

Université Kasdi Merbah - OUARGLA
Faculté des Mathématiques et des Sciences de la
Matière Département de Physique
Thèse de Doctorat en 3^{ème} Cycle



Spécialité : Physique

Option : Physique des rayonnements et matière

Présentée par :

M^{lle} BENCHAA Sayhia

Intitulée

**Etude Physique et Structurale des Échantillons de Sable
Prises de la Région de Sidi Slimane et la Région de
Touggourt**

Soutenue publiquement le : **20 / 06 / 2023**

Devant le jury composé de :

Mr. BENTOUILA Omar	MCA	Président	Univ. Ouargla
Mr. GHERIANI Rachid	Professeur	Directeur de la thèse	Univ. Ouargla
Mr. ACHOURI Abderrahim	MCA	Co-Encadreur	Univ. Ouargla
Mr. LAKEL Saïd	Professeur	Examineur	Univ. Biskra
Mr. HACINI Massoud	Professeur	Examineur	Univ. Ouargla
Mr. SOUIGAT Abdelkader	MCA	Examineur	ENS. Ouargla

Année Universitaire: **2022-2023**

Dédicace

A l'esprit de mon père, la miséricorde de Dieu envers lui

A ma chère mère et mes frères

Abd El Wahab et Koureichi.

A mes sœurs Fatiha et Fatima.

Ma Nièce Inass

A mes neveux et nièces de mes sœurs

BENCHAA Sayhia

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce manuscrit a été réalisé au Laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS) à l'université Kasdi Merbah Ouargla.

En première temps, je remercie mon Dieu le tout-puissant de m'avoir donné la volonté de réaliser ce travail. Qu'il m'accorde plus de courage, de volonté et une bonne santé pour atteindre toutes mes ambitions.

Après Dieu, Je tiens à mes vifs remerciements sont adressés à mon directeur de thèse **Monsieur GHERIANI Rachid**, Professeur à l'Université Kasdi Merbah-Ouargla pour son encadrement, pour sa disponibilité et sa patience durant la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier le Co-encadreur **Mr. Achouri Abderrhim**, Maitre de conférences à l'Université Kasdi Merbah d'Ouargla, pour tous les précieux conseils et orientations qu'il a prodiguées tout au long de ce travail.

En deuxième temps, Je tiens à remercier infiniment tous les membres de jury;

Mr. BENTOUILA Omar; Maitre de conférence (A) à l'Université Kasdi Merbah-Ouargla, pour l'honneur qu'il m'a fait d'accepter de gérer le jury de ma thèse et **Mr. LAKEL Saïd**; Professeur à l'Université de Mohamed Khider-Biskra, **Mr. HACINI Massoud**; Professeur à l'Université de Kasdi Merbah-Ouargla et **Mr. SOUIGAT Abdelkader**; Maitre de conférence (A) à l'Ecole Normale Supérieure de Ouargla, pour l'acceptation de faire partie du jury comme examinateurs.

Je tiens également à remercier **Monsieur BOUKHLFA Hakim** directeur de Centre de Recherche Scientifique et Technique en analyses physicochimiques (CRAPC) Ouargla pour les analyses réalisés et l'équipe de travail.

Je tiens aussi à remercier les membres de l'Unité de Développement des Energies Renouvelables en Zones Arides (UDERZA), Université El-Oued, Algérie.

Mes profonds remerciements sont adressés sans doute à **Dr. BOUGOFFA Mohammed Seyf Eddine**, pour ses conseils motivants et ses encouragements et les idées offertes pour finaliser la rédaction de cette thèse. J'ai également été honoré de le connaître.

J'adresse ma plus profonde gratitude à tous mes collègues membres du laboratoire de rayonnement et Plasmas et physique des Surfaces (LRPPS) pour leurs

aides et leurs conseils en particulier [Mlle Khelef Nour](#).

Je remercie également tous mes autres collègues surtout à **A. benazzouz, I.**

Tidjani, H. HAMDI, T. Gouassmia, M. Brella et M. Touil. Finalement ; À toutes les

personnes qui m'ont aidée, soit de près soit de loin.

Sommaire

Dédicace	I
Remerciements	II
Sommaire	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Introduction générale	01
Références Bibliographique	06

Chapitre I : Revue bibliographique sur le sable & le sable des dunes

I. Sable et sables des dunes	10
I. 1. Sable	10
I. 1.1. Définition du sable	10
I. 1. 2. les composants principaux du sable	10
I. 1. 2. a) Quartz (SiO_2)	10
I. 1. 2. b) Feldspath (AlSi_3O_8)	11
I. 1. 2. c) Carbonate de Calcium (CaCO_3)	11
I. 1. 2. d) Gypse ($\text{CaSO}_4; 2\text{H}_2\text{O}$)	12
I. 1. 3. Les propriétés physiques du sable	12
I. 1. 3. 1. Selon la taille	12
I. 1. 3. 2. Selon la forme	13
I. 1. 3. 3. selon la couleur	13
I. 1. 4. La distribution du sable dans le monde et en Algérie	14
I. 1. 4. a) Le monde	14
I. 1. 4. b) L'Algérie	14
I. 1. 4. b-1) Le grand erg oriental	15
I. 1. 4. b-2) Le grand erg occidental	15
I. 1. 5. L'utilisation des sables	16
I. 2. Sable des dunes	17
I. 2. 1. Définition du sable des dunes	17
I. 2. 2. L'origine des sables des dunes	17

I. 2. 3. Types des dunes des sables	17
I. 2. 3. a) Situation géographique	17
I. 2. 3. a-1) Dunes côtières	17
I. 2. 3. a-2) Dunes du désert	18
I. 2. 3. b) Composition minéral	18
I. 2. 4. Différents formes des dunes	18
I. 2. 4. a) Dunes barkhane	18
I. 2. 4. b) Dunes étoiles	19
I. 2. 4. c) Dunes transversales	19
I. 2. 4. d) Dunes longitudinales	20
I. 3. Classification granulaires des sables	20
I. 3. a) Classifications granulaires	20
I. 3. b) Classifications approuvées	20
I. 3. c) Classification des sols sableux	22
I. 4. Quartz (SiO ₂)	23
I. 4. 1. Définition	23
I. 4. 2. Les propriétés physiques du quartz (SiO ₂)	23
I. 4. 3. La structure cristalline du quartz (SiO ₂)	24
I. 5. L'extraction de quartz à partir du sable	26
I. 6. L'extraction de silicium à partir du sable	27
I. 6. 1. Processus dans les fours	27
I. 6. 2. Silicium monocristallin par le procédé de Czochralski	29
I. 6. 3. Procédé de magnétothermique	30
I. 7. Quelque travail sur le sable et le sable des dunes	31
Références Bibliographique	35

Chapitre II : Préparation des échantillons & les techniques de caractérisation

II. 1. Situations géographiques des régions d'étude	42
II. 1. 1. Oued Righ	42
II. 1. 1. 1. Touggourt	42
II. 1. 1. 1. a) Zaouïa El-Abidia	42
II. 1. 1. 1. b) Sidi Slimane	43
II. 2. Techniques de prélèvement des échantillons	43

II. 3. Préparation des échantillons	44
II. 4. La diffraction des rayons X (DRX)	45
II. 4. 1. Principe	45
II. 4. 2. Géométrie de Bragg Brentano	47
II. 4. 3. Appareillage expérimentale	48
II. 4. 4. Préparation des échantillons	49
II. 5. Le logiciel X'Pert HighScore Plus	49
II. 5. 1. Principe	49
II. 5. 1. a) Base de données internationale de la diffraction	49
II. 5. 1. b) Méthode d'affinement Rietveld	50
II. 5. 1. c) Méthode du rapport d'intensité de référence	52
II. 5. 2. Les étapes de traitement des données de la diffraction des rayons en utilisant le logiciel (X'Pert HighScore Plus)	53
II. 6. La spectroscopie d'absorption infrarouge à transformation de Fourier (FTIR)	57
II. 6. 1. Principe	57
II. 6. 2. Les modes de vibration	58
II. 6. 3. Modèle du vibreur harmonique (modèle classique)	59
II. 7. 4. Description d'un spectromètre infrarouge à transformation de Fourier (FTIR)	60
II. 6. 5. Appareillage expérimentale	61
II. 6. 6. Préparation des échantillons	62
II. 7. Fluorescence des rayons X (XRF)	62
II. 7. 1. Principe	62
II. 7. 2. Description de l'analyseur XRF	63
II. 7. 3. Appareillage expérimentale	64
II. 7. 4. Préparation des échantillons	65
II. 7. 5. Analyse qualitative et analyse quantitative	66
II. 8. Microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)	66
II. 8. 1. Microscopie électronique à balayage (MEB)	66
II. 8. 1. 1. Principe	67
II. 8. 2. La spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)	68

II. 8. 2. 1. Principe	69
II. 8. 2. Appareillage expérimentale	69
II. 8. 3. Préparation des échantillons	70
II. 9. Distribution granulométrique par diffraction laser	70
II. 9. 1. Principe	71
II.9.1.1. La théorie de Mie	72
II. 9.2. Appareillage expérimentale	72
II. 9. 3. Préparation des échantillons	73
Références Bibliographique	74

Chapitre III : Résultats et discussion

III. 1. La discussion des résultats de diffraction des rayons X (DRX)	79
III. 1. 1. Identification des composants cristallins des sables	79
III. 1. 2. Interprétation des décalages des pics dans les diagrammes de DRX	82
III. 2. La spectroscopie d'absorption infrarouge à transformation de Fourier (FTIR)	86
III. 3. Fluorescence des rayons X (XRF)	90
III. 4. Microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS)	94
III. 4. 1. Microscopie électronique à balayage (MEB)	94
III. 4. 2. Analyse par la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)	96
III. 5. Distribution granulométrique par diffraction laser du sable étudiés	99
III.6. Certaines applications des sables selon la taille des grains et leur forme	104
Références Bibliographique	107
Conclusion générale	111

Annexe : les fiches ASTM (PDF)

Résumé

List des figures par chapitre

Chapitre I

Figure I. 1.	Classification qualitative de l'angularité.	13
Figure I. 2.	La répartition des sables dans le monde.	14
Figure I. 3.	La répartition des sables dans l'Algérie.	16
Figure I. 4.	Dunes barkhanes.	18
Figure I. 5.	Dunes étoiles.	19
Figure I. 6.	Dunes transversales.	19
Figure I. 7.	Dunes longitudinales.	20
Figure I. 8.	La structure cristalline du SiO ₄ .	25
Figure I. 9.	Structure cristalline du quartz.	25
Figure I. 10.	Four de production de silicium.	28
Figure I. 11.	Cycle de distillation du composé de silicium chloré.	29
Figure I. 12.	Méthode Czochralski pour la fabrication de Si monocristallin.	30

Chapitre II

Figure II. 1.	Localisation des origines des échantillons étudiées.	43
Figure II. 2.	Les échantillons prélevés avant la préparation: (A) le sable des dunes de la région de Zaouïa El Abidia (SDZ), (B) le sable des dunes de la région de Sidi Slimane (SDS), (C) le sable de construction de la région de Sidi Slimane (SCS).	44
Figure II. 3.	Figure présente la méthode des préparations d'échantillon avant les analyses.	44
Figure II. 4.	Représentation schématique les niveaux des réseaux.	46
Figure II. 5.	Principe de la loi de Bragg.	46
Figure II. 6.	La géométrie du montage de Bragg-Brentano.	48
Figure II. 7.	Appareil de DRX type Seifert.	48
Figure II. 8.	Préparation des échantillons pour DRX.	49

Figure II. 9.	La comparaison du diagramme calculé avec le diagramme expérimental selon la méthode de Rietveld.	50
Figure II. 10.	La recherche des pics.	54
Figure II. 11.	La détermination des pics.	55
Figure II. 12.	Exécutez la recherche et ajustez les paramètres si nécessaire.	55
Figure II. 13.	Déterminer les phases cristallines les mieux adaptées.	56
Figure II. 14.	Détermination de la concentration des phases cristallines.	56
Figure II. 15.	Modes d'élongation.	58
Figure II. 16.	Modes de flexion (bending).	59
Figure II. 17.	Modèle classique (l'oscillateur harmonique).	59
Figure II. 18.	Schéma de principe d'un spectromètre infrarouge à transformation de Fourier d'un interféromètre de Michelson.	61
Figure II. 19.	Photo de spectromètre infrarouge de type Shimadzu modèle IR Affinity ⁻¹ utilisé.	61
Figure II. 20.	Les outils utilisés dans la préparation des échantillons pour l'analyse.	62
Figure II. 21.	Figure représente le phénomène de XRF.	63
Figure II. 22.	L'appareil des fluorescences des rayons X utilisé.	64
Figure II. 23.	Photo d'équipement de broyage de la technique ED-XRF.	65
Figure II. 24.	Figure montre l'appareil de compression des échantillons et la méthode de compression.	65
Figure II. 25.	Représentation schématique des éléments de MEB.	67
Figure II. 26.	Illustration schématique de l'interaction entre le faisceau d'électrons et la surface de l'échantillon.	68
Figure II. 27.	Appareil MEB équipé d'un détecteur EDS utilisé pour l'analyse.	69
Figure II. 28.	Figure présenter la préparation des échantillons pour la caractérisation avec MEB-EDX.	70
Figure II. 29.	Schéma de la granulométrie laser (échantillon liquide).	71
Figure II. 30.	Photographie de l'appareil Partica LA-960 (HORIBA) qui utilisé dans l'analyse.	72
Figure II. 31.	Figure montre comment placer l'échantillon pour l'analyse.	73

Chapitre III

Figure III. 1.	Diagrammes de DRX des échantillons : SDZ , SDS et SCS .	80
Figure III. 2.	Résultats de FTIR des échantillons: SDZ , SDS et SCS .	86
Figure III. 3.	Micrographie MEB de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia.	95
Figure III. 4.	Micrographie MEB de sable des dunes de la région de Sidi Slimane.	95
Figure III. 5.	Micrographie MEB de sable de construction de la région de Sidi Slimane.	96
Figure III. 6.	Micrographies SEM combinées à l'analyse d'EDS des sables étudiés: (A) SDZ , (B) SDS et (C) SCS .	100
Figure III. 7.	Résultats de l'analyse granulométrique du sable des dunes de la région de Sidi Slimane (SDS).	99
Figure III. 8.	Résultat de l'analyse granulométrique du sable de construction de la région de Sidi Slimane (SCS).	101
Figure III. 9.	Résultats de l'analyse granulométrique du sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia (SDZ).	101

List des Tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1.	Classification des sables selon les tailles des grains.	12
Tableau I. 2.	Classification granulométrique des sols selon le département américain de l'agriculture et la société internationale des sciences du sol.	21
Tableau I. 3.	Classification de département américain de l'agriculture. (US Department of Agriculture).	21
Tableau I. 4.	Système de classification des sols du bureau américain (U.S bureau soil classification system).	22
Tableau I. 5.	Système de classification des sols de l'Institut de technologie du Massachusetts (M.I.T soil classification system).	22
Tableau I. 6.	Les groupes de sols sableux selon la classification descriptive.	23
Tableau I. 7.	Les propriétés les plus importantes du quartz.	24
Tableau I. 8.	Propriétés cristallines du quartz.	25
Tableau I. 9.	Le tableau résume quelques travaux menés sur le sable.	31

Chapitre III

Tableau III. 1.	Comparaison entre les pics de DRX de l'échantillon SDS et les fiches ASTM .	83
Tableau III. 2.	Comparaison entre les pics de DRX de l'échantillon SCS et les fiches ASTM .	84
Tableau III. 3.	Comparaison entre les pics de DRX de l'échantillon SDZ et les fiches ASTM .	85
Tableau III. 4.	Les bandes principales d'absorption et de vibration de liaison associées aux nos échantillons.	88
Tableau III. 5.	les résultats de l'analyse chimique des échantillons étudiés avec la technique ED-XRF.	90

Tableau III. 6.	les résultats du calcul des concentrations des différents éléments dans les échantillons étudiés ($\frac{mg}{kg} \equiv 10^{-4}\%$).	92
Tableau III. 7.	Concentration massiques et atomiques de la composition chimique des échantillons des sables étudiés.	97
Tableau III. 8.	Les résultants d'analyse granulométrique des sables étudiés.	103
Tableau III. 9.	Résultats de la classification granulométrique du sable avec leur pourcentage suivant les références [23, 34, 35].	102

Introduction Générale

Introduction générale

L'Algérie couvre une surface totale de 2. 381. 751 km², ce qui en fait le plus grand pays du continent africain [1]. Cette importante étendue du pays génère une variété de terrains et de géologie, elle possède d'énormes et longues chaînes des dunes de sable, riches en importantes réserves minérales qui peuvent être extraites [2].

Après l'air et l'eau, le sable est la ressource la plus utilisée au monde, sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents [3].

Le sable recouvre de vastes régions du monde dont le vent constitue l'agent transporteur ; la superficie est presque 5 millions de km² de la terre (6%) et la plupart des zones sablonneuses sont situées dans les déserts et le long des plages [4, 5].

Le Sahara algérien couvre une grande partie du Sahara africain puisqu'il représente près de 80 % de la superficie totale [6].

En raison de ses utilisations techniques étendues, actuellement l'étude du sable a une importance vitale [7]. Le sable est utilisé soit sous sa forme naturelle, soit après divers procédés de traitement [8], il est considéré comme un composant essentiel des matériaux de construction [9, 10], il est utilisé aussi dans la filtration de l'eau [11]. En outre, le sable étant riche en quartz (dioxyde de silicium SiO₂), il est utilisé dans les industries du verre à la base de développement de diverses technologies précises, particulièrement dans les laboratoires car il résiste à des températures supérieures à 1600 °C et à un grand écart l'énergie qui dépasse 8 eV permettant ainsi de bonnes propriétés d'isolation électrique. Il dispose également d'une très grande fenêtre de transparence, allant de l'ultraviolet au visible et à l'infrarouge, ce qui en fait une bonne utilisation dans les mesures spectrales dans ce domaine. En plus, l'extraction du silicium pur constitue un moyen dans les recherches électronique, optique, des semi-conducteurs et des nano industries [12-14].

Le sable est défini comme un matériau granulaire constitué de petites particules issues de la désagrégation des matériaux d'origine minérale (principalement des roches) ou organique dont la taille varie entre 0.063 à 2 mm [15]. Il peut également acquérir sa

couleur à partir des couleurs de ses composants, par exemple le rouge clair et le noir comme il a été trouvé dans des travaux précédents [16].

La plupart des sables et des sédiments sont constituée de quartz (SiO_2) et de feldspaths (AlSi_3O_8) dont l'abondance est très importante dans la croûte terrestre. Le sable contient également des carbonates de calcium (CaCO_3), du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ainsi qu'une quantité non négligeable de trioxyde de fer (Fe_2O_3) et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) [1, 17] et de petites quantités d'impureté et de métaux lourds.

Ces dernières années, l'Algérie a entrepris d'énormes projets d'exploitation de l'énergie solaire (construction de centrales électriques, production de panneaux de silicium, etc.) [18]. Par conséquent, il était très utile d'exploiter le sable du désert qui constitue une source naturelle libre et locale de quartz (SiO_2) afin de fabriquer du verre et du quartz à partir duquel les cellules solaires sont obtenues [19].

Les dunes de sable du désert algérien couvrent une superficie d'un demi-million de km^2 , près d'un quart de la surface de l'Algérie [20]. Ces dunes sont présentes sous forme d'ergs, les plus importants sont le grand erg occidental, le grand erg oriental, l'erg Chèche et Iguidi [21].

De nombreuses études ont été réalisées sur le sable, mais la plupart d'entre elles traitaient le sable en termes de filtration de l'eau [11, 22], d'agriculture et de construction [9, 23]. Seuls quelques travaux ont porté sur la caractérisation du sable [1, 12, 24, 25].

De nombreuses recherches ont été menées sur des sables provenant de différentes régions du monde. Murthy I N et al. (2016) [26] ont étudié les propriétés physiques et chimiques du sable à haute teneur en silice, du laitier Fe-Cr et du laitier de haut fourneau pour des applications de fonderie. Ali et al. (2013) [22] ont exploré la morphologie, la minéralogie, la géochimie et la provenance des dunes de sable en Arabie saoudite. La caractérisation géologique et physico-chimique des sables de construction au Qatar a été réalisée par Marwa et al. (2012) [27]. L'origine du sable, les différences de couleur et les voies de transport des dunes de sable ont été étudiées également par Mohammed et Osman (2016) [28]. Certaines études ont évalué les occurrences du sable quartzueux de la région de Santa Maria Eterna (nord-est du Brésil) comme source potentielle de matière première pour la production de verre de silice (Dos

Santos et Fujiwara, 2015) [29]. Une autre étude a caractérisé le sable du désert des Émirats arabes unis qui pourrait être utilisé comme support de stockage d'énergie thermique dans la technologie des récepteurs solaires à particules (Miguel et Alberto, 2018) [30].

En Algérie, plusieurs études ont porté sur le sable et principalement sur celui des dunes des régions sahariennes. L'étude réalisée par Sabiha Anas et al. (2020) [2] se proposait de déterminer les différents paramètres texturaux et les propriétés chimiques et physiques du sable de la région de Zemmouri (Algérie) à exploiter dans le domaine industriel. La XRF a révélé que le sable de Zemmouri était caractérisé par une très grande pureté (99.3% de silice), les observations au microscope optique ont permis de déterminer les différentes formes des grains de sable (allongée, arrondie et anguleuse).

L'effet des traitements thermiques sur la composition du sable des dunes de la région de Ouargla (Algérie) a été étudié à l'aide de XRD et FTIR (Mohammed et Ismail, 2017) [13] ; par ailleurs, la classification chromatique de ce même sable a fait l'objet d'une détermination des principales compositions et causes de couleur en utilisant XRD, FTIR et XRF (Naouia et al. 2016) [12]. Récemment, la caractérisation spectroscopique des minéraux des dunes de sable d'El-Oued (Nord-Est du Sahara algérien) a été réalisée à travers des analyses FTIR, XRF et XRD (Nassima et Mohammed Sadok 2019) [24]. Zouaouid et al. (2019) [31] ont effectué une analyse minéralogique d'échantillons de roses de sables et de sable des dunes de deux régions différentes du sud de l'Algérie. Sabiha Anas et al. (2020) [32] ont exploité le sable siliceux de l'extrême est algérien (Tébessa) dans le projet de production de silicium métal pour des applications photovoltaïques; les chercheurs ont étudié et caractérisé ce sable à l'aide de la technique XRF, d'observations au microscope, d'analyses de densité, de granulométrie et de XRD. Enfin, Khouloud et Ismail (2020) [33] ont exposé une étude sur le raffinement de Rietveld basé sur l'analyse quantitative de phase (QPA) du sable de la dune d'Ouargla.

