hydrocéphalie ;
- implants oculaires en silicium ;
- pour la scléroplastie contre le décollement de rétine ;
- masques laryngés, etc

Le silicium a un grand avenir en médecine : un merveilleux matériau créé artificiellement par l'homme contribue de plus en plus à prolonger la vie des gens et à maintenir la santé.[87]

Chapitre IV:
Analyse et contrôle de la
qualité des roches noires
dans la production de
silice

IV-1 Partie expérimental

Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons les propriétés chimiques et physiques de quelques échantillons: roche noire, argile et sable prélevés dans la zone de M'sila.

Afin de connaître le pourcentage de silice dans les roches noires, et de le comparer avec les résultats montrés lors de l'étude de l'argile et du sable précédemment, nous réaliserons une série d'essais (FTIR, DRX et Densité)

La roche est définie comme un matériau solide de différentes formes et tailles dans la nature, qui se caractérise par ses couleurs différentes les unes des autres en raison des différentes caractéristiques qui déterminent le domaine de ses utilisations dans la technologie moderne.

IV-1-1 Préparation des Echantillons

IV-1-1-1 Préparation des roches noires

Préparation des roches noires Nous avons pris une quantité de roches noires, l'avons bien lavée à l'eau, et l'avons séchée complètement à l'air.



a) b)

Figure IV-1- : a) La roche noire b) roche fragmentée

IV-1-1-2 Concassages et broyage

Après avoir bien séché la roche noire, nous avons broyé la quantité de roche noire à étudier par concassage manuel pour bien la broyer au moulin manuel.



a)



b)

Figure IV-2 : Concassages et broyage des roches noires

a- concassage

b-broyage manuel

IV-1-1-3 Analyse granulométrique par tamisage

La granulométrie est analysée en déterminant et en contrôlant les diamètres des différents granulés composant la quantité de poudre à étudier à l'aide de tamis en fonction de leurs diamètres. Les granulés isolés peuvent ainsi être pesés pour déterminer la proportion de chacun d'eux dans l'échantillon. La principale technique de classification reste le tamisage et c'est ce que nous utilisons et étudions dans les travaux pratiques, en triant la taille des particules selon la taille que l'on souhaite utiliser dans l'étude concernée. Les opérations de tamisage sont simples, mais il est inévitable qu'il y ait des erreurs qui nuisent à la qualité du produit tamisé pour de nombreuses raisons, notamment le colmatage des mailles avec des granulés ou même la distorsion des dimensions des ouvertures, etc. Nous avons étudié la taille des granulés en tamisant la poudre de roche noire sèche après en avoir pesé une quantité pour l'étudier et la mettre dans la tamiseuse afin de la tamiser et séparer la taille de ses particules afin qu'elle puisse les séparer selon leur diamètres puis pesez chacun séparément pour obtenir les résultats suivants :

Prélever (0.385 kg) de roche noire.

Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit la masse du tamis.

Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas :

0.2mm_0.1mm 0.08 mm 0mm

On commence par verser le sable sec sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 10 mn.

Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.

Peser chaque tamis séparément à 1 g près.

Les résultats d'analyse granulométrique de la roche noire utilisé sont représentés dans le tableau N°IV-1

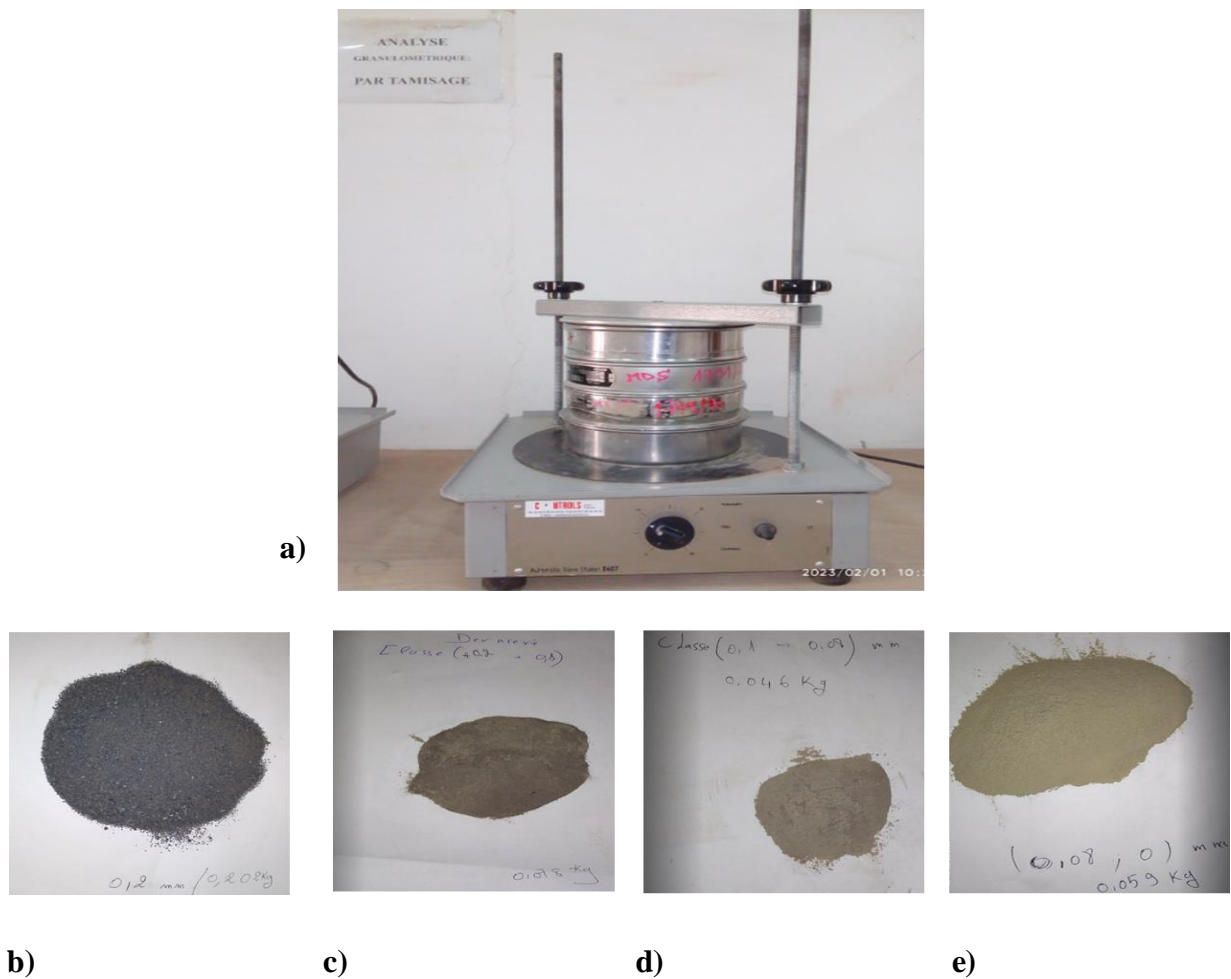


Figure IV-3 : Tamisage de la poudre de roche noire broyée :
a) Série de tamis ; b) classe fine (+0.2mm) ; c) classe fine (-0.2+0.1mm) ;
d) classe fine (-0.1+0.08mm) ; e) classe fine (-0.08+0mm)