A la lumière de cette revue bibliographique, nos travaux de recherche à travers cette thèse ont pour objectif l'étude comparative de deux types de sable : celui de sable des dunes des régions de Zaouïa El-Abidia et Sidi Slimane d'une part et d'autre part le sable de construction de la région de Sidi Slimane. Ce travail de recherche vise essentiellement une valorisation des ressources naturelles fortes abondantes au sud algérien.

Cette thèse s'articule principalement autour de trois chapitres:

Le premier chapitre est consacré aux revues bibliographiques sur le sable et le sable des dunes.

Le deuxième chapitre est dédié à la description générale de la méthode de la collection, la préparation des échantillons et des différentes techniques d'analyse mises en œuvre lors de cette étude. Il s'agit de la diffraction des rayons X (DRX) pour étudier les propriétés structurales, la spectroscopie d'absorption infrarouge à transformation Fourier (FTIR) afin d'identifier les bandes chimiques des composés moléculaires organiques, inorganiques, cristallins ou amorphes (la liaison chimique dans un matériau), déterminer la pureté et la nature des matériaux. La fluorescence X (XRF) pour déterminer sa composition élémentaire et le microscope électronique à balayage (MEB) pour l'observation morphologique de surface, l'EDS couplé avec le MEB permet la détermination des compositions chimiques élémentaires et la distribution des éléments chimiques sur une zone dans l'échantillon analysé (plage).

Dans le troisième chapitre, nous regroupons et discutons les résultats expérimentaux obtenus relatifs aux échantillons étudiés.

Enfin, une conclusion générale qui permettent de résumer les résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives.

Références Bibliographies

- [1] Beddiaf, S., Chihi, S., Leghrieb, Y. (2015). The determination of some crystallographic parameters of quartz, in the sand dunes of Ouargla, Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, **106**, 129-133.
- [2] Boussaa Anas, S. (2020). Study of Algerian sand from Zemmouri deposits. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, 1-8.
- [3] Boudlal, O. (2013). Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations (thèse de doctorat).
- [4] Parsons, A. J., Abrahams, A. D. (2009). *Geomorphology of desert environments*. Springer Netherlands, 3-7.
- [5] Kavulich Jr, M. J. (2008). *The Physics of Sand Dune Formation and Migration on Mars* (thèse de doctorat).
- [6] Benchaa, S., Gheriani, R., Achouri, A., Bouguettaia, H., Mechri, M. L. (2021). Structural characterizations of dune sand and construction sand of Sidi Slimane and Zaouia El Abidia areas in the Touggourt region in southeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 1-11.
- [7] Bendida, A., Tidjani, A. E. B., Badri, A., Kendouci, M. A., Nabou, M. (2013). Treatment of domestic wastewater from the town of Bechar by a sand filter (sand of Beni Abbes Bechar Algeria). *Energy Procedia*, **36**, 825-833.
- [8] Hashim, U., Ehsan, A. A., Ahmad, I. (2007). High purity polycrystalline silicon growth and characterization. *Chiang Mai J Sci*, **34** (1), 47-53.
- [9] Leghrieb, Y., Mitiche, R., Bentebba, M. T., Djouhri, M., Kriker, A. (2012). The manufacture of raw brick from the Saharan sand-based mortar of Ouargla (located in the Septentrional Sahara, Algeria) for use in Arid Regions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **37**, 2149-2161.
- [10] Guettala, S., Mezghiche, B., Mellas, M. (2010). Adding finely crushed dune sand to cement on the evolution of hydration of pastaportl and cement.
- [11] Haig, S. J., Quince, C., Davies, R. L., Dorea, C. C., Collins, G. (2014). Replicating the microbial community and water quality performance of full-scale slow sand filters in laboratory-scale filters. *Water research*, **61**, 141-151.
- [12] Mahdadi, N., Chihi, S., Bouguettaia, H., Beddiaf, S., Mechri, M. L. (2017). Chromatic classification of Ouargla (Algeria) dunes sand: determination of main compositions and color causes, by using XRD, FTIR and XRF. *Silicon*, **9** (2), 211-221.

- [13] Mechri, M. L., Chihi, S., Mahdadi, N., Beddiaf, S. (2017). Study of heat effect on the composition of dunes sand of Ouargla (Algeria) using XRD and FTIR. *Silicon*, **9** (6), 933-941.
- [14] Platias, S., Vatalis, K. I., Charalampides, G. (2014). Suitability of quartz sands for different industrial applications. *Procedia Economics and Finance*, **14**, 491-498.
- [15] Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R. (2012). *Sand and sandstone*. Springer Science - Business Media.
- [16] Jallad, K. N., Espada-Jallad, C. (2008). Spectroscopic characterization of geological materials from the United Arab Emirates. *Arabian Journal of Geosciences*, **1**, 119-127.
- [17] Sivakumar, S., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Jebakumar, J. P. P. (2013). FT-IR Spectroscopic studies on coastal sediment samples from nagapattinum district, Tamilnadu, India. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, **3** (4), 366.
- [18] Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **109**, 532-550.
- [19] Anas Boussaa, S., Kheloufi, A., Boutarek Zaourar, N., Kerkar, F. (2016). Valorization of Algerian sand for photovoltaic application. *Acta Physica Polonica A*, **130** (1), 133-137.
- [20] Mechri, M. L., Chihi, S. (2014). Effect of heat on the crystalline phases in sand dunes of Ouargla region. *Ann Sci Technol*, **6** (2), 172-177.
- [21] Maazouzi A., Kettab A., Badri A., Zahraoui B., Khelfaoui R. (2014). Algerian Sahara sand dunes characterization. *Silicon*, **6** (3):149- 154.
- [22] Wahid, F. R. A. A., Saleh, S., Samad, N. A. F. A. (2017). Estimation of higher heating value of torrefied palm oil wastes from proximate analysis. *Energy Procedia*, **138**, 307-312.
- [23] Tafraoui, A., Lebaili, S., Slimani, A. (2006). Study physico-chemical of the sand of the Western Erg of the area of Saoura (Western South Algeria). *Research J. of Applied Sciences*, **1** (1-4), 1-6.
- [24] Meftah, N., Mahboub, M. S. (2020). Spectroscopic characterizations of sand dunes minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD analyses. *Silicon*, **12** (1), 147-153.
- [25] Amiri, K., Bekkari, N., Débbakh, A., Benmalek, A., Bouchahm, N. (2017).

Caractérisation des eaux usées des rejets domestiques de la ville de Touggourt (Algérie). *J. Algér. Rég. Arid*, **14**, 104-108.

[26] Murthy, I. N., Rao, J. B. (2016). Investigations on physical and chemical properties of high silica sand, Fe-Cr slag and blast furnace slag for foundry applications. *Procedia Environmental Sciences*, **35**, 583-596.

[27] Al-Ansary, M., Pöppelreiter, M. C., Al-Jabry, A., Iyengar, S. R. (2012). Geological and physiochemical characterisation of construction sands in Qatar. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **1 (1)**, 64-84.

[28] Benaafi, M., Abdullatif, O. (2015). Sedimentological, mineralogical, and geochemical characterization of sand dunes in Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 11073-11092.

[29] Dos Santos, M. F. M., Fujiwara, E., Schenkel, E. A., Enzweiler, J., Suzuki, C. K. (2015). Quartz sand resources in the Santa Maria Eterna formation, Bahia, Brazil: A geochemical and morphological study. *Journal of South American Earth Sciences*, **62**, 176-185.

[30] Li, X., Li, W., Zhang, R., Jiang, T., Chen, H., Li, G. (2020). Collaborative scheduling and flexibility assessment of integrated electricity and district heating systems utilizing thermal inertia of district heating network and aggregated buildings. *Applied Energy*, **258**, 114021.

[31] Zouaouid, K., Gheriani, R. (2019). Mineralogical analysis of sand roses and sand dunes samples from two regions of South Algeria. *Silicon*, **11 (3)**, 1537-1545.

[32] Anas Boussaa, S., Zaourar Boutarek, N., Kefai, A. (2020). Characterization and experimental design application for Algerian silica sand enrichment. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, 1-10.

[33] Hadjadj, K., Chihi, S. (2020). Rietveld refinement based quantitative phase analysis (QPA) of Ouargla (part of grand erg oriental in Algeria) dunes sand. *Silicon*, 1-9.

Chapitre I

Revue bibliographique sur le sable
& le sable des dunes

Le sable est une ressource naturelle très importante qui peut être exploitée dans divers domaines. Il est une matière première sur laquelle s'appuient certaines industries qui l'utilisent, soit sous sa forme naturelle directement ou bien après le traitement avec des différentes techniques. Pour cela le premier chapitre de cette thèse a été sous le titre "Revue bibliographique sur le sable & le sable des dunes".

I. Sable et sable des dunes

I. 1. Sable

I. 1. 1. Définition du sable

Le sable est défini comme un matériau naturel, granulaire constitué de petits éléments dont la dimension est comprise entre (0.063 et 2mm) [1].

Une particule individuelle est appelée grain de sable, le terme sable recouvre deux aspects :

- Un aspect granulométrique (taille des grains).
- Un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains).

I. 1. 2. Les composants principaux du sable

La composition du sable peut révéler d'environ 180 minéraux différents [2]. Les principaux constituants sont le quartz (SiO_2), le carbonate de calcium (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), les feldspaths (AlSi_3O_8) ainsi qu'une quantité moyenne de trioxyde de fer (Fe_2O_3) et une plus grande quantité d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Ce qui suit est une déclaration de chaque composant [2, 3]:

a) Quartz (SiO_2)

Le quartz est l'une des matières les plus abondantes de la croûte terrestre après le feldspath, qui est constitué de dioxyde de silicium donnant la formule chimique SiO_2 avec une structure cristalline hexagonale.

Il a plusieurs couleurs telles que le blanc, le violet, le rouge, le noir, le transparent et le bleu en raison de la différence de structure du réseau, des types et des pourcentages d'impuretés. De plus il se caractérise par paillettes de verre [4].

Il peut être classifié en deux formes (la forme α et la forme β). La forme α est beaucoup plus commune puisqu'elle est stable à température au-dessous de 573°C ; la forme β , polymorphe stable à partir de 573°C .

La silice utilisé dans des diverses applications telles que la fabrication des verres, les fonderies, les céramiques et même pour la fabrication des cellules photovoltaïques [5].

b) Feldspath (AlSi_3O_8)

Les feldspaths constituent un groupe minéral abondant et représentent presque 60 % de la croûte terrestre, qui sont des ensembles de deux, quatre ou six molécules de silice liées avec une molécule d'alumine et un oxyde de métal alcalin comme le potassium, le sodium, le calcium ou le lithium. Ils ne sont pas très colorés, à l'exception des impuretés. Le feldspath est un matériau de base, a trois formules chimiques (KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) [6].

Il est utilisé pour fabriquer du verre, qui améliore les propriétés mécaniques et la résistance aux chocs thermiques de ce dernier, la céramique, les carreaux pour murs, sols et les matériaux sanitaires. Il est utilisé également pour produire les glaçures, les émaux, la porcelaine, pour traiter les eaux métallifères en particulier le plomb et les autres métaux lourds [7].

c) Carbonate de Calcium (CaCO_3)

Le carbonate de calcium est le composé le plus répandu dans les précipités minéraux d'origine biologique [8] dont la formule chimique CaCO_3 , qui cristallise dans le système cristallin trigonal à réseau rhomboédrique et dans une palette infinie de cristaux. En général sa couleur est blanc ou incolore [9]. Les poudres de carbonate de calcium sont un peu coûteuses.

Il peut être largement utilisé tel que la fabrication du papier, les plastiques, les encres d'imprimerie, les cosmétiques, les dentifrices et l'industrie agro-alimentaire [10].

d) Gypse ($\text{CaSO}_4 ; 2\text{H}_2\text{O}$)

Le gypse est le minéral sulfaté le plus important et le plus répandu dans la nature; il existe dans les zones volcaniques, les roches sédimentaires et la plupart des types

d'argile [4], qui composé de sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 ; 2 \text{H}_2\text{O}$).

Il cristallise dans le système cristallin monoclinique [11, 12]. Sa couleur est variable noire, jaune ou verte à cause d'impuretés, souvent blanc à semi-transparent.

Le gypse peut être utilisé pour la fabrication du plâtre, la sculpture, la décoration, la céramique, le traitement dentaire, matériaux de construction par exemple la fabrication de peintures, les plaques pour le polissage et le lissage des feuilles de verre [4].

I. 1. 3. Les propriétés physiques du sable

Le sable a des caractéristiques différentes en fonction des roches sources, des agents d'altération physique ou chimique et de leur transport par le vent ou l'eau.

I. 1.3. 1. Selon la taille

La taille des grains est un paramètre très variable, qui dépend notamment des lieux de dragage. Avec l'augmentation des tailles des grains, on distingue les argiles (clay), les limons (silt), les sables (sand) et le gravier (gravel).

Dans les classifications géologiques, les grains dont la taille est comprise entre 0.063 et 2 mm sont désignés comme du sable, ceux dont le diamètre varie de 2 à 64 mm sont considérés comme du gravier et les grains dont le diamètre allant de 0.002 à 0.063 mm sont appelés limons. Selon leurs types, le sable est divisé en quatre groupes (tableau I.1) [12].

Tableau I. 1.Classification des sables selon les tailles des grains [12].

Types	Diamètre (mm)
Gravier (gravier)	>2 mm
Sable (sand)	0.063 mm < sable < 2.0 mm
limon (silt)	0.002 mm < limon < 0.063 mm
Argile (clay)	Argile < 0.002 mm

I. 1. 3. 2. Selon la forme

La forme des grains du sable se diffère selon l'origine du sable. Elle est déterminée par son degré d'angularité et de rotation. Les sables naturels (marins) sont plus ronds par contre les sables de concassage sont angleux [13].

De point de vue de (Krumbein 1941) [14, 15], il a considéré que l'angularité et la sphéricité des particules se divisent en six catégories pour l'angularité (très anguleux, anguleux, semi-anguleux, semi-arrondie, arrondie et très arrondie) et deux catégories pour la sphéricité (sphéricité supérieure et sphéricité inférieure) (figure I. 1).

I. 1. 3. 3. Selon la couleur

Le sable peut acquérir sa couleur à partir des couleurs de ses composants. Les couleurs les plus fréquents sont le marron, le rouge et le rose, ils sont dus à l'existence de calcaire et d'hématite. Les couleurs claires comme le blanc et le gris se résultent de l'absence des liants ou bien l'existence d'une liaison avec la calcite et le quartz.

Il est rarement foncé à cause de magnétite ou de matière organique. Le jaune jaunâtre ou jaune d'or et brun jaunâtre représente un mélange de quartz pur et de feldspath dans le sable [12].

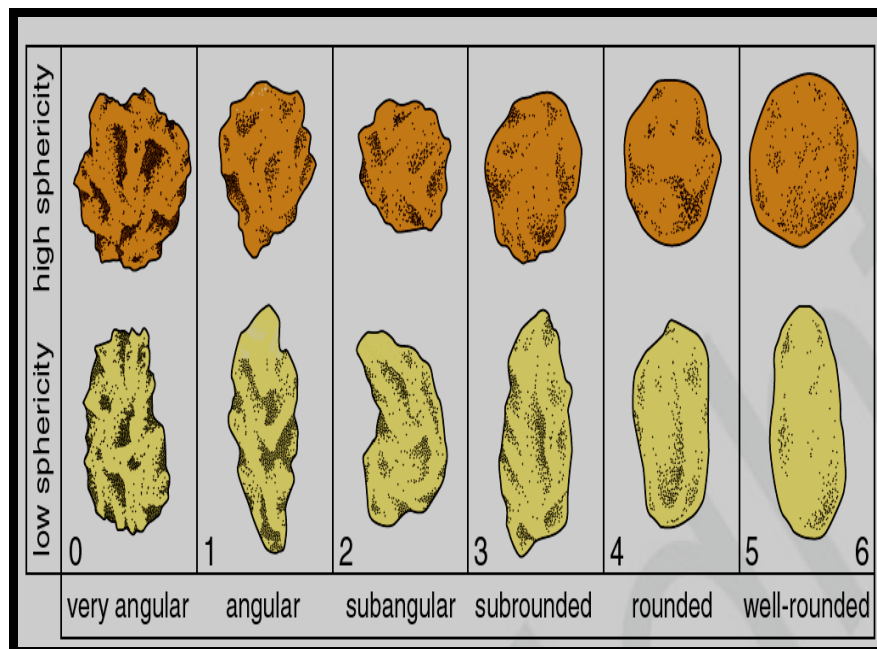


Figure I. 1. Classification qualitative de l'angularité [15].

I. 1. 4. La distribution du sable dans le monde et en Algérie

a) Le monde

Le sable couvre une vaste région dans le monde (**figure I. 2**) dont le vent constitue l'agent transporteur. Sa surface atteint d'environ 5 millions de km² de la terre (6 %). La plupart des régions sableuses se situent dans les déserts et au long des plages [16, 17].

La répartition des régions sableuses varie d'un continent à l'autre, où l'Australie présente le pourcentage maximal. Elle est occupée par 49 % de sa surface totale. Par contre, l'Europe possède le pourcentage minimal. Elle est couverte par 1 % de sable de sa surface totale. Dans les autres parties du monde, ce pourcentage se diffère. Par exemple, les déserts occupent 98 % de la surface de la Libye, 96 % de la surface de l'Egypte, 88 % de la surface de Pakistan, 11 % de la surface de l'Inde et 95 % de la surface de la péninsule arabique [18].

b) Algérie

Le Sahara algérien est considérée comme une grande partie du Sahara africain (**figure I. 3**), son pourcentage représente près de 80 % de la surface totale de l'Algérie presque 2. 381.751 km² [20].

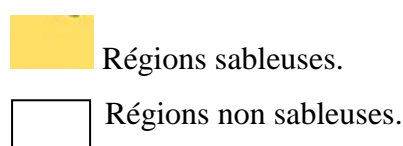
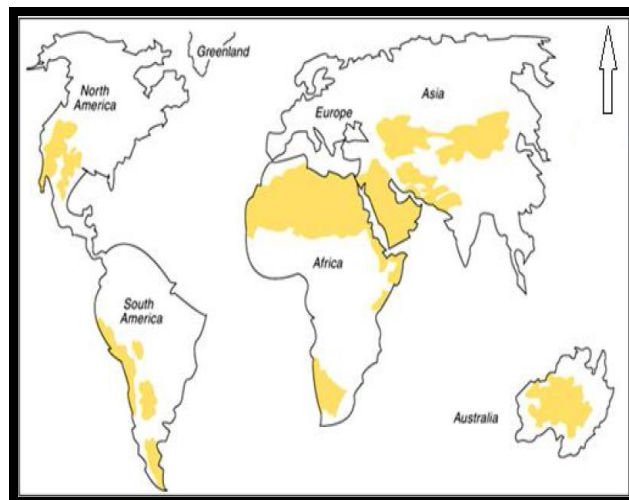


Figure I. 2. La répartition des sables dans le monde [19].

Malgré cette vaste étendue de sable, les études et les recherches sont limitées, ce qui fait que son étude a une priorité particulière, ce qui nécessite de les faire progresser par des études géologiques détaillées pour en tirer profit.

La majeure partie du sud de l'Algérie appartient au désert du Sahara. Il comprend des régions géographiques et climatiques variées, très diverses, imbriquées, où tous les terrains se répartissent entre les montagnes, les plaines, les déserts, les oasis, les côtes et les vallées. Néanmoins, les zones désertiques sont considérées comme les plus répandues. Parmi toutes ces caractéristiques du terrain où se trouvent d'importantes concentrations de sable dont les plus connues sont:

b-1) Le grand erg oriental

Le grand erg oriental se situe dans le nord-est du désert algérien. Cette zone s'étend entre les parallèles 34 à 28 de latitude N et 4 à 10 de longitude E. Il est un des plus grands ergs du Sahara avec une superficie estimée à 192.000 km². Sa surface est une deux fois de la surface du grand erg occidental.

Le grand erg oriental est limité au nord par Melrhir et Al Jarid, et au sud par la rivière Tinrhert hamada [21].

b-2) Le grand erg occidental

Le grand erg occidental est situé au sud-est du Sahara, entre les parallèles 29' à 33 de latitude N et 2 à 3 de longitude E. Elle est limitée entre pied sud de l'atlas et le nord du plateau du Tademaït. A l'est de l'erg, des plateaux rocheuse ou caillouteux larges d'une centaine de kilomètres le séparent de grand erg oriental. A l'ouest, il est longé par les oueds Zousfana et Saoura au-delà desquels s'étend la hamda de Guir. Le grand erg occidental occupe une superficie de 80000 km² [22, 23].

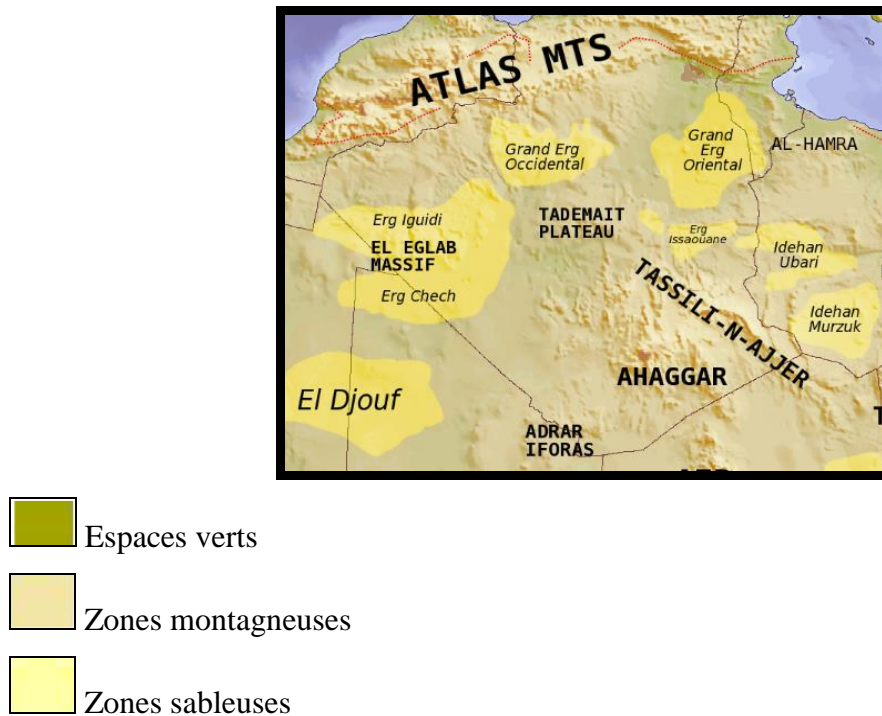


Figure I. 3. La répartition des sables dans l'Algérie [12].

I. 1. 5. L'utilisation des sables

Actuellement, l'intérêt pour les matières premières s'est accru à cause de leurs propriétés physiques, chimiques et de leur disponibilité. Le sable peut être utilisé soit sous sa forme naturelle au soit après diverses procédures de traitement, afin d'être prêt à l'emploi [24, 25].

Le sable sous sa forme naturelle est utilisé dans plusieurs domaines telle que : dans le domaine de construction par exemple le béton, la brique, le ciment, pour la filtration (la filtration de l'eau et la filtration des produits toxiques) [26-28], comme un milieu de réservoir d'énergie thermique [29-32]. Il peut être également dans les opérations à haute température qui nécessitent des matériaux réfractaires comme le moulage et les fours [34]. Il peut être utilisé aussi dans le domaine de l'industrie et nanotechnologie comme la fabrication des verres, dans le domaine optique [5], le domaine énergétique, électrique et électronique comme les panneaux et équipements d'énergie solaire [33]. De plus le sable est la première matière pour l'extraction de dioxyde de silicium (SiO_2) [35, 36] qui est lui-même la source de silicium (Si) pur [37].

I. 2. Sable des dunes

I. 2. 1. Définition du sable des dunes

Le sable des dunes est une matière naturelle très fin résultant de l'érosion provoqué par le vent et la température [38], accumulés sous forme des dunes de hauteur variable quelques centimètres à 150 m [39].

Les dunes peuvent apparaître soit en relief isolé au soit en champs des dunes séparées ou jointives, qui sont appelées les ergs.

- **Les ergs**

Il peut se définit comme, au Sahara, les massifs des dunes d'une certaine étendue. Ils occupent des surfaces démesurées [37, 40].

I. 2. 2. L'origine des sables des dunes

Les sables des dunes se forment à la suite de l'érosion, de l'interaction des roches du désert avec l'eau et les degrés de température plus élevés et le vent continu, entraînant la désintégration des roches et leur fragmentation en agrégats du sable à différentes tailles et formes [41].

I. 2. 3. Types des dunes du sable

Les dunes des sables sont classées en fonction de leur situation géographique ou de leur composition minéralogique :

- Situation géographique ;
- Composition minérale ;

a) Situation géographique

a-1) Dunes côtières

Ces dunes sont se répandant sur les côtes des mers, des océans et ils proviennent de la mare de sable côtier de peu de cohésion. Il a une végétation dense, ce qui limite sa capacité à se déplacer. Ces dunes contiennent des minéraux de quartz et de calcite en abondance. Ils se forment à la suite de l'érosion éolienne des roches sableuses et des sols dans les régions où règne un climat désertique et semi-désertique [12].

a-2) Dunes du désert

Ces dunes sont celles qui proviennent des zones désertiques recouvertes de différentes roches (roches des sables, gypse ...) ou des plaines. Ces dunes se présentent sous la forme de chaînes divergentes, ou des chaînes complexes interconnectées. Petites, faciles à transporter et à déplacer par le vent [12].

b) Composition minérale

Les dunes de sable sont classées en fonction de leur composition minérale sur la base de leur composant dominant [12] :

- Dunes de sable calcaire : ce sont celles qui contiennent une concentration élevée de calcite (Oxyde de calcium CaO).
- Dunes de sable siliceux (SiO_2) : leur teneur représente plus de 70% de cette substance.
- Dunes de sable de gypse ($\text{CaSO}_4 ; 2\text{H}_2\text{O}$) : Il a une forte proportion de gypse.

I. 2. 4. Différents formes des dunes

Les formes des dunes de sable ont des différentes en fonction de la direction du vent.

a) Dunes barkhanes

Une barkhane (figure I. 4) est une dune en forme de croissant. Elle apparaît lorsque le vent provient d'une sable direction et qu'il y a peu de sable. C'est une dune mobile [42].



Figure I. 4. Dunes barkhane [23].

b) Dunes étoiles

Les dunes étoiles (**figure I. 5**) ont une forme pyramidale à cause de l'effet de vent à multiples directions.

c) Dunes transversales

Les dunes transversales (**figure I. 6**) sont des rubans perpendiculaires à la direction du vent, il est mobile [43].



Figure I. 5. Dunes étoiles [23].



Figure I. 6. Dunes transversales [23].

d) Dunes longitudinales

Ces dunes (**figure I. 7**) s'alignent la direction des vents dominants. Ils sont immobiles et ils commencent leur cycle de vie avec des dunes barkhane puis deviennent longitudinales lorsqu'elles sont exposées à des vents latéraux se croisant avec la tendance générale des vents debout **[42]**.

I. 3. Classification granulaires des sables

a) Classifications granulaires

Le **tableau I. 2** présente les sections des grains du sol selon leurs types d'après les différents systèmes de classification **[44]**.

b) Classifications approuvées

La classification dépend de la mesure des particules de sol comme base pour les diviser en groupes, les tableaux montrent certains des classifications approuvées et comment diviser le sable en groupes en fonction des dimensions des particules (**tableau I. 3, tableau I. 4, tableau I. 5**).

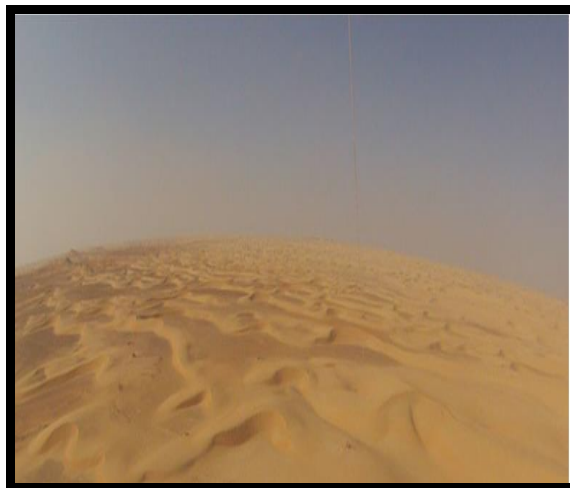


Figure I. 7. Dunes longitudinales **[43]**.

Tableau I. 2. Classification granulométrique des sols selon le département américain de l'agriculture et la société internationale des sciences du sol [44].

	Classification américaine Département américain de l'agriculture (US Department of Agriculture)		Classification internationale Société internationale des sciences du sol (International Society of Soil Science)	
	Types	Diameters des grains (mm)	Types	Diameters des grains (mm)
Sable	Sable très grossier	1-2	Sable grossier	0.2-2
	Sable grossier	0.5-1		
	Sable moyen	0.25-0.5		
	Sable fin	0.1-0.25	Sable fin	0.02-0.2
	Sable très fin	0.063-0.1		
	Limon grossier	0.02-0.063		
Limon	Limon fin	0.002-0.02	Limon	0.002-0.02
L'argile	L'argile	<0.002	L'argile	<0.002

Tableau I. 3. Classification de département américain de l'agriculture.

(US Department of Agriculture) [45].

Classification	Diamètres des grains de sable (mm)
Gravier fin	2-3.4
Sable très grossier	1-2
Sable grossier	0.5-1
Sable moyen	0.25-0.5
Sable fin	0.1-0.25
Sable très fin	0.063-0.1
Argile / Limon	<0.063

Tableau I. 4. Système de classification des sols du bureau américain (U.S bureau soil classification system) [46].

Classification	Diamètres des grains de sable (mm)
Gravier fin	1-2
Sable grossier	0.5-1
Sable	0.25-0.5
Sable fin	0.2-0.25
Sable très fin	0.05-0.1
Limon	0.005-0.05
Argile	<0.005

Tableau I. 5. Système de classification des sols de l’Institut de Technologie du Massachusetts (M.I.T soil classification system) [46].

Classification	Diamètres des grains de sable (mm)
Sable grossier	0.6-2
Sable moyen	0.2-0.6
Sable fin	0.06-0.2
Limon	0.002-0.06
Argile	<0.002

c) Classification des sols sableux

Les sols sableux sont classés en groupes selon la classification descriptive indiqués dans le **tableau I. 6**. Connaître le pourcentage du poids des particules par rapport au poids initial du sol détermine le type de ce sol sableux où l’on trouve, d’abord le rapport du poids des plus gros grains de 2 mm, puis du plus grand que 0.5 mm et plus supérieur à 0.25 mm, enfin le plus grand et le plus petit que 0.1 mm.

Tableau I. 6. Les groupes des sols sableux selon la classification descriptive [46].

Type de sable	Le pourcentage de poids des particules de poids du sol d'origine (%)
Graveleux (gravelly)	Les grains supérieurs à 2 mm sont plus que 25 %.
Grains grossiers (coarse grained)	Les grains supérieurs à 0.5 mm sont plus que 50 %.
Grains moyens (medium- grained)	Les grains supérieurs à 0.25 mm sont plus que 50 %.
Grains fins (fine- grained)	Les grains supérieurs à 0.1 mm sont plus qu'ou égaux à 75 %.
Grains très fins (fusty)	Les grains supérieurs à 0.1 sont moins qu'à 75 %.

I. 4. Quartz (SiO₂)

I. 4. 1. Définition

La silice est l'un des principaux composants de la croûte terrestre, qui caractérisé par une température de fusion proche de **1700 °C**, mais il est inférieur à cela s'il est contaminé par certains matériaux [47].

I. 4. 2. Les propriétés physiques du quartz

Le SiO₂ se cristallise sous plus d'une forme minérale, où il a une structure cristalline stable connue sous le nom de (forme α), qui reste constant pour des températures inférieures à **573°C**. Les températures dépassant cette plage entraînent une modification de la structure cristalline en β-quartz, qui est la forme stable du quartz à des températures supérieures à **573°C**.

Dans le cas d'une basse température, la structure cristalline est trigonale et sa densité est de **2.65 g/cm³**. Dans le domaine **573-870 °C**, le quartz α se transforme en quartz β selon le système hexagonal et sa densité est **2.53 g/cm³** [47]. Les propriétés les plus importantes du quartz peuvent être résumées dans le **tableau I. 7**.

Tableau I. 7. Les propriétés les plus importantes du quartz [12].

Propriétés	Unité	Valeur
Masse molaire	g/mol	60.085
Volume molaire	cm ³	22.688
La température de fusion	°C	1710
La température d'ébullition	°C	2230
La densité	g/cm ³	2.65
Conductivité thermique	W/cm k	0.01
Diffusivité thermique	m ² /s	0.009
Rapport de poids de Si	%	46.75
Rapport de poids de O	%	53.25
Dureté	/	7
L'indice de réfraction	/	1.543
Module d'élasticité	Gpa	54
Résistance à la pression	Mpa	1200

I. 4. 3. La structure cristalline du quartz

Le quartz est constitué d'un assemblage de tétraèdres SiO₄, qui elles sont reliées entre eux en partageant la partie angulaire avec un autre tétraèdre, comme le montre la **figure I. 8**.

Chaque atome de silicium a quatre atomes d'oxygène et chaque atome d'oxygène lié à deux atomes de silicium. L'unité structurale d'une cellule cristalline se compose de trois groupes SiO₂, chacun dans une seule cellule structurale avec trois siliciums de la cellule adjacente, formant un hexagonal irrégulier [48].

Les dimensions principales d'une cellule à structure cristalline de quartz (**figure I. 9**) à trois pentes sont [48] $a = b = 4.9294 \text{ \AA}$; $c = 5.4093 \text{ \AA}$; $V = 113.832 \text{ \AA}^3$, $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$.

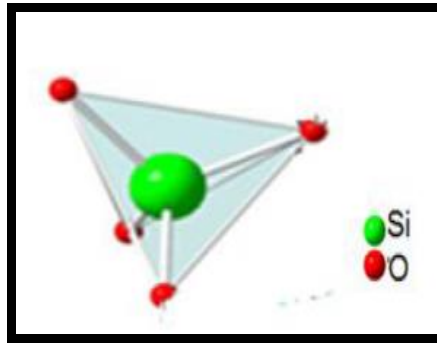


Figure I. 8. La structure cristalline du SiO_4 [12].

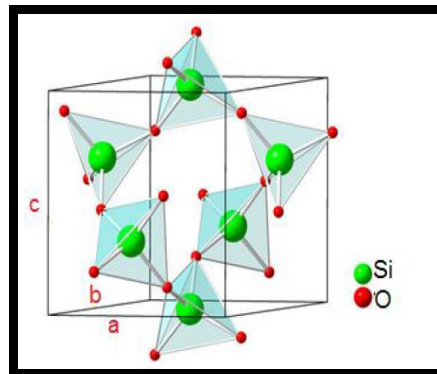


Figure I. 9. Structure cristalline du quartz [49].

Les liaisons Si-O (quartz) présentent des longueurs variables : chaque atome de silicium se retrouve entouré de quatre atomes d'oxygène, dont deux sont situés à environ 1.603 Å tandis que les deux autres sont à environ 1.163 Å.

Tableau I. 8. Propriétés cristallines du quartz [12].

Formule chimique (formula)	SiO_2
Système de cristallisation (crystal system)	Trigonal
Groupe de points (point group)	32
Groupe d'espace (space group)	$P3_121$ or $P3_221$
Unités cellulaires (unit cell parameters)	$a=b= 4.1937, c= 5.4047$
Taille de cellule (unit cell volume)	113.00 \AA^3
Z (No. of formula units per Cell)	3

I. 5. L'extraction de quartz à partir du sable

La demande mondiale de silice a augmenté en raison de sa large utilisation dans tous les domaines en particulier le domaine de l'industrie telle que l'énergie solaire, l'électronique, la construction, la céramique, le verre, la filtration des eaux usées, l'agriculture, les métaux et les produits chimiques.

Le sable a besoin des nombreux procédés de purification pour en extraire le quartz ; les procédés de purification les plus importants sont résumés comme suit [23] :

- Le lavage à l'eau, puis les secousses et frictions permettent la séparation des matières cassantes et l'évacuation des matières fines et du plancton associé au sable représenté dans l'argile.
- La classification granulométrique du sable brut est effectuée à l'aide de tamis à ouvertures de diamètre décroissant, puis ces types de granules sont examinés pour connaître le pourcentage d'impuretés qu'ils contiennent.
- Le processus de séparation magnétique permet la séparation du sable de verre par un dispositif qui attire les particules de fer à elle après avoir été induit électriquement en utilisant un champ magnétique.
- Le procédé de flottation mousseux est l'une des méthodes les plus importantes et les plus répandues dans la technologie de manipulation des matières premières. Il est basé sur la différence des propriétés physico-chimiques de surface de différents granules minéraux, où la différence de ces propriétés de surface devient apparente après avoir été traitée avec des solutions. Le métal brut se transforme habituellement en un liquide mousseux laissant des impuretés dans la suspension.
- Le sable est également purifié à l'aide de la technique de lavage par l'acide comme l'acide chlorhydrique et l'acide sulfurique à différentes concentrations, puis lavé à l'eau.

Ces procédés sont utilisés individuellement ou un par un, visant à atteindre des sables conformes aux spécifications des matières premières (quartz).

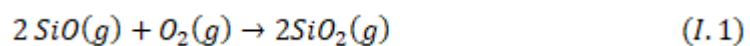
I. 6. L'extraction de silicium (Si) à partir du sable

Le Si est un métalloïde, c'est un solide cristallin dur et cassant à l'éclat métallique bleu gris. C'est utilisé dans une variété d'applications allant des matériaux de construction tels que l'argile, le béton au silicate soluble, aux siliciums ultra purs utilisés pour les solides et appareils électroniques étatiques. Le sable est l'une des sources les plus importantes de silicium. Il est possible d'extraire le silicium du sable en utilisant diverses méthodes [50, 51].

I. 6. 1. Processus dans les fours

Hans Goldschmidt a été le premier à extraire le silicium du sable en utilisant le processus de réduction de la thermitite. Pour fabriquer du silicium à partir de sable, il faut beaucoup d'énergie avec l'utilisation d'un four à arc électrique, comme illustré dans la **figure I. 10**. Où sable réduit en Si pur en le chauffant avec du coke et copeaux de bois, sont ajoutés au sommet du four. À des températures supérieures à 3000°C. Le fond du four est pressé et l'énergie électrique est fournie par les électrodes. Grâce à une série de réactions qui se produisent dans différentes zones du four, la réaction globale suivante se produit [52, 53]:

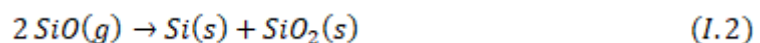
- Au-delà du four : formation de formée de silice (équation I. 1) :



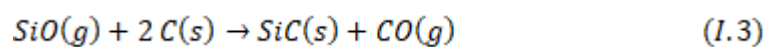
Un arc électrique est généré entre la pointe électrique et les parois du cratère contenant du carbone, où le silicium est produit à environ 2000 °C par la réaction 2.

De plus, SiO est produit dans la zone à haute température par les réactions 3.

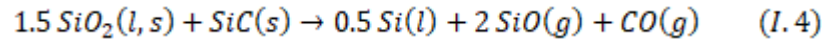
- T entre 300°C et 1000°C : une décomposition du SiO (équation I. 2) :



- T=1800°C formation de SiC (équation I. 3) :



- T=2000°C formation de Si et de SiO (équation I. 4) :



Cette méthode est très consommatrice d'énergie et génère des gaz non écologiques (CO) lors de ce processus de synthèse. Ce type de silicium contient de 1 % à 3 % d'impuretés, nécessite donc une étape supplémentaire de traitement soit par purification chimique (le procédé de Siemens) ou bien par purification métallurgique (le procédé Elken).

- **Procédé par voie chimique (Siemens)**

Dans la méthode de Siemens, le silicium métallurgique (MG-Si) est mis à réagir avec du chlorure d'hydrogène HCl. Cette dernière permet la séparation de substances chimiques par une distillation.

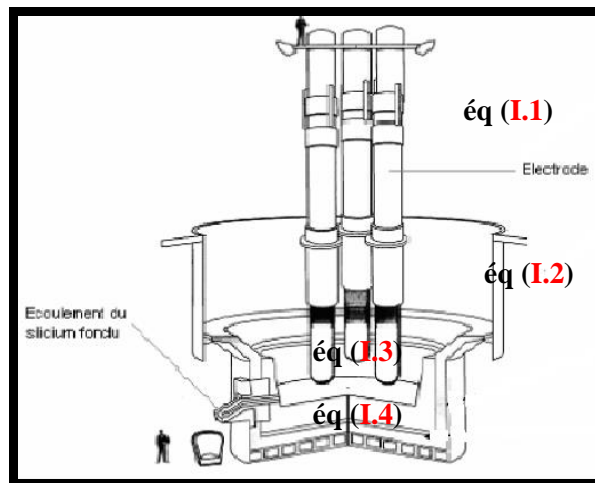
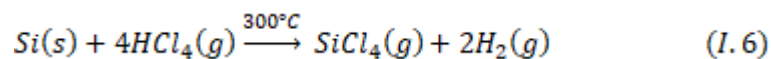
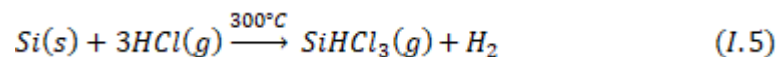
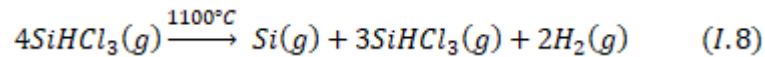
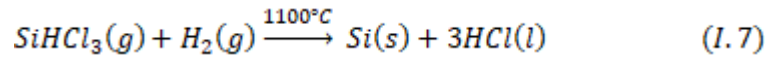


Figure I. 10. Four de production de silicium [54].

Le silicium est transformé en trichlorosilane (SiHCl₃) à une température à de 300°C la réaction suivants [55]:



SiHCl₃ est ensuite purifié par distillation puis réduite avec de l'hydrogène (H₂) à 1000 - 1100°C. Le trichlorosilane purifié (figure I. 11) est ensuite réduit en silicium dans un réacteur à 1100°C. Le silicium obtenu a une pureté de 99.99 %.



Dans le processus on obtient du silicium polycristallin et pour la production de silicium monocristallin utilise la méthode Czochralski.

- **Procédé par voie métallurgique (Elkem)**

Le procédé d'ELKEM est basé sur le traitement du Si-Mg à haute température avec du laitier de silicate de calcium et ensuite à basse température avec la filtration chimique [57].

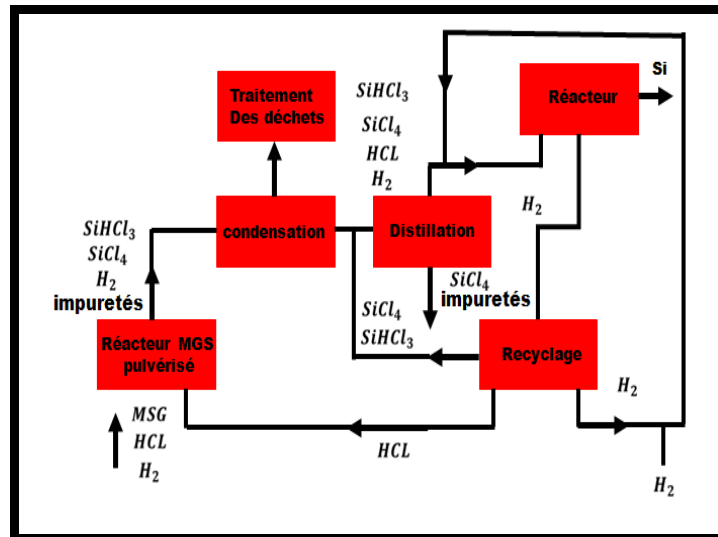


Figure I. 11. Cycle de distillation pour le composé de chlorure de silicium.

I. 6. 2. Silicium monocristallin par le procédé de Czochralski (sc-Si)

Cette méthode repose sur la fusion du matériau et cristallisation au contact d'un germe monocristallin (figure I. 12). Le silicium polycristallin est fondu dans un four d'étirage sous argon à 1450°C (1). Ensuite, on fait placer un germe monocristallin en contact avec silicium fondu (2) et puis tiré lentement (de 0.4 à 3 mm/min) (3 et 4). Pendant le processus de croissance du cylindre de silicium, le creuset rempli de silicium liquide et le cylindre tournent lentement dans le sens opposé, puis un lingot de silicium cylindrique de 60 à 100 kg et d' environ 2 m de longueur dans le cas de disques de 200

mm (5) [55, 56].