Tableau IV-1 : Résultat de tamisage

Diamètre (mm)	0.2	0.2_0.1	0.1_0.08	0.08_0
Poids (Kg)	0.202	0.078	0.046	0.059

IV-1-2 Les caractéristiques des roches noires

IV-1-2-1 La Densité

La densité est définie comme une masse d'un volume, et elle est estimée à g/cm^3 ou kg/m^3 , et c'est une propriété sensible dont la valeur n'est pas liée à la quantité de matière donnée par le relation : $D = m/v$

D : la densité

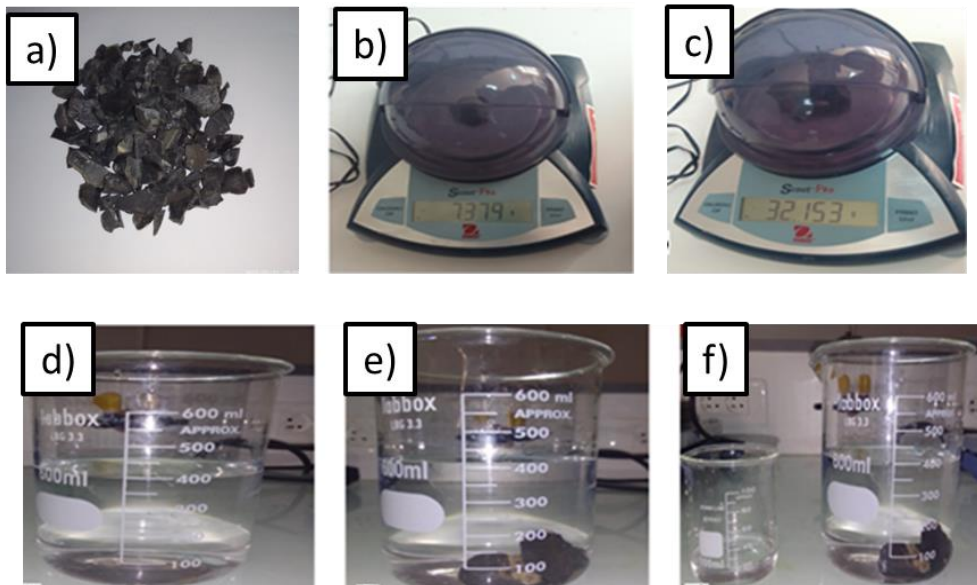
M : masse échantillon

V : voulum eau distillée

Objectif de l'expérience :

Pour l'étudier de la densité des roches noire, on acommencer par les étapes suivantes :

1. On pèse la roche m_1 ;
2. On pose la roche noire pesée dans un bécher contenant 400 ml d'eau et le peser m_2 ;
3. Puis on mesure le niveau d'augmentation du niveau d'eau, qui représente le volume de roche noire ajouté à l'eau m_3 .



Figuer IV-4 : Mesure de la densité.

- a) échantillon préparés ; b,c) processus de mesure; d) eau distillée ; e) roche noire dans eau distillée ; f) voulum eau distillée

IV-1-3 Analyse par Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

IV-1-3-1 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Appareillage expérimental

Pour notre étude physicochimique des dépôts, nous avons utilisé la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) de marque (Bruker Tensor 27). Les mesures ont été effectuées de $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ avec une résolution de 4 cm^{-1} .

Ce spectromètre FTIR est composé principalement de (figure.IV-4):

- Source ;
- Interféromètre ;
- Détecteur ;
- Compartiment échantillon ;
- Laser ;
- Ordinateur.

Interféromètre Source

Laser

Détecteur

Echantillon

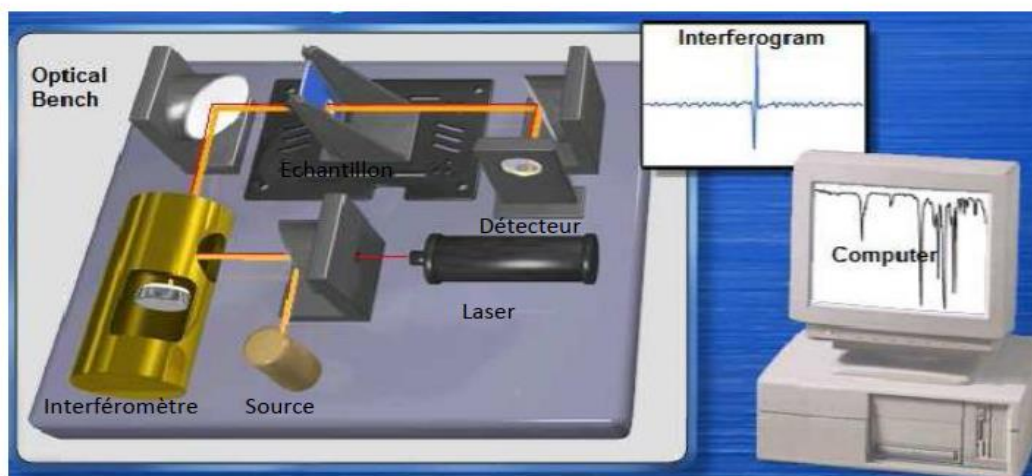


Figure IV-5 : Schéma de principe d'un spectromètre FTIR



Figure IV-6 : Appareil de FTIR

La source émet un faisceau infrarouge qui est réfléchi via un miroir et dirigé vers l'interféromètre où le codage spectral a lieu. A l'intérieur de l'interféromètre, la radiation de la source est immédiatement divisée en deux faisceaux par la séparatrice. Le premier faisceau (orienté vers un "miroir fixe") parcourt un chemin optique fixe tandis que le second un chemin optique de longueur variable (car orienté vers un "miroir mobile"), avant d'être recombinaisonnés. Cette configuration donne lieu à des interférences qui peuvent être constructives ou destructives. Ainsi, l'interféromètre permet de "scanner" toutes les fréquences du faisceau en sélectionnant une par une les longueurs d'ondes avec la résolution voulue. Ce faisceau modulé est ensuite réfléchi via un couple de miroirs et capté par un détecteur qui mesure l'intensité totale de la radiation infrarouge l'atteignant à travers toutes les fréquences et génère un "interférogramme de référence" appelé : "Background interferogram". Celui-ci enregistre l'intensité totale du rayonnement infrarouge atteignant le détecteur à chaque position du miroir mobile. L'intensité du rayonnement détecté à une position donnée le long de l'axe des X est indiquée par la hauteur (ou altitude) de la courbe à ce point.

Lorsque l'échantillon est placé, le faisceau infrarouge codé (ou modulé) interagit avec ce dernier où certaines fréquences peuvent être absorbées ou partiellement absorbées. Le détecteur enregistre l'intensité du signal à la sortie de l'échantillon en générant un "interférogramme de l'échantillon" appelé "Sample interferogram". En conséquence, le faisceau recueilli à la sortie de l'échantillon est différent de celui le heurtant à l'entrée. C'est comme si l'échantillon a laissé une "empreinte digitale" dans le faisceau infrarouge. Le laser permet le calibrage interne de l'instrument. L'ordinateur transforme les deux interférogrammes : de référence (Background interferogram) et de l'échantillon (Sample interferogram) produits par le banc optique en un spectre infrarouge.