I. 6. 3. Procédé de magnétothermique

Dans le processus, la poudre de magnésium est utilisée à la place du coke. Le processus de magnétothermique est un processus respectueux de l'environnement pour l'extraction du silicium du sable et l'exécution du processus est très simple, il n'y a pas non plus d'émission de carbone.

Le processus de réduction de la magnétothermique, le silicium est extrait par la réduction du sable avec du magnésium qui produit du Mg_2Si . Après cela, le silicium élémentaire est séparé par lessivage avec du HCl ou acide alcalin (HF), suivi d'un lavage à l'eau distillée. Les particules de sable sont ensuite séchées à une température pendant un temps prédéfini. Le silicium produit dans ce processus est sous forme pure en raison du processus de filtration par l'acide qui dissout la teneur en Mg dans l'acide minéral, d'après la réaction suivante [51]:

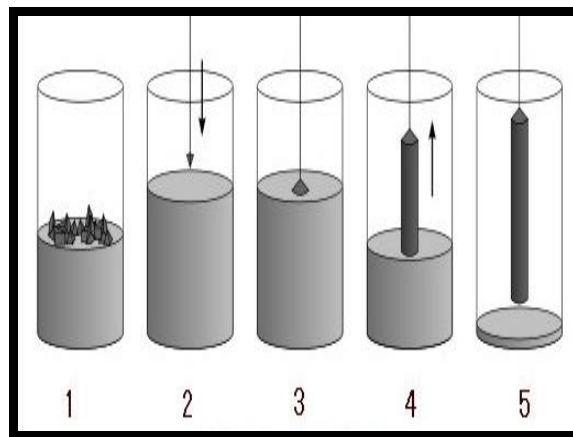
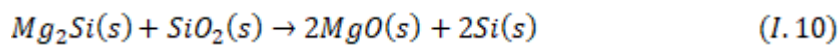
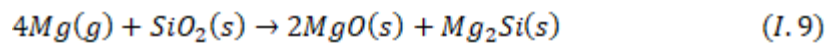
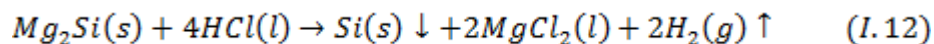
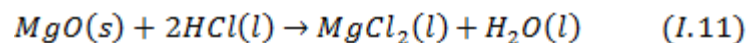


Figure I. 12. Méthode Czochralski pour la fabrication de (Si) monocrystallin [56].



Après la filtration par l'acide le silicium purifié est obtenu par la réaction suivante [51]:



I. 7. Quelques travaux sur le sable et le sable des dunes

Le sable est une première matière importante, il peut être utilisé dans différents domaines comme nous l'avons mentionné précédemment, pour cette raison, il a été étudié dans la plupart des pays du monde qui en possèdent et nous pouvons citer quelques travaux antérieurs dans le **tableau I. 9**.

Tableau I. 9. Le tableau résume quelques travaux menés sur le sable.

Auteurs et L'année	Explication	Références
Pederina et al. 2005	Ils ont étudié le sable local disponible en grande quantité a pour son utilisation potentielle dans le béton sableux et pour trouver une solution partielle pour remplacer le rare granulats grossier par du béton.	[58]
Howari et al. 2007	Ils ont étudié la géomorphologie et la minéralogie de différents types de dunes dans l'est d'Abu Dhabi à l'aide de jeux de données Landsat 7 ETM+.	[59]
Trabelsia et al. 2009	Ils ont identifié les propriétés physico-chimiques du sable de Douiret afin de favoriser la production de gel de silice.	[60]
G. Anbalagan et al. 2010	Ils ont étudié la caractérisation du sable standard indien par diffraction des rayons X, spectroscopie IR, Raman et par des techniques de résonance magnétique nucléaire.	[48]
Marwa Al-Ansary et al. 2012	Elle a recherché la caractérisation géologique et physicochimique des sables de construction au Qatar.	[29]

S. Gnanasaravanan et al. 2013	Ils ont étudié la caractérisation des minéraux dans le sable naturel et manufacturé dans la ceinture de la rivière Cauvery, Tamilnadu en India.	[61]
Dos Santos et al. 2015	Ils ont évalué les occurrences de sable de quartz de la formation Santa Maria Eterna, dans le nord-est du Brésil, en tant que source potentielle de matières premières pour la production de verre de silice.	[62]
Bennefi et al. 2016	Ils ont étudié la morphologie, la minéralogie, la géochimie et la provenance des dunes de sable en Arabie saoudite.	[63]
Murthy I. N et al. 2016	Ils ont étudié les propriétés physiques et chimiques du sable à haute teneur en silice, du laitier Fe-Cr et du laitier de haut fourneau pour des applications de fonderie.	[64]
Mohammed et al. 2017	Ils ont étudié l'effet de la chaleur sur la composition du sable des dunes de la région d'Ouargla (Algérie) à l'aide de XRD et FTIR.	[65]
Naouia et al. 2016	Elle a étudié la classification chromatique du sable des dunes d'Ouargla par la détermination des principales compositions et les causes de couleur, en utilisant XRD, FTIR et XRF.	[66]
Adnani et al. 2016	Ils ont étudié les différences de couleur des dunes de sable, puis ont étudié l'origine et les voies de transport du sable.	[67]

Diago et al. 2018	Ils ont caractérisé le sable du désert des Émirats arabes unis qui pourrait être utilisé comme support de stockage d'énergie thermique dans la technique des récepteurs solaires à particules.	[30]
Nassima et al. 2019	Elle a été réalisée la caractérisation spectroscopique des minéraux des dunes de sable d'El Oued (Sahara algérien du nord-est) par des analyses FTIR, XRF et XRD.	[6]
Khadija et al. 2019	Elle a réalisé une analyse minéralogique d'échantillons de roses de sable et de dunes de sable provenant de deux régions différentes du sud algérien.	[5]
Sabiha Anas et al. 2020	Elle a cherché à déterminer les différents paramètres de texture et propriétés chimico-physiques du sable de la région de Zemmouri (Algérie) à exploiter dans le domaine de l'industrie ci-après. La XRF a révélé que le sable de Zemmouri était caractérisé par une très grande pureté (99.3 % de silice) et les observations en micrographie optique ont présenté les différentes formes de grains de sable (allongées, arrondies et anguleuse).	[68]
Sabiha Anas et al. 2020	Elle a exploité le sable de silice de l'extrême est de l'Algérie (Tebessa) dans le projet de production de silicium métal pour des applications photovoltaïques ; les chercheurs ont étudié et caractérisé son sable à l'aide de la technique XRF, d'observations en microscopie, d'analyses de densité, d'analyses granulométriques et de XRD.	[33]

Khouloud et al. 2020	Elle a étudié le raffinement de Rietveld basé sur l'analyse quantitative de phase (QPA) du sable des dunes d'Ouargla.	[69]
--------------------------------	---	----------------------

Références Bibliographies

- [1] Bigelow, C. A., Bowman, D. C., Cassel, D. K. (2004). Physical properties of three sand size classes amended with inorganic materials or sphagnum peat moss for putting green root zones. *Crop Science*, **44** (3), 900-907.
- [2] Boudlal, O. (2013). Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations (thèse de doctorat).
- [3] Sivakumar, S., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Jebakumar, J. P. P. (2013). FT-IR Spectroscopic studies on coastal sediment samples from nagapattinum district, Tamilnadu, India. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, **3** (4), 366.
- [4] M.L. MECHRI. (2016). Etude de l'effet du traitement thermique sur la composition du sable des dunes d'Ouargla et sa conductivité électrique par des méthodes spectroscopiques (thèse de doctorat).
- [5] Zouaouid, K., Gheriani, R. (2019). Mineralogical analysis of sand roses and sand dunes samples from two regions of South Algeria. *Silicon*, **11** (3), 1537-1545.
- [6] Meftah, N., Mahboub, M. S. (2020). Spectroscopic characterizations of sand dunes minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD analyses. *Silicon*, **12** (1), 147-153.
- [7] Kitouni, S., Harabi, A. (2017). Impact des additions en petites et grandes proportions sur les propriétés physiques de la porcelaine.
- [8] Günther, C., Becker, A., Wolf, G., Epple, M. (2005). In vitro synthesis and structural characterization of amorphous calcium carbonate. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, **631** (13-14), 2830-2835.
- [9] McLean, R. (2010). Sue J. McLaren University of Leicester, Leicester, UK. *Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process*, 47.
- [10] S. Tadier. (2009). Etude des propriétés physico-chimiques et biologiques de ciments biomédicaux à base de carbonate de calcium: apport du procédé de co-broyage (thèse doctorat).
- [11] Bariand, P., Cesbron, F., Geffroy, J. (1978). Les minéraux leurs gisements, leurs associations. **3**.
- [12] BEDDIAF Samiha. (2016). Détermination de la composition moléculaire et de la concentration en quartz dans les différents types granulaires de sable des dunes d'Ouargla à l'aide de techniques spectroscopiques (thèse de doctorat).

- [13] Mahaney, W. C., Mahaney, W. (2002). Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford University Press, USA.
- [14] Krumbein, W. C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, **11** (2), 64-72.
- [15] Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, **23** (2), 117-119.
- [16] Parsons, A. J., Abrahams, A. D. (2009). *Geomorphology of desert environments*. Springer Netherlands, 3-7.
- [17] Kavulich Jr, M. J. (2008). *The Physics of Sand Dune Formation and Migration on Mars* (thèse de doctorat).
- [18] Petre, M., Gligor, J., Traje, S., Blao, B. (2004). The dependence of quartz and opal color on trace element composition—aas, FTIR and micro-raman spectroscopy study. *Bulletin of the Chemists and Technologists of Macedonia*, **23** (2), 171-184.
- [19] Pye, K., Tsoar, H. (2008). *Aeolian sand and sand dunes*. Springer Science - Business Media.
- [20] Benchaa, S., Gheriani, R., Achouri, A., Bouguettaia, H., Mechri, M. L. (2021). Structural characterizations of dune sand and construction sand of Sidi Slimane and Zaouia El Abidia areas in the Touggourt region in southeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 1-11.
- [21] Khakha, Y., Chafou, A. (2014). *Contribution à l'étude Minéralogique et géotechnique des sables de l'erg oriental d'Ouargla* (Thèse de doctorat).
- [22] Mainguet, M., Jacqueminet, C. (1984). Le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental. Classification des dunes, balance sédimentaire et dynamique d'ensemble. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, **59** (1), 29-48.
- [23] MEHDADI Naouia. (2017). *Détermination de la composition des principaux types de couleur des dunes de sable de la région d'Ouargla et détermination de la cause de leur coloration à l'aide de méthodes spectroscopiques* (thèse de doctorat).
- [24] Bendida, A., Tidjani, A. E. B., Badri, A., Kendouci, M. A., Nabou, M. (2013). Treatment of domestic wastewater from the town of Bechar by a sand filter (sand of Beni Abbes Bechar Algeria). *Energy Procedia*, **36**, 825-833.
- [25] Haig, S. J., Quince, C., Davies, R. L., Dorea, C. C., Collins, G. (2014). Replicating the microbial community and water quality performance of full-scale slow sand filters in laboratory-scale filters. *Water research*, **61**, 141-151.
- [26] Leghrieb, Y., Mitiche, R., Bentebba, M. T., Djouhri, M., Kriker, A. (2012). *The*

manufacture of raw brick from the Saharan sand-based mortar of Ouargla (located in the Septentrional Sahara, Algeria) for use in Arid Regions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **37**, 2149-2161.

[27] Guettala, S., Mezghiche, B., Mellas, M. (2010). Adding finely crushed dune sand to cement on the evolution of hydration of pastaportl and cement.

[28] Hamoda, M. F., Al-Ghusain, I., Al-Mutairi, N. Z. (2004). Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse. *Desalination*, **164** (3), 203-211.

[29] Al-Ansary, M., Pöppelreiter, M. C., Al-Jabry, A., Iyengar, S. R. (2012). Geological and physiochemical characterisation of construction sands in Qatar. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **1** (1), 64-84.

[30] Li, X., Li, W., Zhang, R., Jiang, T., Chen, H., Li, G. (2020). Collaborative scheduling and flexibility assessment of integrated electricity and district heating systems utilizing thermal inertia of district heating network and aggregated buildings. *Applied Energy*, **258**, 114021.

[31] Moore, P. (2005). High-purity quartz. *Ind Miner*, **455**, 53-57.

[32] Tafraoui, A., Lebaili, S., Slimani, A. (2006). Study physico-chemical of the sand of the Western Erg of the area of Saoura (Western South Algeria). *Research J. of Applied Sciences*, **1** (1-4), 1-6.

[33] Anas Boussaa, S., Zaourar Boutarek, N., Kefai, A. (2020). Characterization and experimental design application for Algerian silica sand enrichment. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, 1-10.

[34] Dal Martello, E., Bernardis, S., Larsen, R. B., Tranell, G., Di Sabatino, M., Arnberg, L. (2011). Electrical fragmentation as a novel refining route for hydrothermal quartz for SoG-Si production. *Miner Eng. Doi*, 10.

[35] Platias, S., Vatalis, K. I., Charalampides, G. (2014). Suitability of quartz sands for different industrial applications. *Procedia Economics and Finance*, **14**, 491-498.

[36] Saikia, B. J., Parthasarathy, G., Sarmah, N. C., Baruah, G. D. (2008). Fourier-transform infrared spectroscopic characterization of naturally occurring glassy fulgurites. *Bulletin of Materials Science*, **31**, 155-158.

[37] Lazar, K. (2012). Caractérisation et valorisation du sable du grand erg oriental Algérien comme matériaux de construction (Thèse de doctorat).

[38] Mechri, M. L., Chihi, S., Bougetaia, H. (2012). Etude de la composition atomique du sable des dunes de la région de Ouargla par spectroscopies XRF, MEB, EDX et ANN. *Annals of Science and Technology*, **4** (2), 11-11.

- [39] Pye, K., Tsoar, H. (2008). *Aeolian sand and sand dunes*. Springer Science - Business Media.
- [40] MOUANE, A. (2018). *Contribution à la connaissance des Amphibiens et des Reptiles de la région de l'Erg Oriental (Souf, Taibet et Touggourt) (Thèse de doctorat)*.
- [41] Belmedrek, S., Bouzenoune, A. (2017). *Granulométrie et minéraux lourds des sables dunaires et de plage des secteurs d'Oued Zhour et de Beni Belaid (thèse de magistère)*.
- [42] Megherbi, W. (2015). *L'ensablement, un risque négligé en zone tellienne littorale Cas de la région Mostaganem (Mémoire de Magister)*.
- [43] Lorenz, R. D., Zimbelman, J. R. (2014). *Dune worlds: How windblown sand shapes planetary landscapes*. Springer Science - Business Media.
- [44] Gee, G. W., Or, D. (2002). *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, **5**, 255-293.
- [45] Beddiaf, S., Chihi, S., Leghrieb, Y. (2015). The determination of some crystallographic parameters of quartz, in the sand dunes of Ouargla, Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, **106**, 129-133.
- [46] Dane, J. H., Topp, C. G. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods*. John Wiley – Sons, **20**.
- [47] Al-abadi, L. (2009). Study of the optical characters of quartz minerals and the disclosure of its presence in some soils sediments. *Euphrates J Agric Sci*, **3**, 373-80.
- [48] Anbalagan, G., Prabakaran, A. R., Gunasekaran, S. (2010). Spectroscopic characterization of Indian standard sand. *Journal of applied spectroscopy*, **77**, 86-94.
- [49] Ranieri, V. (2009). *Amélioration des performances du quartz par substitution de germanium au silicium dans le réseau cristallin (Thèse de doctorat)*.
- [50] Furquan, M., Khatribail, A. R., Vijayalakshmi, S., Mitra, S. (2018). Efficient conversion of sand to nano-silicon and its energetic Si-C composite anode design for high volumetric capacity lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, **382**, 56-68.
- [51] Islam, M. S., Sattar, M. A., Halim, M. A., Hoque, M. A., Quader, A., Gafur, M. A., Hakim, M. A. (2021). Squeezing out and Characterization of Silicon from Sand by Mg-Thermite Reduction Process. *Micro and Nanosystems*, **13 (1)**, 55-60.
- [52] Sani, N. A., Abdulsalam, A. K., Abdullahi, U. A. (2013). Extraction and quantification of silicon from silica sand obtained from Zauma River, Zamfara state, Nigeria. *European scientific journal*, **9 (15)**.
- [53] Maldonado, S. (2020). The importance of new “sand-to-silicon” processes for the

rapid future increase of photovoltaics. *ACS Energy Letters*, **5** (11), 3628-3632.

[54] Ringdalen, E., Tangstad, M. (2012). Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions. *The Minerals, Metals - Materials Society (TMS)*, 195-203.

[55] Schei, A., Tuset, J. K., Tveit, H. (1998). Production of high silicon alloys (pp. 301-315). Trondheim: Tapir.

[56] Benmeddour, A., Meziani, S. (2017). Etude et simulations numériques des contraintes thermomécaniques dans le silicium photovoltaïque (thèse de doctorat).

[57] Veirman, J. (2011). Effets de la compensation du dopage sur les propriétés électriques du silicium et sur les performances photovoltaïques des cellules à base de silicium solaire purifié par voie métallurgique (thèse de doctorat).

[58] Bédérina, M., Khenfer, M. M., Dheilly, R. M., Quéneudec, M. (2005). Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cement and concrete research*, **35** (6), 1172-1179.

[59] Howari, F. M., Baghdady, A., Goodell, P. C. (2007). Mineralogical and geomorphological characterization of sand dunes in the eastern part of United Arab Emirates using orbital remote sensing integrated with field investigations. *Geomorphology*, **83** (1-2), 67-81.

[60] Trabelsi, W., Benzina, M., Bouaziz, S. (2009). Physico-chemical characterisation of the Douiret sand (Southern Tunisia): Valorisation for the production of Silica Gel. *Physics procedia*, **2** (3), 1461-1467.

[61] Gnanasaravanan, S., Rajkumar, P. (2013). Characterization of minerals in natural and manufactured sand in Cauvery River belt, Tamilnadu, India. *Infrared Physics - Technology*, **58**, 21-31.

[62] Dos Santos, M. F. M., Fujiwara, E., Schenkel, E. A., Enzweiler, J., Suzuki, C. K. (2015). Quartz sand resources in the Santa Maria Eterna formation, Bahia, Brazil: A geochemical and morphological study. *Journal of South American Earth Sciences*, **62**, 176-185.

[63] Benaafi, M., Abdullatif, O. (2015). Sedimentological, mineralogical, and geochemical characterization of sand dunes in Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 11073-11092.

[64] Murthy, I. N., Rao, J. B. (2016). Investigations on physical and chemical properties of high silica sand, Fe-Cr slag and blast furnace slag for foundry applications. *Procedia Environmental Sciences*, **35**, 583-596.

- [65] Mechri, M. L., Chihi, S., Mahdadi, N., Beddiaf, S. (2017). Study of heat effect on the composition of dunes sand of Ouargla (Algeria) using XRD and FTIR. *Silicon*, **9** (6), 933-941.
- [66] Mahdadi, N., Chihi, S., Bouguettaia, H., Beddiaf, S., Mechri, M. L. (2017). Chromatic classification of Ouargla (Algeria) dunes sand: determination of main compositions and color causes, by using XRD, FTIR and XRF. *Silicon*, **9** (2), 211-221.
- [67] Adnani, M., Azzaoui, M. A., Elbelrhiti, H., Ahmamou, M., Masmoudi, L., Chiban, M. (2016). Yardi sand dunes (Erfoud area, southeastern of Morocco): color, composition, sand's provenance, and transport pathways. *Arabian Journal of Geosciences*, **9**, 1-15.
- [68] Boussaa Anas, S. (2020). Study of Algerian sand from Zemmouri deposits. *Arabian Journal of Geosciences*, **13**, 1-8.
- [69] Hadjadj, K., Chihi, S. (2020). Rietveld refinement based quantitative phase analysis (QPA) of Ouargla (part of grand erg oriental in Algeria) dunes sand. *Silicon*, 1-9.

Chapitre II

Préparation des échantillons & les
techniques de caractérisation

Dans ce chapitre, nous allons présenter les régions d'étude et les étapes de la préparation des échantillons. Nous allons montrer aussi les analyses de caractérisation utilisées dans cette étude : la technique de diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie infrarouge à transformation de Fourier (FTIR), la fluorescence des rayons X (XRF), la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et l'analyse granulométrique par la diffraction laser (LA-960).

Finalement, nous avons expliqué le principe de fonctionnement du logiciel X'Pert HighScore plus et les étapes de traitement des données de la diffraction des rayons X.

I. 1. Situations géographiques des régions d'étude

II. 1. 1. Oued Righ

La zone de l'Oued Righ se situe au nord-est du Sahara Algérien, qui s'étend sur un axe sud-nord dont la latitude est $32^{\circ} 54'$ à $39^{\circ} 9'$ nord, et la longitude est $05^{\circ}50'$; $05^{\circ} 75'$ est [1, 2] :

II. 1. 1. 1. Touggourt

La ville de Touggourt est située dans la partie sud - est de l'Algérie. Elle est délimitée au sud et à l'est par le grand erg oriental, au nord par les palmeraies de Megarine et l'ouest par les dunes de sable $33^{\circ} 02'$ à $33^{\circ} 12'$ nord ; $5^{\circ} 59'$ à $6^{\circ} 14'$ est [3].

Touggourt est située à 160 km au nord - est d'Ouargla, à 225 km au sud de Biskra et 600 km environ d'Alger. Touggourt est une Oasis au nord du Sahara algérien [4].

Administrativement Touggourt renferme quatre communes territoriales qui sont les suivants Touggourt, Nezla, Tebesbest, Zaouïa El- Abidia. Notre étude a été réalisée dans la région du Zaouïa El- Abidia et Sidi Slimane.

a) Zaouïa El Abidia

Localisée au nord - est de la commune de Touggourt, Elle est limitée :

Au nord : la commune de Megarine ;

Au ouest et sud - ouest : la commune de Touggourt ;

Au sud est : la commune de Tebesbest ;

Zaouïa El-Abidia est située dans le $33^{\circ}08'23.32''$ de latitude nord $6^{\circ}06'10.65''$ de longitude est [4].

b) Sidi Slimane

La commune de Sidi Slimane (Daïra de Megarine) est située à 11 km au nord - ouest de son chef-lieu de daïra Megarine. Elle s'étend sur une latitude $33^{\circ}19'59.19''$ nord et la longitude est $6^{\circ}09'22.89''$ est [5, 6], qui est limitée :

Au nord : par la wilaya d'El Oued ;

Au sud : la commune de Megariene ;

A l'est : la commune de M'nageur ;

A l'ouest : la commune d'El Alia.