Compte tenu de ce que fournit l'appareil FTIR et de ce dont nous avons besoin dans l'étude de l'échantillon (poudre de roche noire, d'argile), nous y avons effectué des analyses comme suit: nous avons mis la poudre des échantillons sur un cristal ATIR, que l'on appuie délicatement à la pince à épiler, où l'on obtient un spectre qui apparaît sous forme de vibrations. Chacun

d'eux représente un complexe de matériaux organiques dont les résultats sont analysés à l'aide du logiciel Origin

IV-1-4 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

IV-1-4-1 LE PRINCIPE DE DIFFRACTION DES RAYONS X :

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des agrégations de plans de réseau plus ou moins denses. Les plans contiennent des atomes (Fig. IV-7) : Certains plans contiennent beaucoup plus d'atomes que d'autres selon la formule chimique du minéral. Ces plans de réseau sont séparés par des distances (d) distinctes selon la nature du cristal ou du minéral. Avec un rayonnement d'une longueur d'onde suffisamment petite, des aberrations peuvent être obtenues au moyen de plans rétinéens (de la même manière que les rayons lumineux sont déviés par de petites ouvertures de la rétine en optique). L'intensité de cette biréfringence augmente car le niveau est « dense », c'est-à-dire riche en atomes [88].

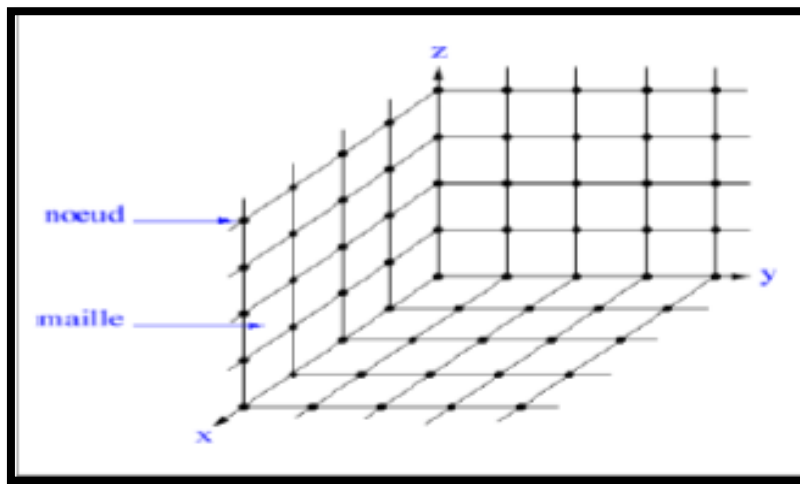


Figure IV-7: Organisation tri - périodique d'un cristal.

La diffraction des rayons X sur monocristal est utilisée pour étudier les structures cristallines, et la diffraction sur poudre est principalement utilisée pour la détermination de phase. Il s'agit d'une méthode non destructive utilisée pour l'analyse qualitative et quantitative d'échantillons polycristallins.[89]

Grâce à ce qui est fourni par les rayons X pour étudier les structures cristallines qui fournissent une analyse qualitative et quantitative des échantillons (poudre de roche noire, argile), nous avons effectué des analyses de composition minérale et des analyses chimiques au niveau de la machine à rayons X dans la physique laboratoire de la Faculté des sciences des matériaux pour extraire les résultats et les analyser à l'aide du programme HighScore

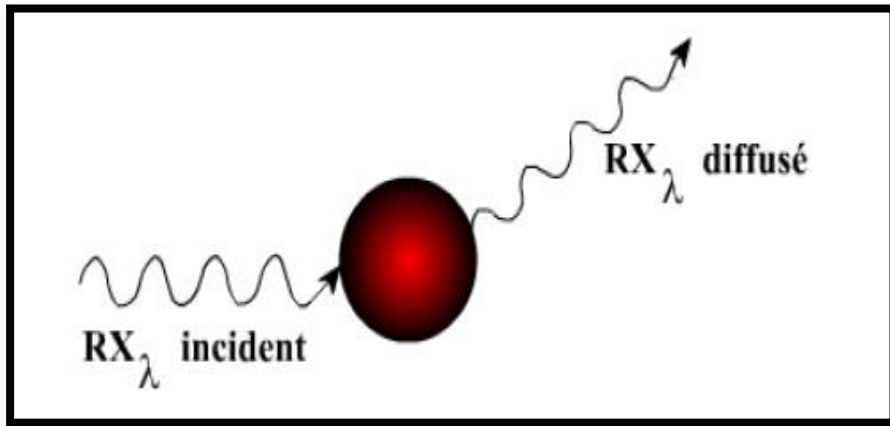


Figure IV.8 : Diffusion des rayons x et phénomène de diffraction.



Figure IV-9 : Appareille de mesure de la Diffraction des Rayons X (DRX)

Chapitre V:

Résultat et discussions

V-1- La Densité

Echantillons : Roche noir

Densité g/cm³ : $D = m/v$ $D = 39.94/20$

D : la densité

M : masse échantillon

V : volume eau distillée

$$D=1.97 \text{ g/cm}^3$$

V-2- Analyse minéralogiques-FTIR

Le spectre d'absorption infrarouge de la roche noire et argile **Figure-V-(1-2)** . Nous montrons des échantillons du spectre FTIR. Le composant principal de nos échantillons peut être spécifié. Le **tableau :V- 2** résume les groupes fonctionnels présents à la roche noire et argile. Dans la gamme des nombres d'onde élevés.

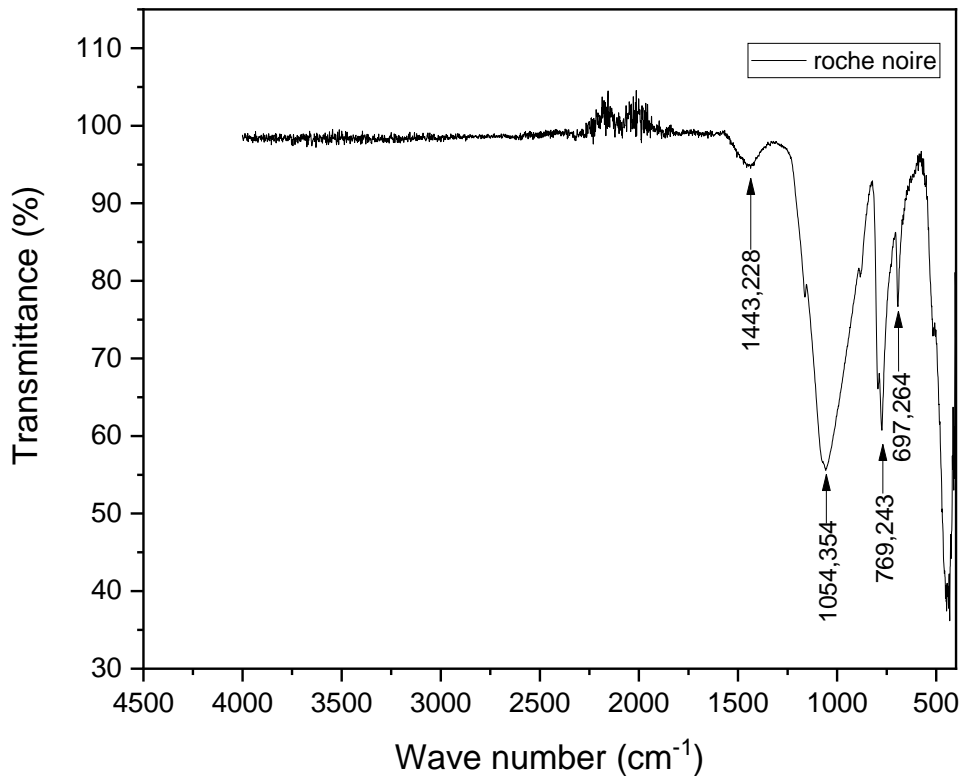


Figure-V-1 courbe FTIR de la roche noire l'échantillon (-0,08).