II. 2. Techniques de prélèvement des échantillons

Les échantillons de sable ont été prélevés de deux régions différentes du nord de Touggourt : la région de Zaouïa El Abidia et la région de Sidi Slimane (figure II. 1).

La première série comprend du sable des dunes prélevé de la commune de Sidi Slimane au sud - ouest de la ville de Touggourt et la deuxième série comprend du sable de construction de la même commune. La troisième série est constituée du sable des dunes de la commune de Zaouïa El-Abidia à l'est de Touggourt.

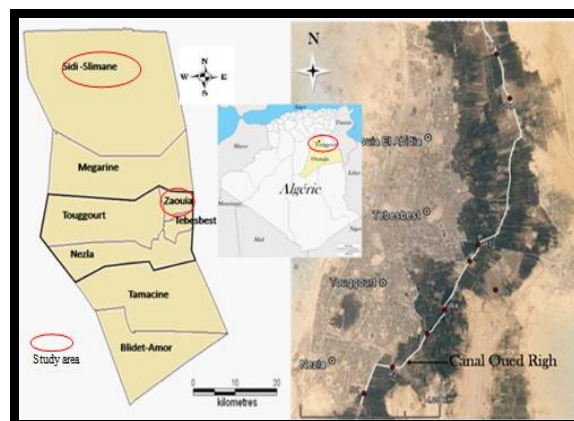


Figure II. 1. Localisation des origines des échantillons étudiées.

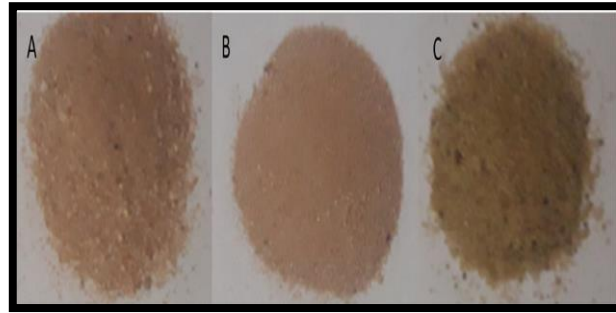


Figure II. 2. Les échantillons prélevés avant la préparation: (A) le sable des dunes de région de Zaouïa El Abidia (SDZ), (B) le sable des dunes de la région de Sidi Slimane (SDS), (C) le sable de construction de la région de Sidi Slimane (SCS).

Les échantillons de sable à étudier étaient collectés en prélèvement de différents niveaux (le sommet, le milieu, le pied et sous les dunes et à différentes profondeurs) à des poids égaux puis les échantillons récupérés sont mélangés pour obtenir d'échantillons homogènes qui présentent la dune d'une façon générale. Ces derniers étaient bien séchés au soleil pendant 48 h (figure II. 2).

II. 3. Préparation des échantillons

Après le séchage des échantillons au soleil, nous les broyons manuellement avec du mortier pour l'obtenir sous forme de poudre, puis la poudre a été conservée dans des récipients en plastique scellés à température ambiante (figure II .3).



Figure II. 3. Figure présente la méthode des préparations d'échantillon avant les analyses.

II. 4. La diffraction des rayons X (DRX)

Les rayons X s'agissent des rayons électromagnétiques. Leurs longueurs d'onde sont comprises entre 0.01 et 100 Å. Ils occupent donc le champ entre les rayons ultraviolets et gamma. Leur utilisation s'étend à divers secteurs tels que la physique, la médecine et l'industrie [7].

II. 4. 1. Principe

La DRX est une technique la plus précise et la plus rapide d'analyse [8]. Elle fournit des informations sur la structure cristalline, la composition chimique, les propriétés physiques et structurales des matériaux [9].

Pour expliquer le phénomène de diffraction des rayons X, nous avons besoin de connaître les propriétés des matières, la relation entre le phénomène et le milieu qui l'engendre. Les matières diffractent en effet les rayons X ayant des longueurs d'onde de quelques Å, des interférences constructives se produisent entre les rayons X émit par le matériau par conséquent les pics de diffraction apparaissent dans certaines directions déterminées [10].

Les cristaux sont constitués des atomes, des molécules ou des ions visibles dans une répartition régulière et sur des niveaux parallèles appelés (niveaux cristallins) suivant les trois dimensions de l'espace [11].

Donc il existe un grand nombre de ces niveaux cristallins dans un seul réseau différent par le nombre des atomes qui les traversent et la distance entre les atomes successifs, ainsi que la distance verticale entre chacun des deux niveaux parallèles (les distances de réseau), **figure II.4 [12]**.

Lorsque le cristal absorbe les rayons X, les niveaux des atomes agissent comme de petits miroirs qui diffractent les rayons de façon régulière et chaque type de cristal a un modèle de diffraction différent.

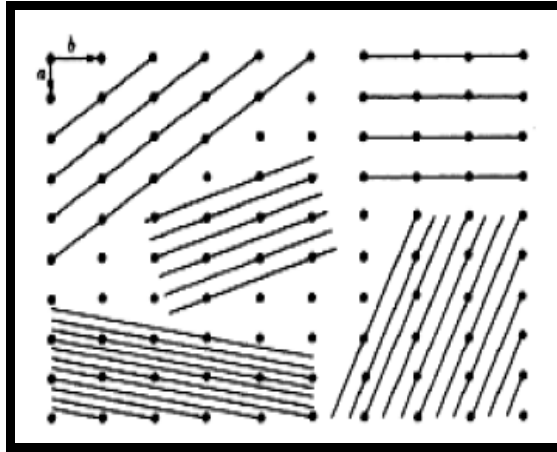


Figure II. 4. Représentation schématique les niveaux des réseaux [12].

Son principe est basé sur l'interaction d'un faisceau de rayons X monochromatique, émis par une source de l'appareil avec l'échantillon à analyser [13]. La technique de DRX peut être expliquée à travers le modèle si nous imaginons qu'un rayon monochromatique incident frappe un plan des atomes ou des ions comme le montre la **figure II. 5**.

L'interférence constructive entre les rayons 1 et 2 se réalise quand la différence de parcours entre eux soit un nombre entier de la longueur d'onde utilisée, présenté par la somme des distances \overline{AB} et \overline{BC} :

$$\overline{AB} + \overline{BC} = 2d \sin \theta \quad (II.1)$$

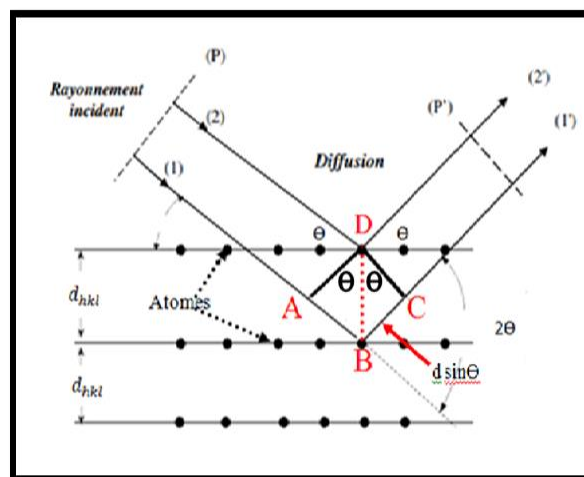


Figure II. 5. L'interférence constructive selon la loi de Bragg.

Avec d_{hkl} est la distance inter réticulaire lorsqu'elle est exactement égale à des multiples de la longueur d'onde du rayon incident λ , alors l'équation (II.2) [13].

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (\text{II. 2})$$

Avec n : ordre de réflexion dans notre étude on se limitera au premier ordre, λ est la longueur d'onde du faisceau de rayon X de l'appareil, θ est l'angle de diffraction.

II. 4. 2. Géométrie de Bragg Brentano

Il y a plusieurs montages disponibles pour l'analyse de DRX. La montagne Bragg-Brentano est le plus commun, où il existe deux types de montages disponibles [14]:

- Type θ - θ , dans ce type, le mouvement du tube et du détecteur est simultanément à la même vitesse angulaire où l'échantillon reste fixé.
- Type θ - 2θ , le détecteur et l'échantillon se déplacent à des angles 2θ et θ respectivement tandis que le tube reste immobile.

Les deux montages partagent les dispositifs standards suivants :

- Un tube des rayons X.
- Des fentes de Soller, qui sont connus des fentes de divergence et d'anti-diffusion. Ils permettent d'identifier la divergence axiale ou verticale du faisceau des rayons X.
- Un filtre, cette dernière permet d'éliminer le fond de fluorescence.
- Un détecteur.

Le système se compose d'une géométrie θ - 2θ (figure II. 6) totalement automatisé et commandé par logiciel. Où l'échantillon est placé dans la porte des échantillons. Il effectue une rotation uniforme de vitesse angulaire ω autour d'un axe vertical. Il émet des rayons X à partir de la source (source), puis diffracté à travers l'échantillon pour former un rayon reflété (reflected rays), tandis que le détecteur (detector), avec sa fente réceptrice placée sur le point de focalisation, tourne autour de l'échantillon avec une vitesse de 2ω , où il entre dans le compteur (counter) [15].

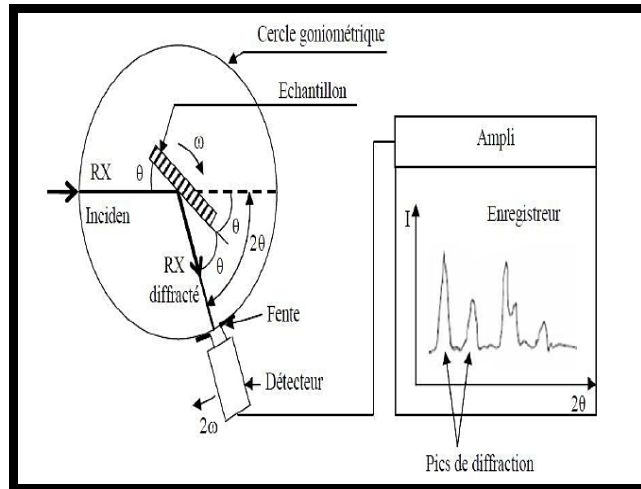


Figure II. 6. La géométrie du montage de Bragg-Brentano [16].

L'angle d'incidence est varié pas à pas et dans chaque pas, l'intensité est enregistrée du rayon reflété par un compteur lorsque la relation de Bragg est satisfaite, le détecteur enregistre une augmentation de l'intensité diffractée [16].

II. 4. 3. Appareillage expérimentale

Dans ce travail nous allons utiliser un diffractogramme Seifert disponible dans la Laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS), représenté sur la **figure II. 7**. La source de rayons X a été produite à partir de radiation $\text{CuK}\alpha$, ayant une longueur d'onde 1.5405 \AA , nous avons choisi une tension de 40 kV et une intensité de courant 30 mA. Tous les échantillons ont été scannés dans un intervalle de 10 à 90 degrés par pas de 0.02 degrés/s.



Figure II. 7. Appareil de DRX type Seifert.

II. 4. 4. Préparation des échantillons

Le support d'échantillon est une plaque évidée en surface pour charger la matière. Après nous appliquons une légère pression afin d'obtenir une surface plane afin d'obtenir un bon résultat. La **figure II. 8** montre les différents outils utilisés et la méthode de mise en place de l'échantillon dans le support.

II. 5. Le logiciel X'Pert HighScore Plus

Il existe nombreux programmes informatiques qui traitent les données de diffraction des rayons X de manière automatisée, notamment : Match, Full Prof, X'pert HighScore.

Le programme X'pert HighScore plus peut faire correspondre les informations qui lui sont fournies à partir de la carte de diffraction des rayons X de l'échantillon étudié et celles de ses bases de données, donnant la structure cristalline la plus identique et sa concentration.

II. 5. 1. Principe

Le logiciel X'Pert HighScore Plus est basé sur les principes suivants dans l'analyse des diffractions des rayons X :

a) Base de données internationale de la diffraction

Cette organisation a été fondée en 1941 sous le nom de Joint Committee for Powder Diffraction Standards (Joint Committee on Powder Diffraction Standards JCPDS).

En 1978, le nom de l'organisation a été changé pour l'actuelle base de données inter nationales sur la diffraction afin de souligner l'engagement mondial de cette entreprise scientifique.



Figure II. 8. Préparation d'un échantillon pour la DRX.

La base de données internationale sur la diffraction maintient une base de données des types de diffraction de poudre, un fichier de diffraction de poudre comprenant les distances inter-réticulaire d liées aux angles de diffraction et l'intensité relative des pics de diffraction observés, les références bibliographiques, les classifications structurales, les cristaux et les propriétés physiques.

Les diagrammes peuvent être déterminés expérimentalement ou calculés en fonction de la structure cristalline et de la loi de Bragg. Le fichier de diffraction de poudre est souvent utilisé pour identifier des substances inconnues qui sont conçues pour être utilisé avec un appareil de diffraction des rayons X. La base de données est complète, avec plus de 500000 fiches en 2006 [17].

b) Méthode d'affinement Rietveld

Dans cette méthode, le diagramme de diffraction des rayons X enregistré sur la poudre (powder X-ray diffraction pattern) est calculé à partir des données structurales cristallines (crystal structural data) où le diagramme calculé (calculated pattern) est comparé et correspondant à diagramme expérimental (experimental pattern) puis affiné (refinement) (figure II. 9). Le raffinement est effectué en minimisant la somme pondérée des différences entre les intensités observées et les intensités calculées pour chaque étape du diagramme de poudre (powder pattern) [18, 19].

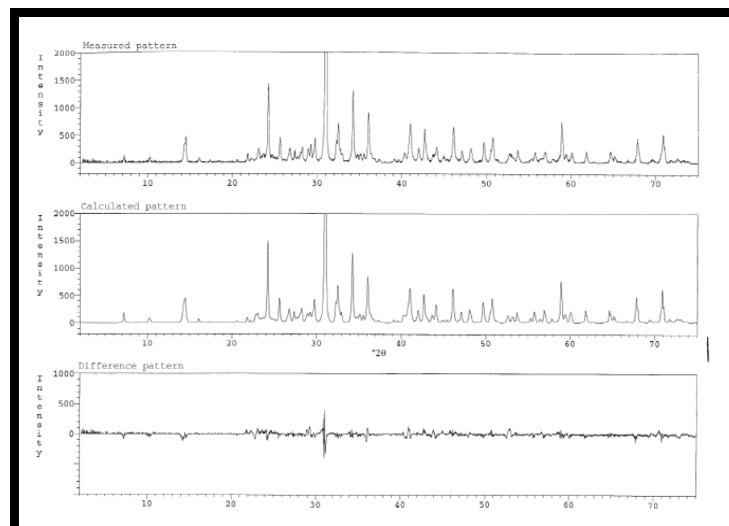


Figure II.9. La comparaison du diagramme calculé avec le diagramme expérimental selon la méthode de Rietveld [20].

La méthode de Rietveld nécessite la connaissance des phases cristallines du mélange, afin de minimiser la différence entre le diagramme de DRX expérimentale (y (obs)) et le diagramme de DRX calculée (y (calc)) [18, 19].

$$M = \sum_{i=1}^n W_i [Y_i(\text{abs}) - Y_i(\text{calc})] = \text{minimum} \quad (\text{II. 3})$$

Où:

W_i : Le poids de chaque point observe. L'addition est effectuée sur tous les points i .

L'affinement se fait point par point plutôt que par réflexion. L'intensité calculée à un pas (y (calc)) est déterminée en additionnant les contributions de fond et toutes les réflexions de Bragg adjacentes (k) pour toutes les phases (P) comme suit [21] :

$$Y_i(\text{calc}) = \sum_f S_f \sum_k P_k L_k / F_k / G(\Delta\theta_{ik}) P_k + y_i(\text{bkg}) \quad (\text{II. 4})$$

Où:

S : Facteur d'échelle (scale factor).

L_k : Facteur de polarisation de Lorentz (Lorentz-polarization factor).

F_k : Facteur de structure (structure factor).

P_k : Facteur de multiplicité (multiplicity factor).

P_k : Fonction d'orientation préférée (preferred orientation function).

θ_k : Angle de Bragg pour la réflexion (Bragg angle for reflection).

$G_{\theta_{ik}}$: Fonction de profil de réflexion (reflection profile function).

$Y_{i(\text{bkg})}$: Fond raffiné (refined background).

Pour un meilleur raffinement, les paramètres suivants peuvent être définis: paramètres de réseau ($\alpha, \beta, \gamma, a, b, c$ (lattice parameters)), positions atomiques (x, y, z) (atomic positions) et positions atomiques vacantes (atomic site occupancies), paramètres vibratoires thermiques atomiques (atomic thermal vibrational parameters) , isotrope (isotropic), asymétrie (anisotropic) ou symétrie (asymmetry) des directions des lignes, orientation préférée (preferred orientation), fonction d'arrière-plan (background function), le principe de mesure d'angle correction 2θ et paramètre d'échelle global (overall scale factor) [21].

Pratiquement, ces paramètres peuvent être entrés manuellement dans le programme de raffinement (refinement program), mais il existe maintenant des fichiers texte (text files) appelés (CIF files) qui contiennent toutes ces données pour chaque métal. Ces fichiers peuvent être trouvés dans toutes les bases des données sur internet comme (American Mineralogist crystal structure database) [17].

c) Méthode du rapport d'intensité de référence

Cette méthode est la méthode du rapport de densité de référence par rapport de densité de référence ou semi-quantitative où elle dépend du choix du corindon (Al_2O_3) comme étalon interne pour préparer le rapport d'intensité de référence (RIR) connu sous le nom de I/I_c (RIRcor).

On dit aussi elle est le rapport entre le pic le plus intense de la phase et le pic le plus intense de corindon, qui il est disponible pour de nombreuses phases dans la base de données (ICDD PDF).

Il peut être déterminé expérimentalement par des systèmes spéciaux et utilisé dans des échantillons de composition complexe [15, 22].

RIRs peuvent être définis pour n'importe quelle phase de référence en utilisant n'importe quelle ligne de diffraction et I/I_c n'est qu'un RIR dédié, où hkl (hkl)' est défini comme 100 % pour la phase et le corindon. La définition la plus générale du RIR pour la phase α par rapport à la phase β est :

$$RIR_{\alpha,\beta} = \left(\frac{I_{(hkl)\alpha}}{I_{(hkl)'\beta}} \right) \left(\frac{I_{(hkl)\alpha}^{rel}}{I_{(hkl)'\beta}^{rel}} \right) \left(\frac{X_\beta}{X_\alpha} \right) \quad (II. 5)$$

Avec :

I^{rel} : Le terme représente les intensités relatives des pics utilisés de 100% pour chaque phase.

Les RIR peuvent être attribués empiriquement à n'importe quelle phase en tant qu'un matériau d'étalonnage. Le corindon et le quartz sont couramment utilisés comme étalons internes.

En réarrangeant l'équation RIR (II.6), c'est :

$$RIR_{\alpha\beta} = \frac{RIR_{\alpha\gamma}}{RIR_{\alpha\beta}} \quad (II. 6)$$

Cette méthode peut donner des résultats quantitatifs décents car chaque phase spécifique est indépendante et elle convient aux échantillons contenant des phases indéterminées (inconnues) ou amorphes [22].

En 1974, Chung a noté que si toutes les phases sont connues et que les RIRs sont connus pour toutes les phases, alors la somme de toutes les quantités fractionnaires des phases est égale à 1, permettant de calculer la quantité de chaque phase :

$$X_{\alpha} = \frac{I_{(hkl)\alpha}}{RIR_{\alpha} I_{(hkl)\alpha}^{rel}} \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^{\# \text{ phase}} \left(\frac{I_{(hkl)'_j}}{RIR_j I_{(hkl)'_j}^{rel}} \right)} \right] \quad (II. 7)$$

Chung a appelé cette méthode « le principe adiabatique »; la méthode RIR est aujourd'hui généralement appelée calibration de Chung, qui permet des calculs quantitatifs sans étalon interne.

La détermination empirique locale des RIR utilisés peut améliorer la qualité des résultats, mais la présence des phases inconnues ou amorphes invalide l'utilisation de la méthode.

II. 5. 2. Les étapes de traitement des données de la diffraction des rayons X en utilisant le logiciel (X'Pert HighScore Plus)

Les étapes suivantes montrent comment analyser les données de DRX à l'aide du logiciel X'pert Highscore [23]:

- Détermination des pics (**Search and match**).
- Utilise (**Match**).
- Détermination des phases cristallines.

- Détermination de la concentration des phases cristallines.

X'pert Highscore prend en charge environ 27 types de formats de fichiers, notamment: .PHP, .CAF, .HPT, .XRDML, .IDF, .RD, .SD, .FD, .DI, .UDF, .LIS, .RAW, .LST, .UXD, .PRO, .DAT, .ASC, .UDS, .LHP, .RFL, .CIF, .JDX, .JCP, .PD3, .MDI et .CRY. Si votre fichier de données de XRD est autre que le format ci-dessus, alors X'pert Highscore plus ne l'ouvrira pas.

Vous pouvez toujours utiliser le convertisseur **POWDII** pour convertir votre fichier de données dans l'un des formats ci-dessus, puis le logiciel X'pert Highscore le prendra en charge.

- **Détermination les pics**

Choisir le menu (**Treatment**) et sélectionner (**Search peaks**) comme indiqué dans l'image de la **figure II. 10**.

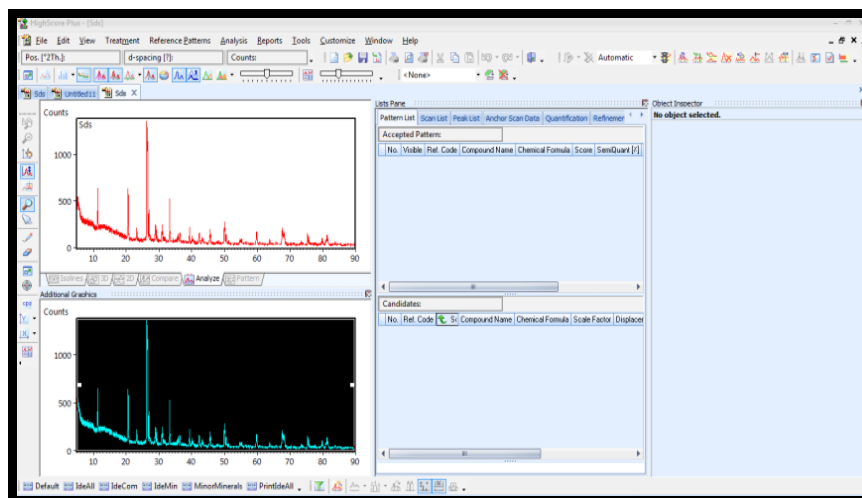


Figure II. 10. La recherche des pics.