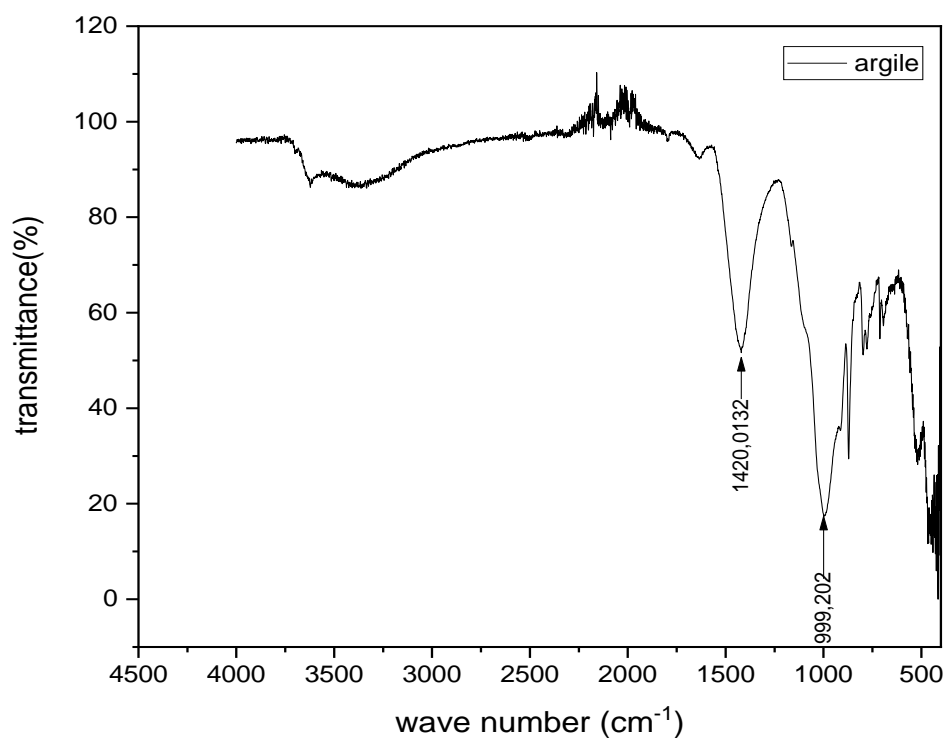


Figure-V-2 courbe FTIR de l'argile.

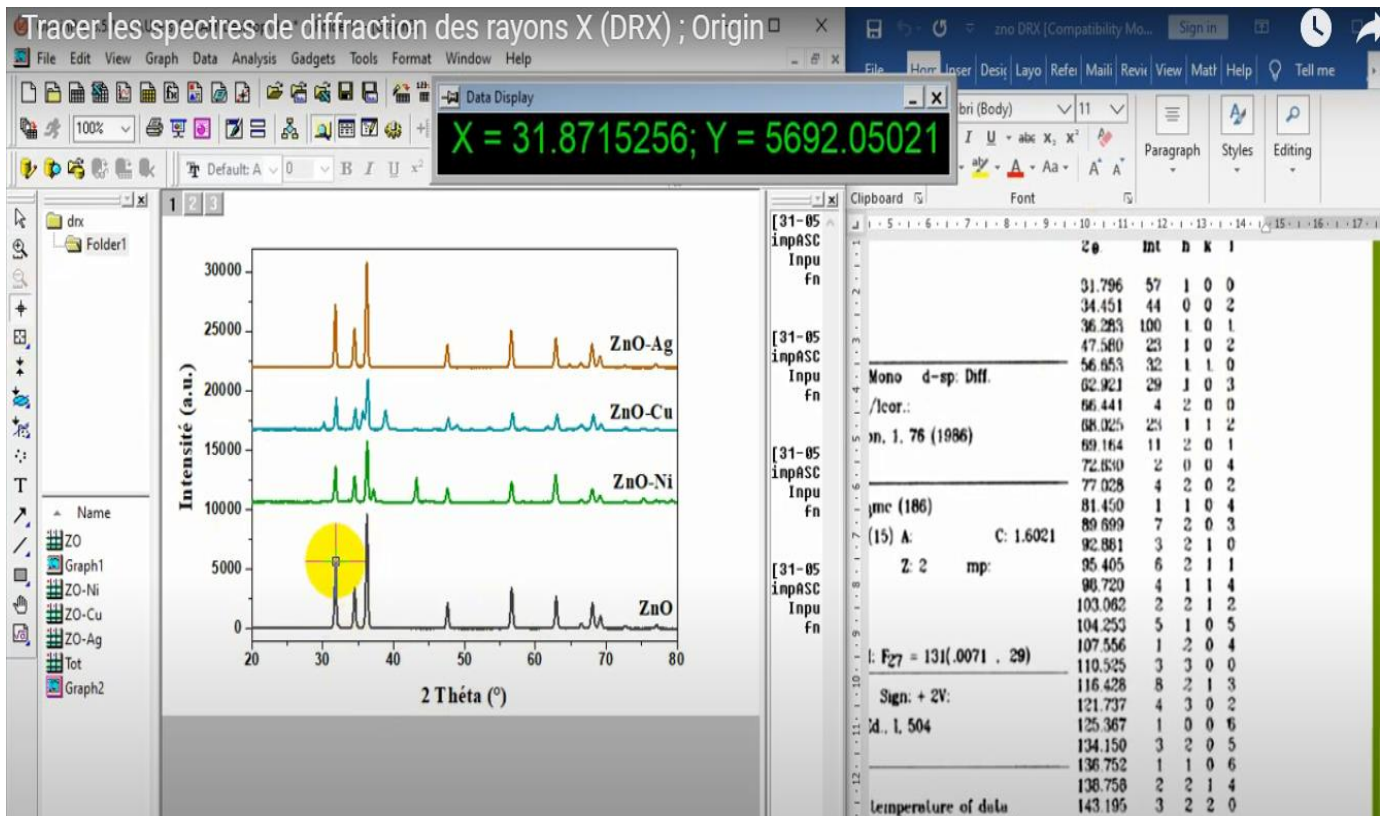
Tableau :V-1: Principales bandes infrarouges l'absorption et ses liaisons associées. [90]

Band(cm^{-1})	Bond(Vibrationmode)	Compound
3429	H-O-H(stretchingvibration)	Water
2924	C-H(stretchingvibration)	OrganicCarbon
2855	C-H(stretchingvibration)	OrganicCarbon
2511	$(\text{CO}_3)^{-2}$ (asymmetricalstretchandsymmetricalstretching)	Calcite
1875		Quartz
1798	$(\text{CO}_3)^{-2}$ (planebendingandsymmetricalstretchingcombinationmode)	Calcite
1616	H-OH(stretching)	Water
1427	$(\text{CO}_3)^{-2}$ (asymmetricalstretching)	Calcite
1080	Si-O-Si(symmetricalstretching)	Quartz
876	$(\text{CO}_3)^{-2}$ (out-of-planebending)	Calcite
779	Si-O(symmetricalstretching)	Quartz
694	Si-O-Si(symmetricalbending)	Quartz
459	Si-O-Si(asymmetricalbending)	Quartz

V-3- Analyse minéralogiques-DRX

Après le traçage du graphe ci dessous de la variation de l'intensité des rayons X en fonction de la variation des angles théta du goniomètre ,donnés par le programme du diffractomètre (HighScore), on a commencé a faire l'identification des pics du diffraction du quartz en utilisant le fichier étalonné des valeur de chaque pic en comparant les angles 2théta expérimentales avec ceux théoriques et on va identifier facilement les plans hkl.

Exemple d'identification des valeurs de chaque plan réticulaire.



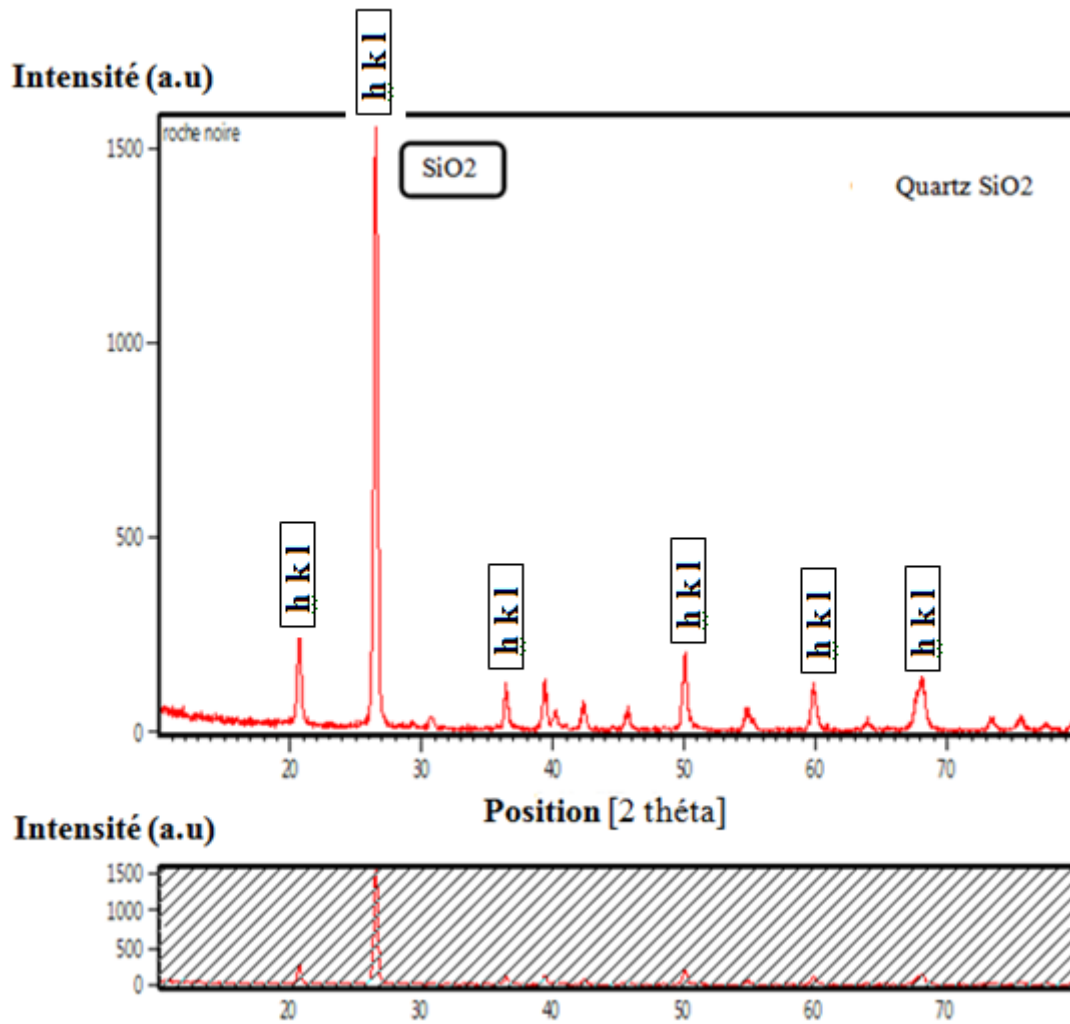


Figure-V-3 courbe DRX de la roche noire l'échantillon de classe (-0,08 mm).

Où : 1- $h k l$ plan réticulaire du goniomètre

2- (a.u) arb.units Traduit de l'anglais-En science et technologie, une unité arbitraire ou unité définie par la procédure est une unité de mesure relative indiquant le rapport entre la quantité de substance, l'intensité ou d'autres quantités et une mesure de référence prédéterminée.

La **Figure-V-3** montre que le quartz est caractérisé par des pics moins larges et plus intenses comparés aux autres éléments Cette différence est attribuée au désordre structural à longue distance dans notre échantillon de roche noire ainsi qu'à la présence de quelques défauts des structures . Le diagramme de la silice, est bien caractéristique.

Cette figure montre les diagrammes de diffraction de la poudre de cette roche caractérisée par l'intensité du rayon x reflétés par le silicium contenu dans cette dernière.

En effet, cette poudre est caractérisée par la présence de quelques éléments plus importants mais moins intenses que dans le quartz (voir le pic du quartz d'intensité 1500).

Dans ce cas, et même après l'augmentation de l'angle θ , on constate toujours la présence des phases de départ ce qui indique une transformation partielle du réseau SiO_2 . En revanche, on constate une transformation complète de la structure du réseau de la silice amorphe à chaque pas de l'angle θ .

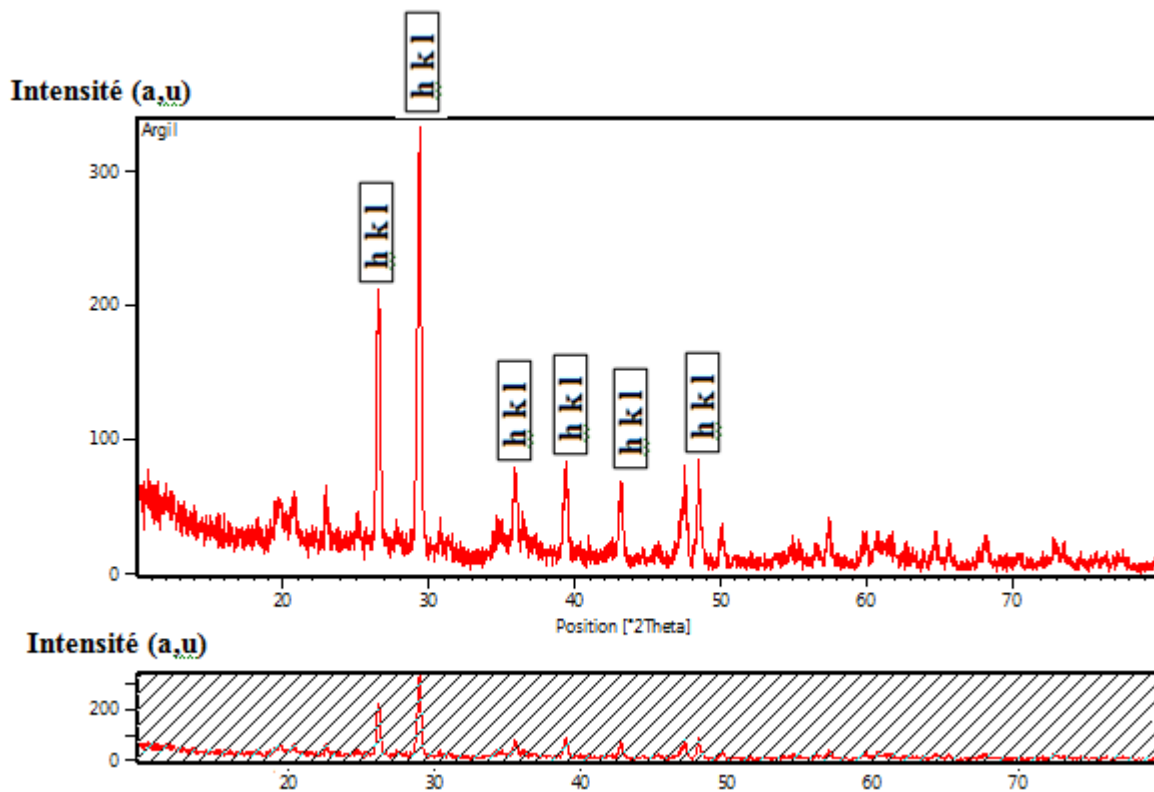


Figure-V-4 Courbe DRX de l'argile.