Cliquer sur (**Search peaks**) et cliquer alors sur (**Accept**) (**figureII.11**).

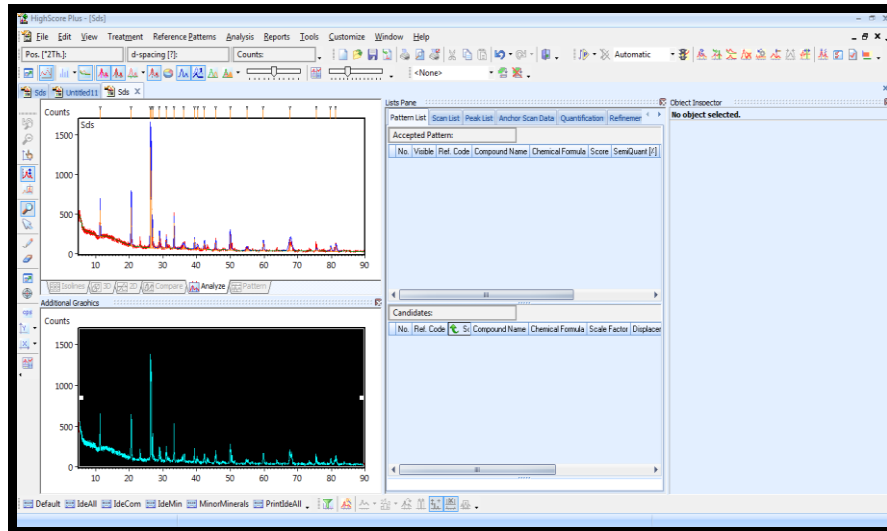


Figure II. 11. La détermination des pics.

Assurez-vous que chaque pic identifié par le logiciel (en haut du graphique) correspond à un pic dans le diagramme de diffraction. S'il manque un pic, modifiez (**Minimum tip width**) et (**Peak bas Width**) jusqu'à ce que tous les pics soient identifiés.

- **Utilise (Match)**

Dans la liste (**analysis**) sélectionnez (**search & match**) puis cliquez sur (**execute search & match**). Ajustez les paramètres si nécessaire (**parameters as necessary**) comme démontré dans la **figure II. 12**.

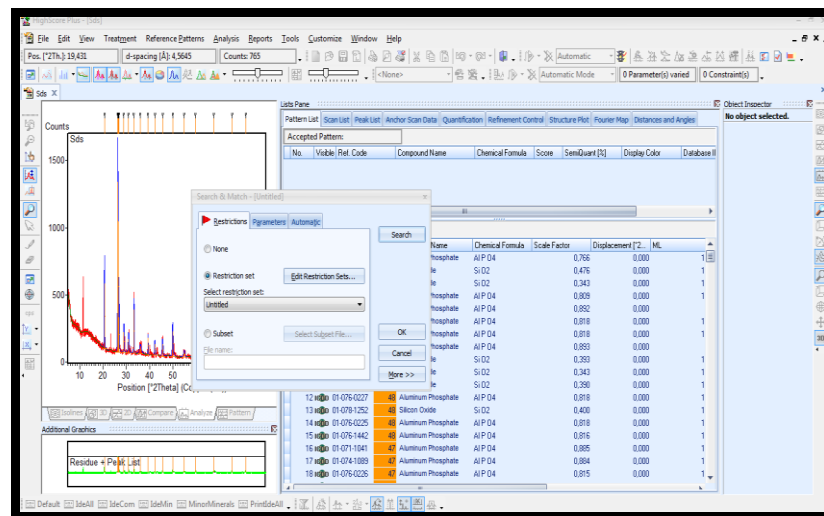


Figure II. 12. Exécutez la recherche et ajustez les paramètres si nécessaire.

- **Détermination des phases cristallines**

Le score est calculé pour tous les fichiers afin de déterminer dans quelle mesure ils correspondent aux données expérimentales et de donner la meilleure correspondance. Lorsque la carte JCPDS (phase cristalline) avec la meilleure correspondance est acceptée; elle est déplacée vers la région acceptée dans la liste des schémas (figure II. 13). Le processus est répété pour toutes les autres phases.

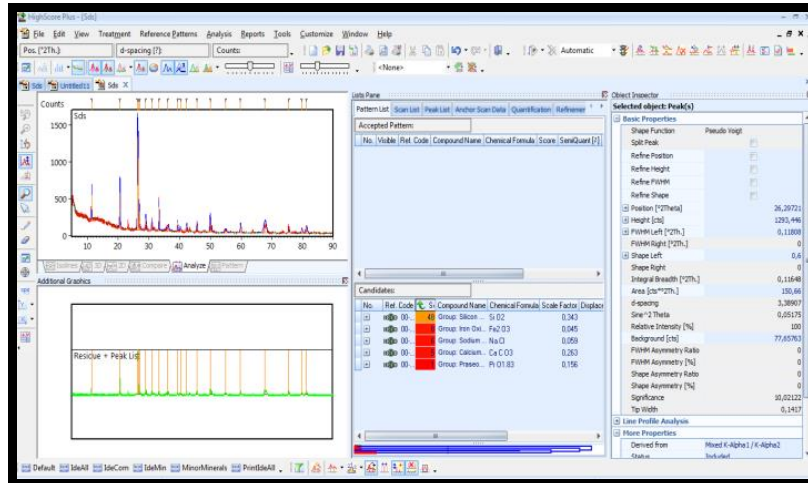


Figure II. 13. Déterminer les phases cristallines les mieux adaptées.

- **Détermination de la concentration des phases cristallines**

En déterminant les phases cristallines du schéma étudié, la concentration de chacune d'entre elles est automatiquement calculée (figure II. 14).

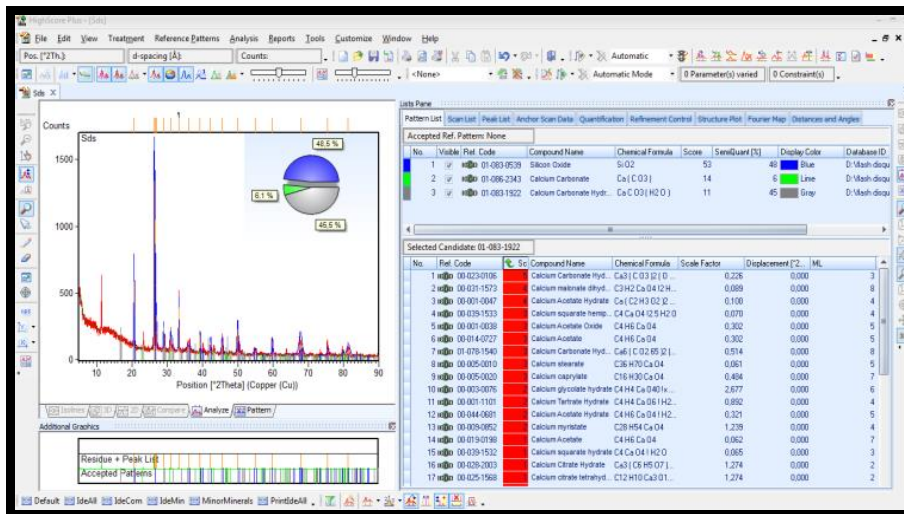


Figure II. 14. Détermination de la concentration des phases cristallines.

II. 6. La spectroscopie d'absorption infrarouge à transformation de Fourier (FTIR)

FTIR est une analyse fondée sur l'absorption du rayonnement infrarouge par le matériau analysé [24], qui est utilisée afin d'identifier les bandes chimiques des composés moléculaires organiques, inorganiques, cristallins ou amorphes (la liaison chimique dans un matériau) et déterminer la pureté et la nature des matériaux [25]. Cette technique ne nécessite pas de grandes quantités d'échantillons pour la mesure. Cet échantillon peut être dans l'un des états connus de la matière (solide, liquide, gaz) [26].

II. 6. 1. Principe

Le principe de FTIR est basé sur l'interférence entre le spectre de ces rayons et les liaisons chimiques des matériaux.

L'absorption des rayons infrarouges entraîne une interférence entre le champ électrique de fréquence appropriée des rayons passants avec le champ électrique généré par le moment dipolaire électrique de la liaison chimique des molécules du matériau. En cas d'accord entre les deux fréquences de ces deux champs, il se produit une absorption qui transfère la liaison chimique d'un niveau vibrationnel bas à un niveau vibrationnel supérieur puis revient aux niveaux plus stables et rayonne l'énergie absorbée, et cette absorption se traduit par une augmentation du mouvement vibrationnel, ou du mouvement de rotationnelle des molécules [27].

Cette analyse spectroscopique est repose principalement sur les rayons infrarouges absorbés, à travers lesquels l'identité des matériaux étudiée est révélée en fonction des propriétés vibrationnelles de ses liaisons chimiques, où ces rayons fournissent la quantité d'énergie qui peut provoquer des transitions entre les niveaux vibrationnels et rotationnels des liaisons chimiques, mais cette énergie n'est pas capable de provoquer des transitions électroniques [28].

II. 6. 2. Les modes de vibration

L'absorption des rayons infrarouges fait un mouvement vibrationnel des atomes qui composent la molécule, qui crée une variation périodique, ou des variations des angles entre les liaisons chimiques.

Chaque mouvement vibrationnel peut résulter du mouvement à deux atomes ou plusieurs atomes. L'énergie infrarouge absorbée dépend de la masse de l'atome mis en jeu ainsi que de la force des liaisons formant la molécule et de la forme géométrique des atomes à l'intérieur de la molécule. Les modes de vibration sont classés en deux catégories [29-31]:

- **Mode d'élongation (stretching)**

Le mode d'élongation coïncide d'un changement de la distance entre les atomes dans la direction de l'axe de la liaison cependant les angles et les axes qui constituent ces liaisons restent constants. La **figure II. 15** indique le type symétrique et le type antisymétrique de la mode d'élongation.

- **Mode de flexion (bending)**

Le mode de flexion concorde d'un changement de l'angle de direction des liaisons infèrent une déformation de l'angle qu'elles font entre elles (torsion et cisaillement) ou une oscillation des liaisons autour d'un axe sans déformation de l'angle (balancement et rotation pure). La **figure II. 16** représente les différents types de ce mode.

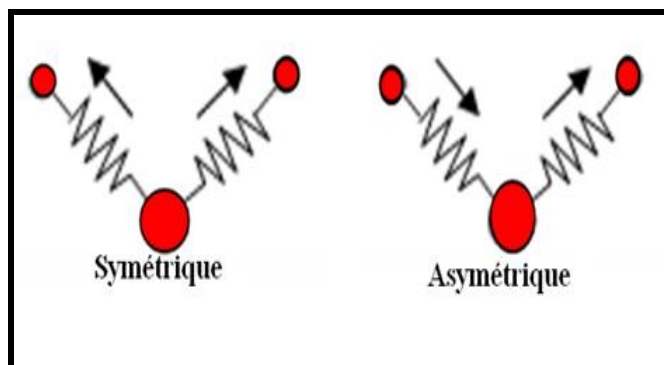


Figure II. 15. Modes d'élongation.

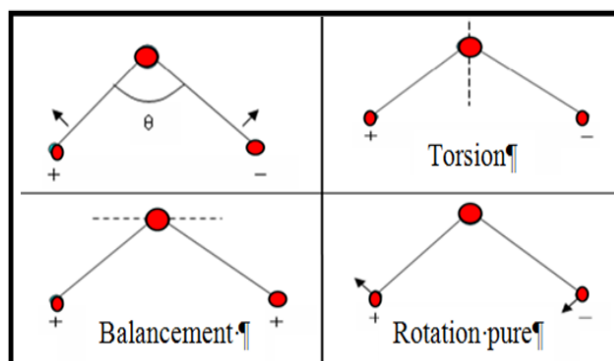


Figure II. 16. Modes de flexion (bending).

II. 6. 3. Modèle du vibreur harmonique (modèle classique)

Le modèle de vibreur harmonique est l'un des modèles les plus simples pouvant expliquer les caractéristiques de l'expansion vibrationnelle de la liaison chimique, qui est constituée à deux masses réunies reliées l'une à l'autre par un ressort (figure II. 17).

Le changement périodique de la distance entre les deux masses se traduit par une vibration qui appelle mouvement harmonique simple. Comme tous les modèles classiques des phénomènes à l'échelle atomique sont une approximation de la vérité, il donne cependant des résultats acceptables pour le mouvement vibrationnel de la molécule diatomique.

Pour simplifier la solution mathématique, on peut considérer comme l'une des deux masses se déplace tandis que l'autre masse reste constante. Si la masse est déplacée d'une distance de Δx par rapport à la position d'équilibre, par la force de son influence sur l'axe du ressort, une force de rappel basé sur la loi Hook [28].

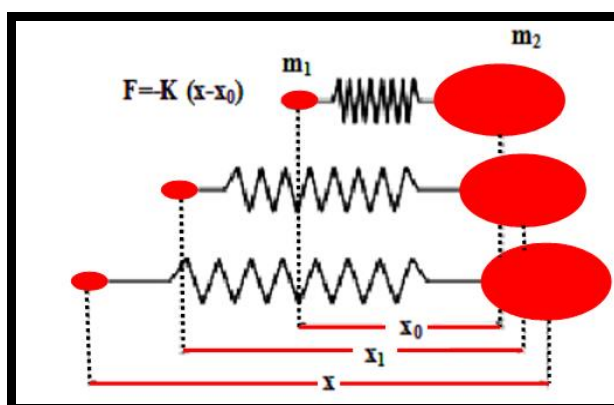


Figure II. 17. Modèle classique (l'oscillateur harmonique).

$$F = -K\Delta X \quad (II.8)$$

Avec :

F : la force de rappel (N).

K : la constante de rappel (N/m).

II. 6. 4. Description d'un spectromètre de FTIR

Le spectromètre de FTIR composé de trois unités principales :

- Une source émettant un rayonnement infrarouge ;
- Le support d'échantillons ;
- Un détecteur.

Le principe du spectromètre FTIR est assez simple relativement et la plupart des instruments actuels se repose sur l'interféromètre de Michelson (**figure II. 18**) [32, 33].

Il se compose de deux miroirs perpendiculaires, dont l'un est mobile tandis que l'autre reste immobile, qui sont séparés par une séparatrice placée au centre du montage et inclinée de 45° par rapport à la direction de propagation du faisceau incident [34].

La source ponctuelle émet un rayonnement et il atteint la séparatrice de faisceau, qui divise en deux parties équivalentes: 50 % de ce rayonnement sont réfléchis par la séparatrice en direction du miroir immobile et 50 % est transmis par la séparatrice en direction du miroir mobile [35].

Ensuite, les deux faisceaux sont réfléchis aux surfaces des deux miroirs et repartent à la séparatrice de faisceau, où ils se recombinent et interfèrent. Cela crée une différence de parcours optique entre les deux faisceaux, ce qui conclut une apparition d'interférences constructives ou destructives en fonction de la position du miroir mobile par rapport au miroir immobile [36]. Le mouvement du miroir mobile permet de balayer l'ensemble de la plage de longueurs d'onde [37].

Le faisceau résultant traverse ensuite l'échantillon et atteint finalement le détecteur pour être converti en un signal électrique.

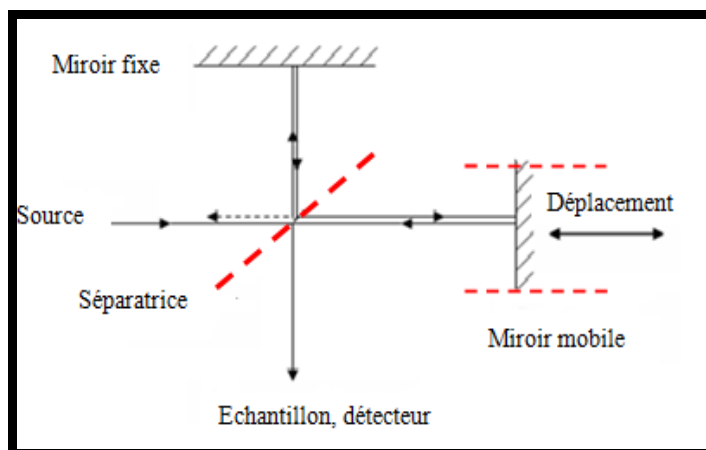


Figure II. 18. Schéma de principe d'un spectromètre de FTIR d'un interféromètre de Michelson.

II. 6. 5. Appareillage expérimentale

Dans cette étude, nous avons utilisé un spectromètre de FTIR-modèle (IR Affinity-1), qui fabriqué par une société japonaise (Shimadza), ce spectromètre disponible au laboratoire de valorisation des ressources et de la technique de la déserte unité de développement des énergies renouvelables dans les zones arides (U.D.E.R.Z.A) à l'université d'Echahid Hamma Lakhdar à El Oued.

Ce dernier permet d'observer des radiations infrarouges dans la gamme $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. La **figure II. 19** indique une photographie du spectromètre infrarouge (IR Affinity-1).



Figure II. 19. Photo de spectromètre infrarouge de type Shimadzu modèle IR Affinity-1 utilisé.

II. 6. 6. Préparation des échantillons

Nous avons mélangé 2 mg de poudre d'échantillon lentement et homogène avec 198 mg du bromure de potassium (KBr), puis le mélange a été pressé à l'aide d'un piston, pour former un disque avec un diamètre de 13 mm et une épaisseur de 1 mm. La **figure II. 20** montre les outils utilisés dans la préparation des échantillons ont analysé.

II. 7. Fluorescence des rayons X (XRF)

La fluorescence des rayons X (XRF) est une technique analytique qui utilise l'interaction des rayons X avec un matériau pour déterminer sa composition élémentaire. XRF convient aux solides, liquides et poudres. C'est un puissant outil d'analyse quantitative et qualitative. De plus, la XRF est largement utilisée pour une caractérisation rapide, précise, non destructive et ne nécessite généralement qu'une préparation minimale de l'échantillon [38].

II. 7. 1. Principe

L'analyse de XRF nécessite des sources de hautes énergies dites les rayons X primaires. Les atomes d'un échantillon sont irradiés par des rayons X primaires. Ces rayons excitent les électrons (un ou plusieurs) des couches électroniques internes (E_0) d'atome, qui éjecté de leurs orbitales atomiques et passe à un niveau d'énergie supérieure. Pour retour à l'état d'équilibre, un électron d'une couche électronique externe (E_1) vient remplacer l'électron éjecté, qui il est libéré d'énergie sous forme des rayons X caractéristiques de chaque élément chimique (**figure II. 21**) [8, 39].

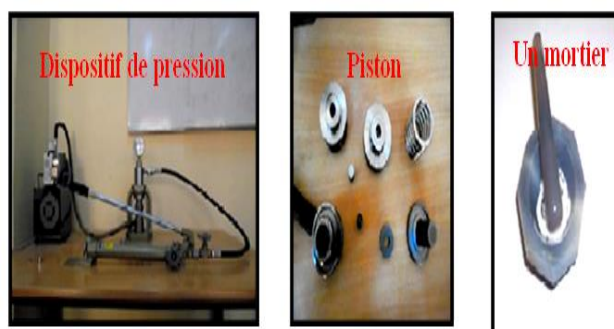


Figure II. 20. Les outils utilisés dans la préparation des échantillons pour l'analyse.

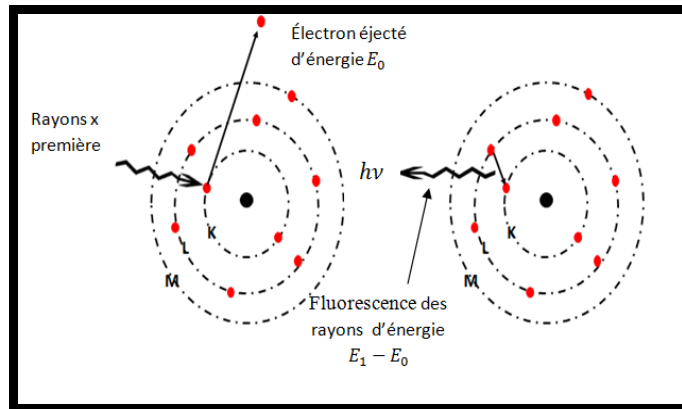


Figure II. 21. Figure représente le phénomène de XRF.

II. 7. 2. Description de l'analyseur XRF

Malgré les nombreux modèles des spectromètres des fluorescences des rayons X mais ils partagent tous trois parties principales : la source de génération de rayons X primaires (source de rayonnement primaire), les portes (support) d'échantillon et un détecteur. Pour les sources de génération des rayons X primaires, il existe une variété d'unités de génération de rayons X primaires qui nous fournissent suffisamment des énergies pour détecter tous les éléments dans le matériau étudié [40-43].

- **Le tube des rayons X**

Ce tube est l'une des sources les plus courantes, qui peut envoyer une large distribution des énergies des rayons X à haute intensité. Dans le tube des rayons X, une tension électrique plus élevée est établie entre la cathode et l'anode, les électrons émis par la cathode sont ainsi accélérés et focalisés sur l'anode, qui refroidit par une circulation d'eau. On génère alors des faisceaux de rayons X sortis du tube par le freinage d'électrons fenêtre latérale ou frontale.

Les cibles secondaires : Il est intégré avec le tube des rayons X. il produit des rayons X monochromatiques, qui peut être interagi avec l'échantillon et qui est aussi possible de choisir un matériau spécifique comme cible pour obtenir des propriétés parfaites des rayons X afin d'excitation tout élément attendu dans l'échantillon.

Sources radioactives : telles que ^{55}Fe , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{241}Am et ^{244}Cm . Ce type de source envoie des énergies discontinuité afin d'interagir avec l'échantillon.

- **Les détecteurs**

Plusieurs différents types sont utilisés mais le plus connu est les détecteurs utilisant un gaz, les semi-conducteurs (Si-Li) et ceux fonctionnant à la température ambiante. Son principe est basé sur la technique d'interagir entre le rayonnement et le matériau utilisé dans le détecteur.

- **Porte d'échantillon**

Il existe des portes des échantillons afin d'analyser les matériaux, qui adopté avec le dispositif.

II. 7. 3. Appareillage expérimentale

Dans cette étude, l'appareil de fluorescence des rayons X a été utilisé du type Philips Cubix ED-XRF, qui fonctionne selon le spectromètre de dispersion de longueur d'onde ([figure II. 22](#)). Il existe dans l'usine de ciment à Aintouta, wilaya de Batna.