Pour la **Figure-V-4** les résultats présentés ci-dessus, montrent les faibles intensités des rayons X réfléchés par l'échantillon en poudre d'argile pour chaque angle θ d'inclinaison faite par le goniomètre du diffractomètre, et cela par rapport aux rayons réfléchés par les cristaux de la roche noire de comparaison. On peut donc conclure sur le lien étroit entre la cinétique de réaction et l'état structural du réseau de SiO_2 .

Composition minéralogique

Pour vérifier les analyses précédentes, nous avons demandé l'aide des laboratoires de cimenterie Lafarge M'sila Corporation, où les tests ont été effectués comme suit

1 composition minérale

2 analyses chimiques

Tableau V-2 : Analyse minéralogiques-DRX de roche noire

Analyse minéralogiques-DRX												
Les phases simples	Calcite	dolomite	sidérite	ankérite	magnésite	quartz	pyrite	illite	kaolinite	albite	anorthite	K-feldspar
Echantillons	1.09	3.23	0.13	0.57	0.12	90.73	0.05	1.22	1.94	0.59	0	0.34

Tableau V-3 : Analyses chimiques-FX de roche noire

Analyses chimiques-FX															
Code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	So ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	ZnO	SrO	Perte au feu
Echantillons	92.69	0.28	0.41	2.15	0.69	0.08	0.04	0.07	0.18	0.02	0.003	0.006	0.100	0.010	2.86

Tableau V-4 : Analyses chimiques argile

Analyses chimiques-FX															
Code	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	So ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	ZnO	SrO	Perte au feu
Echantillons	38.81	12.8	4.96	17.53	2.06	0.19	1.61	0.26	0.25	0.68	0.018	0.053	0.009	0.04	8.9

Conclusion générale

Conclusion général

De nombreux efforts de recherche ont été entrepris sur ce matériau silicium amorphe pour comprendre ses propriétés et d'élargir ses domaines d'application.

Le rôle essentiel de cet élément chimique c'est surtout son utilisation, dans la technologie des énergies renouvelables. Avant tous les avantages primaires, du silicium dans l'industrie c'est la possibilité de le déposer en couches minces sur de grandes surfaces avec un effet économique très haut par rapport à d'autres types de matériaux. Parallèlement au dopage, il y a la possibilité de changer le type de porteurs ainsi que l'ordre de grandeur de sa conductivité, qui nous a permis d'envisager de nombreuses applications concernant la réalisation de diverses structures électroniques

Dans ce mémoire on commencé par l'étude des propriétés et caractéristiques des produits initiaux du silicium qui est très abandonnée dans l'écorce terrestre qui est la silice, dont la teneur en silicium peut atteindre les 90% avant son traitement.

La comparaison de quelques types de silicate et de produits siliceux avec la DRX puis par infrarouge, après leur analyse granulométriques nous a aidé de comprendre l'importance de ce matériaux même, pour le changement des propriétés électrique et magnétiques des métaux et alliages

La technologie du dopage du silicium naturel a été développée très rapidement dans plusieurs pays industriels malgré les difficultés d'obtenir un silicium dopé, par exemple le dopage au bore en faibles concentrations est difficilement utilisé pour rendre le parfait et obtenir une conductivité minimale. Ce matériau est l'élément actif de nombreux dispositifs électroniques comme les cellules solaires, les photorécepteurs et les transistors en couches minces (TFT). Les dopages élevés sont nécessaires pour réaliser les structures pin ou pour obtenir des contacts ohmiques sur le matériau qualifié.

L'emploi de semi-conducteurs u silicium dopés doit atteindre des rendements à l'état de l'art. Ceci peut être assuré en évitant les dégradations engendrées pendant les opérations de dopage.

En conclusion, nous avons donné des explications sur le dopage et son contrôle pour les semi-conducteurs pour l'améliorer des performances de dispositifs électroniques organiques tels que les cellules photovoltaïque organique (OPV). Pour les futurs chercheurs maintenant on peut montrer l'utilité de cette technologie de dopage pour contribuer a une utilisation durable du silicium en abondance dans notre globe terrestre et pour optimiser le pouvoir énergétique de ce matériaux et voir l'intérêt de la communauté scientifique.

Références bibliographiques

- [1] T. Yanasigawa, T. Shimizu, K. Kuroda, C. Kato, *Bull. Chem. Soc. Jpn*, 1990, 63, 988.
- [2] J.S. Beck, J.C. Vartuli, W.J. Roth, M.E. Leonowicz, C.T. Kresge, K.D. Schmitt, C.T.W. Chu, D.H. Olson, E.W. Sheppard, S.B. McCullen, J.B. Higgins, J.L. Schlenker, *J. Am. Chem. Soc.*, 1992, 114, 10834.
- [3] K. S. W. Sing, D. H. Everett, R. A. W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquérol, T. Siemieniewska, *Pure Appl. Chem*, 1985, 57, 603.
- [4] P. Behrens, *Adv. Mater.*, 1993, 5, 127.
- [5] J.S. Beck, Brevet USA N° 5057296, 1991.
- [6] C.T. Kresge, M.E. Leonowicz, W.J. Roth, J.C. Vartuli, *Nature*, 1992, 359, 710.
- [7] C.T. Kresge, M.E. Leonowicz, W.J. Roth, J.C. Vartuli, Brevet USA N° 5102643, 1992.
- [8] Hoffmann, F.; Cornelius, M.; Morell, J.; Fróba, M. Silica-based mesoporous organic–inorganic hybrid materials. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2006, 45 (20), 3216–3251.
<https://doi.org/10.1002/anie.200503075>.
- [9] Q. Huo, D. Margolese, U. Ciesla, J. Feng, T. E. Gier, P. Sieger, R. Leon, P. M. Petroff, F. Schüth, G. D. Stucky, *Nature*, 1994, 368, 317.
- [10] Q. Huo, D.I. Margolese, U. Ciesla, D.G. Demuth, P. Feng, T.E. Gier, P. Sieger, A. Firouzi, B.F. Chmelka, F. Schüth, G.D. Stucky, *Chem.Mater.*, 1994, 6, 1176.
- [11] Q. Huo, D. I. Margolese, G. D. Stucky, *Chem. Mater.*, 1996, 8, 1147.
- [12] P. T. Tanev, T. J. Pinnavia, *Science*, 1995, 267, 865.
- [13] S. A. Bagshaw, T. J. Pinnavia, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 1996, 35, 1102.
- [14] Assaker, C. Synthèse et caractérisation de titanates mésoporeux organiques. *Thèse de doctorat*. 2014, université de Lorraine, 272.
- [15] D. Zhao, J. Feng, Q. Huo, N. Melosh, G. H. Fredrickson, B. F. Chmelka, G.D. Stucky. *Science*. 1998, 279, 548.
- [16] D. Zhao, Q. Huo, J. Feng, B. F. Chmelka, G. D. Stucky, *J. Am. Chem. Soc.* 1998, 120, 6024.
- [17] J-L Blin, A. Léonard, B-L. Su, *Chem. Mater.*, 2001, 13, 3542.
- [18] C. Yu, Y. Yu, D. Zhao, *Chem. Comm*, 2000, 575.
- [19] J. R. Matos, M. Kruk, L. P. Mercuri, M. Jaroniec, L. Zhao, T. Kamiyama, O. Terasaki, T. J. Pinnavaia, Y. J. Liu, *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, 125, 821.
- [20] J. C. Jansen, Z. Shan, L. Marchese, W. Zhou, N. von der Pul, T. Maschmeyer, *Chem. Commun.* 2001, 713.
- [21] Y. Wan, D. Zhao, *Chem. Rev.*, 2007, 107, 2821
- [22] <http://www.chemistry.manchester.ac.uk/groups/cnm/images/banner.jpg>
- [23] O.C. Gobin, SBA-16 Materials: Synthesis, Diffusion and Sorption properties. Laval University. 2006