L'appareil XRF utilisé dépend sur la projection d'un faisceau des rayons X primaires sur l'échantillon, qui conduit à l'ionisation des atomes des éléments de cet échantillon et exhorté pour qu'ils émettent des rayons X caractéristiques à chaque élément. Les rayons X caractéristiques émis par l'échantillon sont dirigés vers le détecteur, qui collecte, analyse et détermine les éléments qui présentent dans cet échantillon [\[43\]](#).

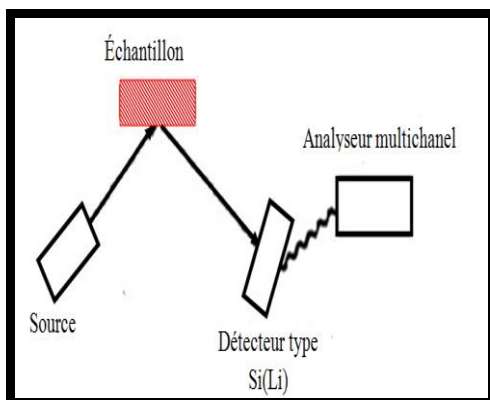


Figure II. 22. L'appareil des fluorescences des rayons X utilisé [\[43\]](#).

II. 7. 4. Préparation des échantillons

L'échantillon a été broyé automatiquement avec quelques gouttes Trielthanolamine ($C_6H_{15}NO_3$) pendant 5 minutes. Ce matériau ($C_6H_{15}NO_3$) n'affecte pas les résultats de mesures, Il est généralement utilisé pour refroidir l'appareil pendant le broyage (**figure II. 23**), ainsi que la consistance de l'échantillon pendant la compression. Après cela, l'échantillon est compressé pendant 5 minutes pour former un disque de 3.5 cm de diamètre (**figure II. 24**).



Figure II.23. Photo d'équipement de broyage de la technique ED-XRF [43].



Figure II. 24. Figure montre l'appareil de compression des échantillons et la méthode de compression [43].

II. 7. 5. Analyse qualitative et analyse quantitative

- **Analyse qualitative**

L'analyse XRF par la méthode qualitative permet de déterminer les différents éléments constituant l'échantillon ou du mélange de matériaux composant les échantillons étudiés mais il n'a pas identifié la quantité et la concentration de ces éléments dans cela.

- **Analyse quantitative**

Ce type d'analyse permet de déterminer la quantité des chaque éléments qui compose l'échantillon. Il est donné l'intensité de la raie caractéristique d'un chaque élément présent dans l'échantillon. Il est reposé sur la présence d'échantillons de référence (standard) d'intensité et d'une concentration est connu. Il peut calculer la concentration selon la relation suivante [43]:

$$\frac{C_{St}}{C_{ech}} = \frac{I_{St}}{I_{ech}} \text{ Alors } C_{ech} = \frac{I_{ech}}{I_{St}} C_{St} \quad (\text{II} - 9)$$

Avec :

C_{St} : Concentration d'échantillon de référence.

C_{ech} : Concentration d'échantillon étudié.

I_{St} : L'intensité d'échantillon de référence

I_{ech} : L'intensité d'échantillon étudié.

II. 8. Microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

II. 8. 1. La microscopie électronique à balayage (MEB)

La caractérisation par le MEB est un procédé très rapide, qui apporte des informations sur la topographie des surfaces sous forme d'images lumineuses. Cette technique fournit aussi des informations sur la structure, la texture d'un échantillon, la taille et la forme des grains élémentaires ou agglomérats selon le grossissement choisi [8].

II. 8. 1. 1. Principe

Pour obtenir l'image de MEB, comme le montre la **figure. II. 25** (les éléments de MEB), se fit par l'étude de l'interaction entre l'échantillon étudié ou la cible avec les faisceaux très fins d'électrons primaires. Transférer ensuite le signal du détecteur à l'écran cathodique dont l'essuyage coïncide entièrement avec le faisceau d'électrons tombé [35].

L'interaction d'un faisceau d'électrons avec l'échantillon étudié se produise différentes émissions des particules. Ses particules sont analysées avec le détecteur qui peut être : les électrons primaires, les électrons secondaires et les électrons rétrodiffusés (**figure II. 26**).

- **Les électrons primaires**

Les électrons primaires (canon) de faisceau incident peuvent produire électrons rétrodiffusés d'autres transmettent une partie de leurs énergies ce qui va donner naissance des électrons qui appelé des électrons secondaires et aussi à des rayons X [44].

- **Les électrons secondaires**

En raison de l'interaction inélastique du faisceau des électrons primaires avec les atomes (l'échantillon) produits les électrons secondaires. Les électrons primaires peuvent transmettre une partie de son énergie à des électrons d'atome (l'échantillon).

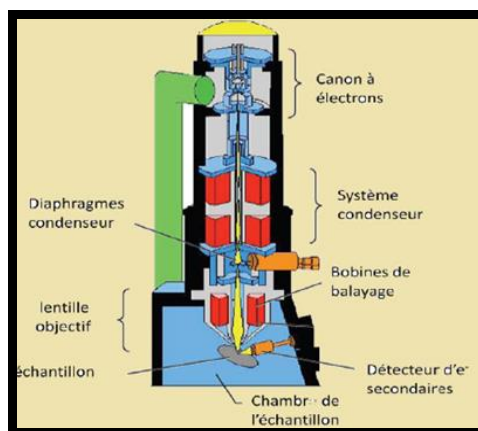


Figure II. 25. Représentation schématique des éléments de MEB [36].

Ce qui conduit à l'ionisation en éjectant ce dernier électron. Son énergie cinétique possède en moyenne une énergie de l'ordre de quelques électrons-volts, où chaque électron primaire peut créer plusieurs électrons secondaires [44].

- **Les électrons rétrodiffusés**

La collision élastique et inélastique entre les électrons primaires et les noyaux d'atomes (l'échantillon) produits les électrons rétrodiffusés. Où l'électron primaire est dévié sans perte d'énergie cinétique dans le cas d'une collision élastique et dans le cas d'une collision inélastique, une partie de l'énergie cinétique de l'électron primaire est transférée au matériau sous forme de rayonnement électronique par le ralentir [44].

II. 8. 2. La spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

Le MEB est un dispositif d'analyse qui peut donner des informations sur l'observation de la topographie des surfaces mais le MEB utilisé en mode EDS permet l'identification de la composition chimique élémentaire et de la distribution des éléments chimiques sur une plage dans l'échantillon analysé.

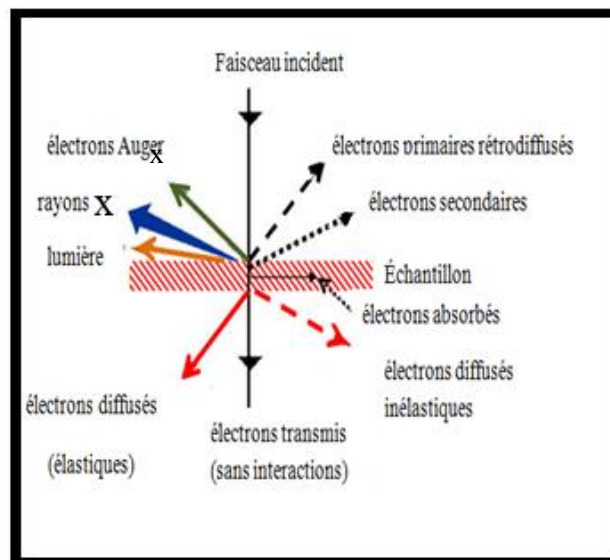


Figure II. 26. Illustration schématique de l'interaction entre le faisceau d'électrons et la surface de l'échantillon.

II. 8. 2. 1. Principe

Son principe repose sur l'interaction des électrons incidents avec le nuage d'électrons des atomes de l'échantillon. Il en résulte une perte d'énergie par la formation de paires électrons-trous dans l'échantillon, caractéristique de l'excitation des niveaux d'électrons profonds dans l'échantillon, qui excite les atomes à l'état fondamental conduisant à une émission des rayonnements caractéristiques des dont les rayons X. Ils ont l'énergie caractéristique des atomes de l'échantillon analysé.

Ces photons sont recueillis et classés suivant leur énergie (Electron Dispersion Spectroscopy (EDS)) ou leur longueur d'onde (Wave Dispersion Spectroscopy (WDS)) pour donner des informations sur la composition de l'échantillon à étudier [45].

II. 8. 2. Appareillage expérimentale

La [figure II. 27](#) présente une vue d'ensemble de l'appareillage utilisé. Le microscope est un (modèle Zeiss EVO, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany) équipé d'un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie (EDS). Cet appareillage disponible au Centre de Recherche en Sciences et Techniques d'Analyses Physicochimiques (CRAPC) à Ouargla.



Figure II. 27. Appareil MEB équipé d'un détecteur EDS utilisé pour l'analyse.

II. 8. 3. Préparation des échantillons

La **figure II. 28** présente une vue d'ensemble de la méthode de préparation des échantillons pour cette analyse où ces échantillons ont été déposés sur des supports en aluminium et ils ont aussi été utilisés sous leur forme naturelle, c'est-à-dire sans broyage.

II. 9. Distribution granulométrique par diffraction laser

La distribution granulométrique est une propriété physique très importante dans l'étude des matériaux puisqu'elle permet de fournir des renseignements fondamentaux pour la caractérisation des roches et la description des processus géologiques en sciences de la terre, y compris la sédimentologie, la stratigraphie, la géologie structurale, la pédologie et la volcanologie.

Au cours des trois dernières décennies, les analyseurs de granulométrie à diffraction laser se sont avérés être un outil efficace pour fournir des distributions de granulométrie de roches et de sols peu cohérents. En effet, ils nécessitent peu de temps pour l'analyse, couvrent une large gamme des tailles et nécessitent des échantillons de petites quantités, ce qui facilite les études très détaillées de la distribution granulométrique des structures géologiques.

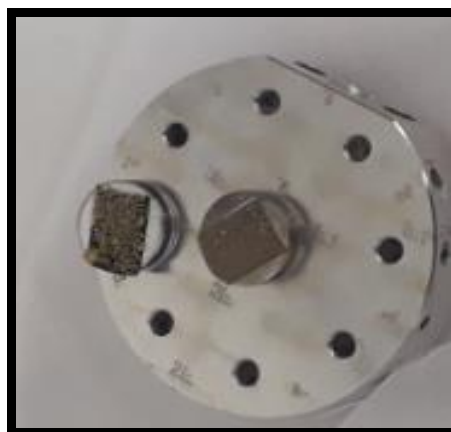


Figure II. 28. Figure présenter la préparation des échantillons pour la caractérisation avec MEB-EDX.

II. 9. 1. Principe

La diffraction laser est plus correctement appelée diffusion de la lumière laser. Son principe est que les particules diffusent la lumière dans toutes les directions avec un schéma d'intensité qui dépend de la taille des particules; plus la particule est grande, plus l'angle est petit et plus l'intensité de la diffusion est élevée. L'angle de diffusion est inversement proportionnel à la taille des particules et l'intensité du faisceau diffracté à n'importe quel angle est une mesure du nombre de particules avec une surface de section transversale spécifique dans le trajet des faisceaux [46].

L'échantillon à analyser est inséré dans le passeur d'échantillon. Ce dernier dispose d'un agitateur et d'une pompe, faisant ainsi circuler l'échantillon à travers une lentille située au niveau de la granulométrie. Deux faisceaux laser sont utilisés pendant la mesure. Leur diffraction est mesurée par l'intensité du rayonnement reçu par les deux ensembles de capteurs.

Le signal mesuré par le capteur est ensuite modélisé à l'aide de la théorie de Mie. La distribution granulométrique est déduite d'un ajustement du signal théorique mesuré. La distribution volumique des tailles de particules est ainsi obtenue (figure II. 29) [47].

L'échantillon est inséré dans le passeur, où le passeur les fait transiter au travers d'une lentille vers une pompe. Ils sont ensuite rendus au passeur, en circuit fermé [48].

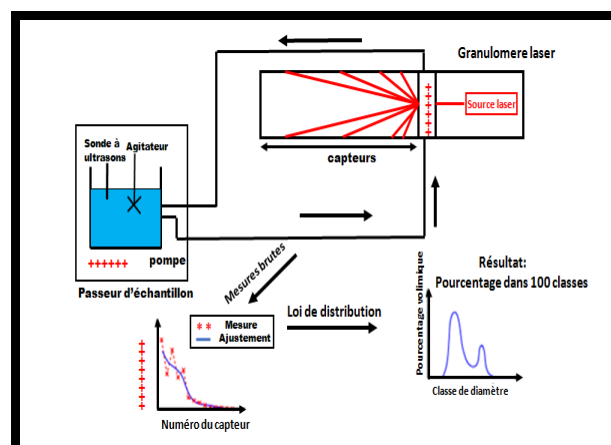


Figure II. 29. Schéma de la granulométrie laser (échantillon liquide).

II. 9. 1. 1. La théorie de Mie

La théorie de Mie (LMT) a été introduite en 1908 par un physicien allemand Gustav Mie. Depuis, ce dernier est le plus largement utilisé pour la description des propriétés de diffusion et d'absorption de la lumière par des petites particules.

Le principe de l'appareil LA-960 est reposé sur la théorie de Mie, qui présente la diffusion de la lumière comme un phénomène de résonance.

Lorsqu'un rayon lumineux d'une certaine longueur d'onde arrive sur une particule, celle-ci rentre dans un régime vibratoire électromagnétique à la même fréquence que celle de la lumière incidente. La particule rayonne l'énergie reçue comme une station relais. Dans le modèle de Mie il existe donc une corrélation entre la section efficace optique et la taille de la particule, de même qu'entre la longueur d'onde et l'indice de réfraction des particules et le milieu [49, 50].

II. 9. 2. Appareillage expérimentale

La distribution granulométrique des échantillons a été mesurée avec la technique de diffraction laser (LA-960 HORIBA) (figure II. 30). Cet appareillage est disponible dans la Laboratoire de Rayonnement et Plasmas et Physique des Surfaces (LRPPS), Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière, Département de Physique, Université d'Ouargla.



Figure II. 30. Photographie de l'appareil Partica LA- 960 (HORIBA) qui utilisé dans l'analyse.

L'analyseur de taille des particules HORIBA LA-960 la technique de dimensionnement moderne la plus populaire. Le principe de la diffraction laser est qu'une particule diffusera la lumière à un angle déterminé par la taille de cette particule. Partica LA-960 nécessite un échantillon allant de 10 mg à 5 g et le temps nécessaire pour effectuer l'analyse est 60 secondes, il opéré entre 10 nanomètres à 5 millimètres. Les Sources lumineuses utilisés dans cet analyseur sont diode solide laser rouge 5 MW (650 nm) et solide bleu LED de 3 mégawatts (405 nm) [50].

II. 9. 3. Préparation des échantillons

Dans cette analyse, les échantillons ont été utilisés sous leur forme naturelle comme le montre la **figure II. 31**. Ils sont placés dans une mangeoire sèche et les conditions à appliqué sont fixées. Après quelques secondes, le résultat est délivré sous la forme d'un tableau des données et un graphe.



Figure II. 31. Figure montre comment placer l'échantillon pour l'analyse.

Références Bibliographiques

- [1] Allam, A., Tirichine, A., Cheloufi, H., Arif, Y., Tama, M., Mimouni, A. (2013). Etude de la diversité biologique des espèces maraichères cultivées dans les palmeraies de la vallée d'Oued Righ (Cas de la région de Touggourt). *Bio Ressources*, **3**, 64-71.
- [2] Moussa, H., Karim, S., Salah eddine, D. O. U. M. A. N. D. J. I. (2015). Diversity and richness of rodent communities in various landscapes of Touggourt Area (Southeast Algeria).
- [3] Hadjoudj, M., Manaa, A., Derdoukh, W., Guerzou, A., Souttou, K., Sekour, M., Doumandji, S. (2011). Les rongeurs de la région de Touggourt. Actes du Séminaire International sur la Biodiversité Faunistique en Zones Arides et Semi-aride, ENSA Alger, 244-251.
- [4] Amiri, K., Bekkari, N., Débbakh, A., Benmalek, A., Bouchahm, N. (2017). Caractérisation des eaux usées des rejets domestiques de la ville de Touggourt (Algérie). *J. Algér. Rég. Arid*, **14**, 104-108.
- [5] Ghania, O., Zouibdia, G., Mieida., K. (2008). In: Bonis A Démonologie des vers de terre de deux Palmeraies dans une région saharienne "Oued Righ" Touggourt, 1^{er} edn. TEC and DOC, Paris.
- [6] Koull, N., Benzaoui, T., Sebaa, A., Kherraze, M. E., Berroussi, S. (2016). Grain size characteristics of dune sands of the Grand Erg Oriental (Algeria). *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, **13**, 1.
- [7] Boudraa, M., Boudraa, I. (2017). Synthèse et étude structurale par diffraction des rayons X des phosphates mixtes des métaux à valences II, III et V.
- [8] Leng, Y. (2009). *Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods*. John Wiley - Sons.
- [9] Lalitha, S., Karazhanov, S. Z., Ravindran, P., Senthilarasu, S., Sathyamoorthy, R., Janabergenov, J. (2007). Electronic structure, structural and optical properties of thermally evaporated CdTe thin films. *Physica B: Condensed Matter*, **387 (1-2)**, 227-238.
- [10] Guymont, M. (2003). *Structure de la matière. Atomes, liaisons chimiques et cristallographie*.
- [11] Iadonisi, G., Cantele, G., Chiofalo, M. L. (2014). *Introduction to Solid State Physics and Crystalline Nanostructures*. Berlin: Springer.
- [12] Ingham, B., Toney, M. F. (2014). *X-ray diffraction for characterizing metallic*

films. In *Metallic films for electronic, optical and magnetic applications* (pp. 3-38). Wood head Publishing.

[13] Stoilova, D., Koleva, V., Vassileva, V. (2002). Infrared study of some synthetic phases of malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$)–hydrozincite ($\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$) series. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Bio molecular Spectroscopy*, **58** (9), 2051-2059.

[14] Hamzaoui, F., Bettahar, N. (2001). *Cristallographie cours et exercices*, Elbayane.

[15] Serna, F., Lagneau, J., Carpentier, J. M. (2014). La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques. *Chim. Nouv*, 1-12.

[16] Hauff, P. L., VanTrump Jr, G. (1976). *Laboratory Manual Mineral X-Ray Diffraction Data Retrieval/Plot Computer Program (76-407)*. US Dept. of the Interior, Geological Survey.

[17] Wong-Ng, W., McMurdie, H. F., Hubbard, C. R., Mighell, A. D. (2001). JCPDS-ICDD research associate ship (cooperative program with NBS/NIST). *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, **106** (6), 1013.

[18] Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of applied Crystallography*, **2** (2), 65-71.

[19] Rietveld, H. M. (1967). Line profiles of neutron powder-diffraction peaks for structure refinement. *Acta Crystallographica*, **22** (1), 151-152.

[20] BEDDIAF Samiha. (2016). Determination of the molecular composition and the quartz concentration in the different granular types of Ouargla dunes sand using spectroscopic techniques (thesis de doctorat).

[21] BOUHA Faiza Nabila. (2015). Détermination de la composition minéralogique d'un clinker bélitique et de l'activité pouzzolanique par la méthode Rietveld (thèse de magistère).

[22] Lutterotti, L., Ceccato, R., Dal Maschio, R., Pagani, E. (1998). Quantitative analysis of silicate glass in ceramic materials by the Rietveld method. In *Materials Science Forum*. **278** (281), 87-92.

[23] Gao, X., Chen, X., Gu, M., Xiao, C., Peng, S. (2012). Fabrication and characterization of Li_4SiO_4 ceramic pebbles by wet method. *Journal of Nuclear Materials*, **424** (1-3), 210-215.

[24] Oliva, A. I., Solís-Canto, O., Castro-Rodríguez, R., Quintana, P. (2001). Formation of the band gap energy on CdS thin films growth by two different

techniques. *Thin solid films*, **391** (1), 28-35.

[25] Reig, F. B., Adelantado, J. G., Moreno, M. M. (2002). FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and silica (quartz) mixtures using the constant ratio method. Application to geological samples. *Talanta*, **58** (4), 811-821.

[26] Schneller, T., Waser, R., Kosec, M., Payne, D. (Eds.). (2013). *Chemical solution deposition of functional oxide thin films (1-796)*. Vienna: Springer Vienna.

[27] Derrick, M. R., Stulik, D., Landry, J. M. (2000). *Infrared spectroscopy in conservation science*. Getty Publications.

[28] Polfer, N. C., Dugourd, P. (Eds.). (2013). *Laser photo dissociation and spectroscopy of mass-separated biomolecular ions 83*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

[29] Stuart, B. H. (2004). *Infrared spectroscopy: fundamentals and applications*. John Wiley Sons.

[30] Michelson, A. A. (1891). XXXVIII. On the application of interference-methods to spectroscopic measurements.—I. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **31** (191), 338-346.

[31] Bohic, M. (2007). *Caractérisation de la surface de pigments traités par des polyesters acryliques (thèse de doctorat)*.

[32] Gorton, L. (Ed.). (2005). *Biosensors and modern biospecific analytical techniques*. Elsevier.

[33] Freiman, G. (2006). *Dépôt séquentiel de monocouches d'oxyde par voie humide pour la microélectronique (Thèse de doctorat)*.

[34] NAGAMOUTTOU, C. (2006). *Traitement thermique et caractérisation physico-chimique de matériau carbonés (rapport de stage, Centre de recherche sur la matière divisé, Université d'Orléans)*.

[35] Habiba, B. (2013) *L'effet de la température du substrat et de la molarité sur les propriétés des couches hachées de soufre de zinc déposées par spray ultrasonique (thèse de doctorat)*.

[36] Chennoufi, A. (2012). *L'effet de la molarité et de la température du substrat sur les Propriétés des couches minces d'oxyde d'indium déposées Par spray ultrasonique (Thèse de doctorat)*.

[37] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.

[38] Sánchez, H. J. (2001). *Detection limit calculations for the total reflection*

techniques of X-ray fluorescence analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **56 (11)**, 2027-2036.

[39] Shackley, M. S. (Ed.). (2010). *X-ray fluorescence spectrometry (XRF) in geoarchaeology*. Springer Science - Business Media.

[40] Meyers, R. A. (2016). *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation*, **1 (3)**. Analytical Chemistry.

[41] Bayouli, I. (2016). *Application de la spectrométrie de fluorescence X à l'analyse in situ des métaux dans les sols contaminés (thèse de doctorat)*.