- [24] Roy, P. K.; Ullas, A. V.; Chaudhary, S.; Mangla, V.; Sharma, P.; Kumar, D.; Rajagopal, C. Effect of SBA-15 on the energy absorption characteristics of epoxy resin for blast mitigation applications. *Iran Polym J.* 2013, 22 (9), 709–719. <https://doi.org/10.1007/s13726-013-0169-8>.
- [25] Cao, L.; Chi, H.; Hao, Y.; Wang, J. Preparation of mesoporous SBA-15/Polymer-copper (II) composites in supercritical CO₂ and their multiple applications. *Polym. Compos.* 2019, 40 (2), 823–831. <https://doi.org/10.1002/pc.24741>.
- [26] Beck, J. S.; Vartuli, J. C.; Roth, W. J.; Leonowicz, M. E.; Kresge, C. T.; Schmitt, K.D.; Chu, C. T. W.; Olson, D. H.; Sheppard, E. W.; McCullen, S. B.; Higgins, J. B.; Schlenker, J.L. A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates. *J. Am. Chem. Soc.* 1992, 114 (27), 10834–10843. <https://doi.org/10.1021/ja00053a020>.
- [27] Kresge, C. T.; Leonowicz, M. E.; Roth, W. J.; Vartuli, J. C.; Beck, J. S. Ordered mesoporous molecular sieves synthesized by a liquid-crystal template mechanism. *Nature.* 1992, 359 (6397), 710–712. <https://doi.org/10.1038/359710a0>.
- [28] öye, G.; Sjoblom, J.; Stocker, M. Synthesis, characterization and potential applications of new materials in the mesoporous range. *Adv Collo. interf. Sci.* 2001, 90, 439- 466. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00066-X](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00066-X).
- [29] Bennaceur K. CO₂ capture and storage - a solution within. *Oilfield Review* 16, 44-61 (2004).
- [30] Boschel, D., Janich, M. & Roggendorf, H. Size distribution of colloidal silica in sodium silicate solutions investigated by dynamic light scattering and viscosity measurements. *Journal of Colloid and Interface Science* 267, 360-368 (2003).
- [31] E. Bugnicour, « Development of sub-micro structured composites based on an epoxy matrix and pyrogenic silica », Thèse L'Institut National Des Sciences Appliquées, Lyon: INSA de Lyon, pp55-60, 2005
- [32] J.N. Paquien, « Étude des propriétés rhéologiques et de l'état de dispersion de suspensions PDMS/Silice », Thèse doctorat, Lyon: INSA de Lyon, p 279, 2003.
- [33] M. GÜNTHER, F. HORST, « Principes fondamentaux de l'Aerosil », *Tech. Bull, Pigments*, Vol.11, pp79, 1992.
- [34] S.C. Jana, S. Jain, « Dispersion of nanofillers in high performance polymers using reactive solvents as processing aids », *J. Polym*, Vol.42, pp 6897-6905, 2001.
- [35] John R. Brown. *Foseco ferrous foundryman's handbook*. Includes index. ISBN 0 7506 4284 X 1 Founding Library of Congress Cataloguing in Publication Data
- [36] Library of Congress Cataloguing in Publication Data *Foseco ferrous foundryman's handbook/revised and edited by John R. Brown*. p. cm. Includes index. ISBN 0 7506 4284 X 1 Founding

- [37]Lapoujade P. & Le Mat, Y. (1986) *Traité pratique sur l'utilisation des produits réfractaires*.
Edition, H.Vial-91410 Dourdan, 239 p.
- [38]Routschka G. (2004) *Refractory materials*. 2nd Edition, Vulkan-Verlag Essen, 512 p.
- [39]Haussonne J.M., Carry. C., Bowen P. & Barton J. (2005) *Traité des matériaux, Tome 16, céramiques et verres, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*. 1^e Ed.
- [40] **BOURAS, O.**, (2003), Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles : synthèse et caractérisation, Thèse de Doctorat., Université de Limoges, 162p.
- [41] J.A. Eisele, D.J. Bauer, D.E. Shanks Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 22 (1983), pp. 105-110
- [42] S.F. Hulbert, D.E. Huff Clay Miner., 8 (1970), p. 337
- [43] A.A. Al-Zahrani Eng. Sci., 15 (2004)
- [44] A.A. Al-Zahrani, M.H. Abdul-Majid JKAU: Eng. Sci., 20 (2009), pp. 29-41
- [45] A.W.A. Al-Ajeel, S.I. Al-Sindy Iraqi Bull. Geol. Min., 2.1 (2006), pp. 67-76
- [46]D.J. O'Connor Alumina Extraction from Non Bauxitic Materials Aluminium-Verlag (1988)
- [47] C.V. Phillips, K.J. Wills Hydrometallurgy, 9 (1982), pp. 15-28
- [48] S.Y. Gajam, S. Raghavan Miner. Proc. Inst. Min. Met. C, 94C (1985), pp. 115-120
- [49] Journal of Asian Ceramic Societies Volume 4, Issue 1, March 2016, Pages 91-96
Synthesis and characterization of silica nanoparticles from clay.
- [50] Fiberglass and Silica Textiles
- [51] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal
- [52] Boumiz, A., Vernet, C. & Tenoudji, F.C. Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages: Evolution with time and degree of hydration. Advanced Cement Based Materials 3, 94-106 (1996).
- [53] Photon International, "A highly coveted raw material", Jan. 2009, pp.136-141
- [54] Jugdaohsingh, R. (2007). [*Silicon and bone health*](#). J Nutr Health Aging, 11(2), pp. 99-110.
- [55] <https://soles-mundi.com/fr-fr/silicium-organique/definition/>
- [56] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dopage_\(semi-conducteur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dopage_(semi-conducteur))

[57] Diffusion_(1).png: Original uploader was Jkrieger at de.wikipedia derivative work: Cepheiden (talk) — Diffusion_(1).png

[58] © encrypted-tbn0.gstatic.com

[59] http://mayaksbor.ru/news/atomgrad/izotopnyy_bum_leningradskoy_aes/

[60] Lit.: Milvidsky M. G., Pelevin O. V., Sakharov B. A. Bases physiques et chimiques pour l'obtention de composés semi-conducteurs en décomposition. M., 1974; Dopage des semi-conducteurs par réactions nucléaires. Novosib., 1981; Gorelik S. S., Dashevsky M. Ya. Science des matériaux des semi-conducteurs et des diélectriques. 2e éd. M., 2003 ; Fistul VI Atomes de dopants dans les semi-conducteurs. M., 2004.

[61] <https://yandex.ru/video/preview/304965786501063666>

[62] <https://www.crystec.com/crysicf.htm>

[63] https://www.researchgate.net/publication/294086225_DOPAGE_AU_BORE_DU_SILICIUM_A_MORPHE_HYDROGENE_DEPOSE_PAR_PULVERISATION_DC_MAGNETRON

[64] KHELIFATI Nabil ;Dopage au bore du silicium amorphe hydrogène déposé par pulvérisation dc magnétron (U.S.T.H.B.) ALGER Faculté de physique, mémoire de magister ;2008.

[65] J.C. Bean. J. Electron. Mater., 19, 1055 (1990).

[66] Y. Shiraki. Abstracts 15 th Conf. Sol. St. Dev. and Mater.(Tokyo, 1983) p. 7.

[67] G.E. Becker, J.C. Bean. J. Appl. Phys., 48, 3395 (1977)

[68] S.S. Iyer, R.A. Metzger, F.G. Allen. J. Appl. Phys., 52, 5608(1981).

[69] J.A. Roth, C.L. Anderson. Appl. Phys. Lett., 31, 689 (1977).

[70] J.C. Bean, H.J. Leamy, J.M. Poate, G.A. Rozgonyi, T.T. Sheng, J.S. Williams. Appl. Phys. Lett., 33, 227 (1978).

[71] J.F. Nützel. J. Appl. Phys., 78, 937 (1995).

[72] V.G. Shengurov. Surface. Physique, Chimie, Mécanique, n° 44 (1994).

[73] MI Ovsianikov, R.G. Loginova, R.A. Roubtsov. Cristallographie, 15(6), 1261 (1970).

[74] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, 34, 519 (2000).

[75] M.V. Stepikhova, B.A. Andreev, V.B. Shmagin, Z.F. Krail'nik, V.P. Kuznetsov, V.G. Shengurov, S.P. Svetlov, W. Jantsch, L. Palmetschofer, H. Ellmer. Thin Sol. Films, № 369, 426(2000).

[76] Apelian D. Aluminum Cast Alloys, NADCA, 2009 / <https://aluminium-guide.com/>

[77] Abrasifs avancés du Henan 23 septembre 2022/<https://hsamaterial.com/>

[78] Jacques Amouroux, Daniel Morvan, “Le silicium photovoltaïque: enjeux techniques et financiers”, Colloque National Electricité Solaire Photovoltaïque, Aix-les-Bains, 20-22 mars 2007

[79] A. Braga, S. Moreira, P. Zampieri, J. Bacchin, et P. Mei, “New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 92, Apr. 2008, pp. 418-424

[80] www.carbonelorraine.com

[81] J. O. Odden, G. Halvorsen, H. Rong, R. Glockner, “Comparison of the energy consumption in different production processes for solar grade silicon”, Silicon for the Chemical and Solar Industry IX, Oslo, Norway, June 23-26, 2008

[82] www.photowatt.com

[83] André Claverie, “Electricité solaire photovoltaïque - Etat de l’art - Principes, applications, développements et programmes de promotion”, Ademe, Session Photon Réseau, Novembre 2007

[84] M.A. Green, “Photovoltaics: technology overview”, Energy Policy, vol. 28, Nov. 2000, pp. 989-998.

[85] A. Goetzberger et C. Hebling, “Photovoltaic materials, past, present, future”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 62, Avr. 2000, pp. 1-19.

[86] A. Labouret, M. Viloz, “Energie solaire photovoltaïque”, Dunod, 2006

[87] <https://siltax.ru/info/applications/meditsinskaya-otrasl/>

[88] Christophe. A, Erwann. J, Catherine. S, diffraction des rayons X, techniques et études des structures cristallines, école normale supérieure de Lyon, 2009.

[89] Serna.F, Lagneau. J, Carpentier. J. M, La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques, Centre de Recherches de l’Industrie Belge de la Céramique, 2014

[90] Nassima Meftah¹ & Mohammed Sadok Mahboub^{1,2} Received: 4 November 2018 / Accepted: 12 February 2019 # Springer Nature B.V. 2019

Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses

Résumé

Les avantages du silicium ont permis aux industries de se développer surtout celles des énergies renouvelables (l'énergie solaire) ; de l'électronique et sa possibilité de d' être déposé en couches minces sur de grandes surfaces avec un effet économique très élevé par rapport à d'autres types de matériaux. Dans ce mémoire, nous avons commencé à étudier les propriétés des produits primaires de silicium qui sont très abandonnés dans la l'écorce terrestre, qui est la silice, dont la teneur en silicium peut atteindre 90% avant son traitement.

Nous avons également présenté des explications sur le dopage et le réglage des semi-conducteurs pour améliorer les performances des dispositifs électroniques tels que le photovoltaïque. Pour les futurs chercheurs, c'est une contribution à porte ouverte pour les spécialistes en matériaux pour une utilisation durable de cette technologie de dopage du silicium qui est une richesse que Dieu nous a donné pour sa bonne exploitation dans notre monde et pour améliorer l'énergie de ce matériau et voir l'intérêt de la communauté scientifique.

abstract

The advantages of silicon have enabled industries to develop, especially those of renewable energies (solar energy); electronics and its possibility of being deposited in thin layers on large surfaces with a very high economic effect compared to other types of materials. In this thesis, we began to study the properties of the primary products of silicon which are very abandoned in the earth's crust, which is silica, whose silicon content can reach 90% before its treatment.

We have also presented explanations of doping and tuning of semiconductors to improve the performance of electronic devices such as photovoltaics. For future researchers, it is an open door contribution for materials specialists for a sustainable use of this silicon doping technology which is a wealth that God has given us for its good exploitation in our world and to improve the energy of this material and see the interest of the scientific community.

ملخص

مكّنتم ايا السيليكون الصناعات المتطورة، وخاصة الطاقات المتجددة (الطاقة الشمسية)؛ والإلكترونيات وإمكانية ترسيبها في طبقات رقيقة على أسطح كبيرة ذات تأثير اقتصادي مرتفع جداً مقارنة بمواد الأخرى. في هذا العمل، بدأنا بدراسة خصائص المنتجات الأولية للسيليكون التي يتم التخليق عنها كثيرًا في قشرة الأرض، وهي السيليكا، والتي يمكن أن يصل محتواها من السيليكون إلى 90% قبل معالجتها.

كما قدمنا تفسيرات بشأن تعاطي المنشطات وضبط أشباه الموصلات لتحسين أداء الأجهزة الإلكترونية ونية مثل الخلايا الكهروضوئية. بالنسبة للباحثين المستقبليين، فهذه مساهمة مفتوحة لأخصائيي المواد من أجل الاستعداد لتقنية منشطات السيليكون هذه، وهي ثروة أعطانا الله لاستغلالها الجيد في العلم وتحسين طاقة هذه المادة ورؤية الفائدة. من المجتمع