[42] Granget, E. (2017). *Caractérisation du champ de détection de l'appareil XRF*.

[43] MEHDADI Naouia. (2017). *Détermination de la composition des principaux types de couleur des dunes de sable de la région d'Ouargla et détermination de la cause de leur coloration à l'aide de méthodes spectroscopiques, (thèse de doctorat)*.

[44] Barir, R. (2018). *Caractérisation Spectroscopique des Couches minces d'oxyde de Nickel (NiO) Elaborées par Spray (thèse de doctorat)*.

[45] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.

[46] Ballard, T., Beare, S. (2013). *Particle size analysis for sand control applications*. In *SPE European Formation Damage Conference - Exhibition*. One Petro.

[47] Grangeon, T. (2012). *Etude multi-échelle de la granulométrie des particules fines générées par érosion hydrique: apports pour la modélisation (thèse de doctorat)*.

[48] Michel, F., Courard, L. (2006). *Apport de la granulométrie laser dans la caractérisation physique des fillers calcaires*. In *Journées Scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation dans le domaine du Béton*.

[49] R. Desai, V. Mankad, S. K. Gupta, P. K. Jha. (2012). *Size distribution of silver nanoparticles: UV-visible spectroscopic assessment*. *Nano science and nanotechnology letters*, **4 (1)**, 30-34.

[50] Meyers, R. A. (2016). *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation*, **1 (3)**. Analytical Chemistry.

Chapitre III

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de différentes techniques d'analyse, qui étudient les propriétés structurales et physico-chimiques des trois séries d'échantillons de sable prises de deux régions de Touggourt El-kobra dans le sud-ouest d'Algérie. Nous avons interprété et discuté les résultats obtenus dans le but de valoriser les ressources naturelles abandonnées dans les grandes surfaces de sud algérien et explorer leur utilisation dans les différents domaines industriels.

III. 1. Discussion des résultats de diffraction des rayons X (DRX)

III. 1. 1. Identification des composants cristallins des sables

Les résultats de DRX (**figure III. 1**) ont montré que les sables des dunes de la région de Sidi Slimane et de la région de Zaouïa El-Abidia sont principalement composés de trois phases cristallines : le quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3) et le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mais le sable de construction de la région de Sidi Slimane est formé principalement de deux phases cristallines qui sont le quartz (SiO_2) et le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

La hauteur du pic de DRX enregistré sur un échantillon indique la quantité de phase et le degré de sa cristallisation [1]. L'intensité du faisceau diffracté des plans cristallins parallèles détermine la concentration de cette phase. Il y a souvent des phases cristallines secondaires inobservables dans les diagrammes de DRX car leur cristallisation et leur pourcentage d'existence dans cet échantillon sont faibles.

La **figure III. 1** représente les diagrammes de la diffraction des rayons X (DRX) des échantillons.

Les résultats de DRX montrent que tous les échantillons de sable des dunes (**Figure III. 1**) sont principalement constitués de quartz (SiO_2) en phases α selon le JCPDS (N°00-046-1045) à système cristallin hexagonal sous le groupe spatial P3221 (154) [2].

Dans le sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia à l'intervalle 2θ allant de 10° à 90° , le dépouillement du diagramme de DRX obtenus révèle l'apparition des pics de diffraction localisés à 20.7098° , 26.5116° , 36.4810° , 39.4173° , 42.3406° , 50.0714° , 54.7173° , 59.7694° , 63.8103° , 68.0506° , 73.3126° , 79.866° et 81.1054° correspondants respectivement aux plans cristallines (100), (101), (110), (102), (200), (112), (202), (211), (113), (203), (104), (213) et (310). Toutes ces diffractions indiquent que cet échantillon est principalement composé de α -quartz (SiO_2) [2], qui se caractérise par sa diffraction la plus forte et la plus importante à 26.5116° .

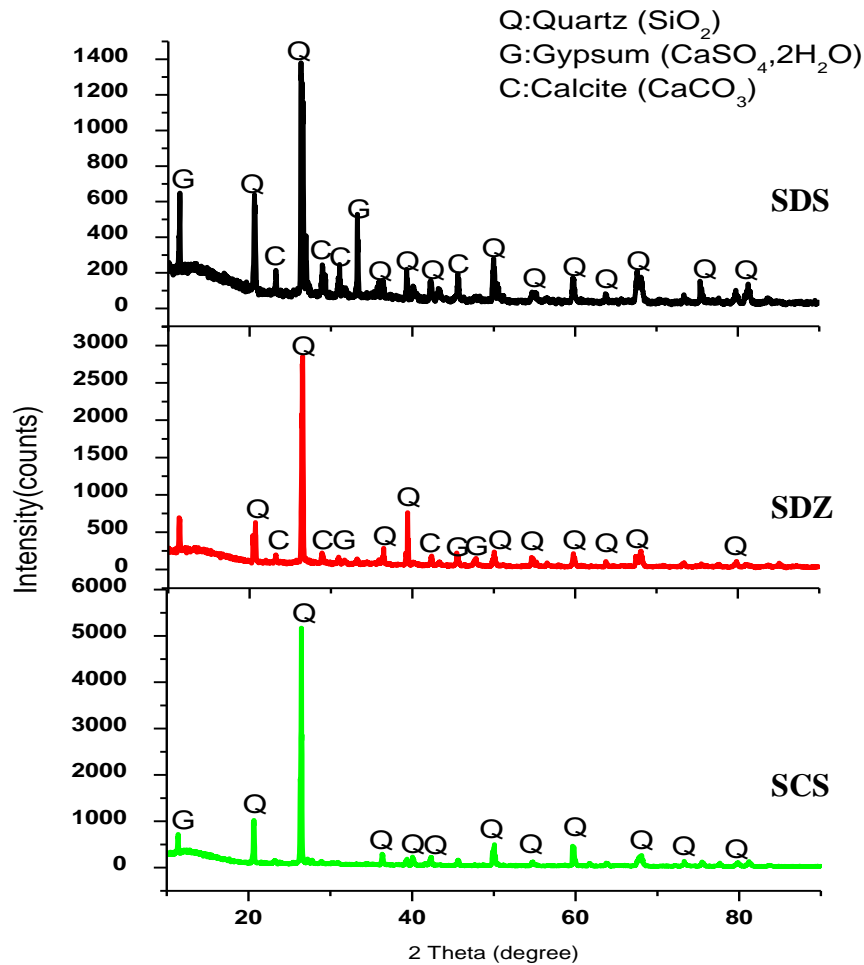


Figure III. 1. Diagrammes des DRX des échantillons : **SDZ**, **SDS** et **SCS**.

L'échantillon de sable des dunes de la région de Sidi Slimane se distingue par des diffractions intenses aux angles 2θ : 26.5613° , 36.4010° , 39.3273° , 40.2440° , 42.3361° , 45.5572° , 49.9394° , 50.4563° , 54.8787° , 59.7666° , 63.8029° , 67.6176° , 75.4443° , 79.6990° et 81.2485° correspondant respectivement aux plans cristallins (101), (110), (102), (111), (200), (201), (112), (003), (202), (211), (113), (212), (302), (213) et (114) et montre la présence de α -quartz (SiO_2) comme rapporté en référence [2]. Il a été également observé que le pic 26.5613° a l'intensité la plus forte et la plus élevée. Les diffractions aux valeurs des angles 2θ : 23.2135° , 29.3048° , 35.8351° et 43.2762° pour les plans cristallins (012), (104), (113) et (202) respectivement sont dues au carbonate de calcium (calcite CaCO_3) conforme des données JCPDS (N° 01-083-1762) sous le groupe spatial R-3c (167) [3]. Alors que les diffractions à 11.4322° , 20.5676° ,

28.9716°, 30.994°, 33.2344° et 47.9598° des plans cristallins (020), ($\bar{1}21$), ($\bar{1}12$), (121), (051) et ($\bar{2}33$) respectivement appartient au gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ces valeurs observées ont été comparées avec le JCPDS (N° **01-074-1905**) sous le groupe spatial I2/c et le système cristallin monoclinique [4].

Cependant, l'analyse DRX de sable des dunes de la région Zaouïa El-Abidia a montré deux pics de diffraction du carbonate de calcium (calcite CaCO_3) à 23.1856° et 28.9232° formés les plans cristallins (012) et (104) respectivement [3]. Des diffractions du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ont été observées à 11.3323°, 30.9268°, 33.2275°, 43.2781°, 45.4717° et 47.7966° pour les plans cristallins (020), (121), (051), (240), (170) et (062) respectivement [4].

Les échantillons de sable de construction étaient composés principalement de quartz (SiO_2). Ces diffractions ont été observées à des angles 20.6136°, 26.4556°, 36.3816°, 40.3857°, 40.1107°, 49.3305°, 54.7835°, 49.9807°, 68.0967°, 67.9807°, 68.0943°, 73.3622°, 75.5003°, 77.3622°, 79.5003°, 77.6892°, 79.7971° et 81.2679° pour les plans cristallins (100), (101), (110), (102), (111), (102), (111), (200), (201), (112), (202), (211), (113), (212), (203), (104), (302), (220), (213) et (114) respectivement, on basant sur le référence [2]. Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) était mineur dans cette type de sable; les valeurs de diffraction du gypse apparaissent aux angles 2 θ : 11.3919°, 23.4583° et 59.6173° diffractées des plans cristallins (020), ($\bar{1}30$) et ($\bar{4}02$) respectivement jugés avec le référence [4].

Les résultats obtenus de DRX sont en bon accord avec les résultats des travaux précédents présentés dans la littérature [1].

D'après les résultats de DRX, nous avons déterminé les concentrations des phases cristallines existées dans les échantillons des sables étudiés, avec une concentration de 78% quartz (SiO_2) et 22% gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pour les échantillons de sable de construction, de 55% quartz (SiO_2), 40% gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et 5% calcite (CaCO_3) pour le sable des dunes de la région de Sidi Slimane et de 48% quartz (SiO_2), 42% calcite (CaCO_3) et 10% gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pour le sable de la région de Zaouïa El-Abidia.

III. 1. 2. Interprétation des décalages des pics dans les diagrammes de DRX

En comparant les positions obtenues des pics diffractés avec les fiches ASTM (PDF) ([tableau III. 1. 2. 3](#)), on remarque qu'il y a des décalages légers (très petits) entre eux.

Celles-ci peuvent être causées par les défauts cristallins comme les impuretés dans la composition initiale. Ces défauts peuvent conduire à l'élargissement des pics et affecter la taille cristalline des grains de sable et donc créer des espacements entre les plans de réseau. Les impuretés peuvent occuper les sites de certains atomes d'accueil ou peuvent être interstitielles si elles sont petites. Les défauts cristallins provoquent aussi des décalages dans les positions de pics de diffraction des rayons X (**2 θ**) relativement à la taille atomique d'une impureté par rapport aux atomes hôtes [\[5\]](#).

De plus, la distribution non plane de sable dans le porte échantillon (support) lors de la réalisation de l'expérience peut contribuer au décalage des positions des pics.

Les [tableaux III. 1](#), [III. 2](#) et [III. 3](#) illustrent les décalages entre les pics diffractés enregistrés et les données des fiches ASTM (PDF).

Tableau III. 1. Comparaison entre les pics (DRX) de l'échantillon **SDS** et les fiches **ASTM**.

Les angles (2θ cal°)	d-spacing observé (Å)	Les phases	d-spacing calculé (Å)	L'indice de miller (hkl)	Δd (Å)
11.4322	7.74041	Gypse	7.57500	(020)	0.16541
20.5676	4.31839	Gypse	4.27077	(220)	0.04762
23.2135	3.83183	Calcite	3.85478	(012)	-0.02295
26.5613	3.35597	Quartz	3.34347	(101)	0.0127
28.9716	3.08202	Gypse	3.10160	(002)	-0.01958
29.3048	3.04773	Calcite	3.03555	(104)	0.01218
30.9941	2.88537	Gypse	2.90777	(150)	-0.0224
33.2344	2.69581	Gypse	2.67899	(222)	0.28682
35.8351	2.50590	Calcite	2.49480	(110)	0.0111
36.4010	2.46824	Quartz	2.45687	(110)	0.01137
39.3273	2.29106	Quartz	2.28149	(102)	0.00957
40.2440	2.24096	Quartz	2.23613	(111)	0.00483
42.3361	2.13494	Quartz	2.12771	(200)	0.00723
43.2762	2.09072	Calcite	2.09443	(202)	0.00371
45.5572	1.99120	Quartz	1.97986	(201)	0.01134
47.9598	1.89691	Gypse	1.89404	(262)	0.00287
49.9394	1.82626	Quartz	1.8179	(112)	0.00836
50.4563	1.80876	Quartz	1.80174	(003)	0.00702
54.8787	1.67301	Quartz	1.67173	(202)	0.00128
59.7666	1.54734	Quartz	1.54153	(211)	0.00581
63.8029	1.45884	Quartz	1.45289	(113)	0.00602
67.6176	1.38552	Quartz	1.38210	(212)	0.00342
75.4443	1.26004	Quartz	1.25595	(302)	0.00409
79.6990	1.20314	Quartz	1.19982	(213)	0.00332
81.2485	1.18406	Quartz	1.18399	(114)	0.00007

Tableau III. 2. Comparaison entre les pics (DRX) de l'échantillon **SCS** et les fiches **ASTM**.

Les angles (2θ cal°)	d-spacing observé (Å)	Les phases	d-spacing calculé (Å)	L'indice de miller (hkl)	Δd (Å)
11.3919	7.57500	Gypse	7.57500	(020)	0.000
20.6136	4.30885	Quartz	4.25499	(100)	0.05386
23.4583	3.79238	Gypse	3.78750	(131)	0.00488
26.4556	3.36914	Quartz	3.34347	(101)	0.2567
36.3816	2.46951	Quartz	2.45687	(110)	0.01264
39.3857	2.28780	Quartz	2.28149	(102)	0.00631
40.1107	2.24810	Quartz	2.23613	(111)	0.01197
42.3305	2.13521	Quartz	2.12771	(200)	0.0075
45.5967	1.98957	Quartz	1.97986	(201)	0.00971
49.9807	1.82485	Quartz	1.81796	(110)	0.00689
54.7835	1.67569	Quartz	1.67173	(202)	0.00396
59.6173	1.54957	Gypse	1.55080	(004)	-0.00123
59.7958	1.54665	Quartz	1.80174	(003)	-0.25509
61.6962	1.50349	Gypse	1.50390	(403)	-0.00041
63.8308	1.45827	Quartz	1.45289	(113)	0.00538
67.5849	1.38611	Quartz	1.38210	(212)	0.00401
68.0943	1.37698	Quartz	1.37496	(203)	0.00202
73.3622	1.29057	Quartz	1.28791	(104)	0.00266
75.5003	1.25925	Quartz	1.25595	(203)	0.0033
77.6892	1.22915	Quartz	1.22832	(220)	0.00083
79.7971	1.20190	Quartz	1.19982	(213)	0.00208
81.2679	1.18383	Quartz	1.18399	(114)	-0.00016

Tableau III. 3. Comparaison entre les pics (DRX) de l'échantillon **SDZ** et les fiches **ASTM**.

Les angles (2θ cal°)	d-spacing observé (Å)	Les phases	d-spacing calculé (Å)	L'indice de miller (hkl)	Δd (Å)
11.3323	7.80838	Gypse	7.57500	(020)	0.23338
20.7098	4.28905	Quartz	4.25499	(100)	0.03406
23.1856	3.83637	Calcite	3.85478	(012)	-0.01841
26.5116	3.36215	Quartz	3.34347	(101)	0.01868
30.9268	2.89149	Gypse	2.90777	(002)	-0.01628
33.2275	2.69635	Gypse	2.67899	(222)	0.23948
36.4810	2.46301	Quartz	2.45687	(110)	0.00614
39.4173	2.28603	Quartz	2.28149	(110)	0.0454
42.3406	2.13472	Quartz	2.12771	(200)	0.00701
43.2781	2.09063	Calcite	2.09443	(202)	-0.0038
45.4717	1.99475	Gypse	1.95300	(113)	0.04175
47.7966	1.90301	Gypse	1.89404	(262)	0.00897
50.0714	1.82176	Quartz	1.8179	(112)	0.00386
54.7153	1.67762	Quartz	1.67173	(202)	0.00589
59.7694	1.54727	Quartz	1.54153	(211)	0.00574
63.8103	1.45869	Quartz	1.45289	(113)	0.0058
67.4677	1.38824	Gypse	1.38547	(283)	0.00277
68.0506	1.37776	Quartz	1.37188	(301)	0.00588
73.3126	1.29132	Quartz	1.28791	(104)	0.00341
79.8660	1.20104	Quartz	1.19982	(213)	0.00122
81.1054	1.18579	Quartz	1.18399	(114)	0.0018

III. 2. La spectroscopie d'absorption infrarouge à transformation de Fourier (FTIR)

La technique de la spectroscopie infrarouge est souvent utilisée pour déterminer les compositions moléculaires du matériau.

Pour effectuer une analyse qualitative des matériaux étudiés, il suffit d'attribuer les longueurs d'onde absorbées aux groupements fonctionnels présents dans le matériau en utilisant les références disponibles.

La **figure III. 2** montre le spectre d'absorption infrarouge pour tous les échantillons prélevés. La comparaison des bandes d'absorption existant dans le spectre de nos échantillons avec d'autres travaux montre que les bandes d'absorption obtenues sont en bon accord avec les résultats réalisés dans la littérature [6-12]. Elles indiquent que la plupart des bandes sont attribuées au quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3) et au gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ceci est cohérent avec les résultats de DRX. Il existe également d'autres bandes d'absorptions liées à l'eau et à l'impureté organique [13].

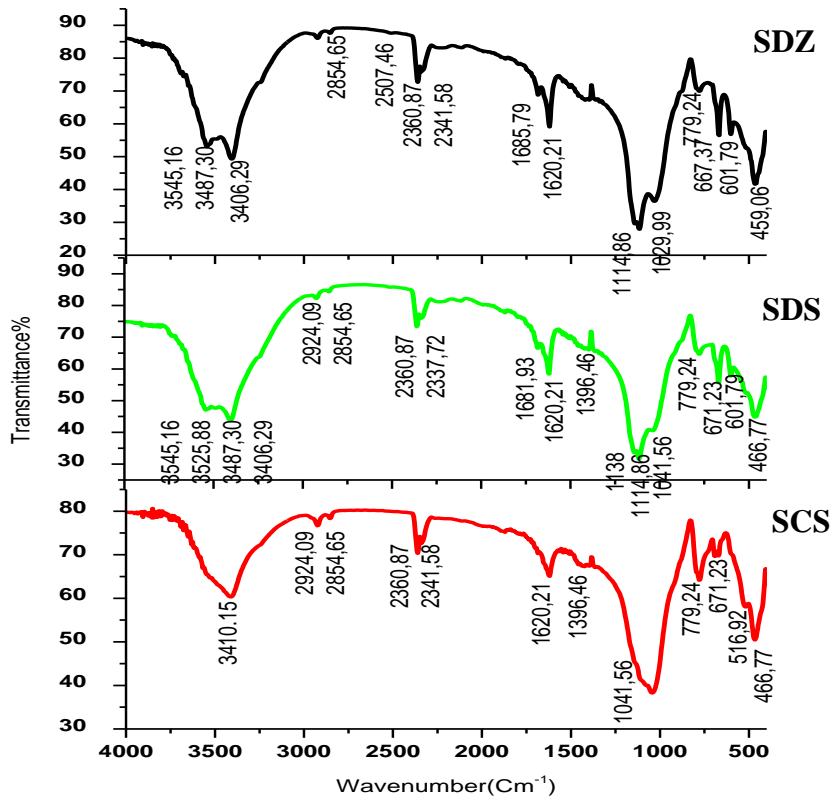


Figure III. 2. Résultats de FTIR des échantillons : SDZ, SDS et SCS.

Les spectres de nos échantillons ont montré des différences nettes dans nombreuses zones du spectre.

Les bandes d'absorption apparaissent dans certains échantillons mais elles diminuent en intensités au sein de quelques-uns et disparaissent totalement dans d'autres dues à la différence dans la composition de ses échantillons.

Le **tableau III.4** résume les bandes principales d'absorption et de vibration de liaison associées aux nos échantillons.

Les bandes d'absorption à 459.08, 466.77, 516.92, 779.24, 1029.29, 1041.56 cm^{-1} indiquent la présence de quartz dans nos échantillons du sable [1]. Les deux pics d'absorption sont apparus 459.08 cm^{-1} et 1029.29 cm^{-1} dans les échantillons prélevés dans la région de Zaouïa El-Abidia (**SDZ**), qui coïncide avec la flexion symétrique et asymétrique de Si-O-Si, respectivement, et la vibration d'élongation asymétrique de Si-O-Si [14].

Pour les échantillons prélevés dans la région de Sidi Slimane, les bandes d'absorption suivantes sont apparues : 466.77, 516.92, 1041.56 cm^{-1} . Les bandes d'absorption diffèrent entre les échantillons de sable des dunes (**SDS**) et les échantillons de sable de construction (**SCS**), où le pic est apparu à 466.77 cm^{-1} dans les deux échantillons, mais dans une intensité presque proche, tandis que cela est attribué à l'élongation symétrique Si-O [8].

L'absorption à 516.92 cm^{-1} n'est pas apparue que dans l'échantillon de sable de construction (**SCS**), tandis que l'absorption à 1041.56 cm^{-1} est apparue dans les deux échantillons d'intensités différentes. Elle était large et moins intense dans le sable de construction et forte et quelque peu aigu dans l'autre échantillon. Ils sont causée par la vibration asymétrique de Si-O-Al dans le quartz [10] et à la vibration de flexion symétrique de la liaison Si-O-Si, respectivement [15].

L'absorption à environ 800 cm^{-1} indique la vibration de divers types de silice; Dans ce cas, l'absorption à 779.24 cm^{-1} dans tous les échantillons est attribuée à l'élongation symétrique de Si-O [16]. Cette bande indique la présence de α -quartz [5].

Tableau III. 4. Les bandes principales d'absorption et de vibration de liaison associées aux nos échantillons.

Fréquences (cm ⁻¹)	Les échantillons			Minéraux	Mode de vibration
	SDS	SCS	SDZ		
3545.16	x		x	L'eau	O-H (vibration d'élongation)
3525.88	x				
3487.3	x		x		
3410.16		x			
3406.2	x		x		
2924.09	x	x	x	Carbone organique	C-H (vibration d'élongation)
2854.65	x	x	x		
2507.46			x	Calcite	(CO ₃) ⁻² (vibration d'élongation (symétrique antisymétrique))
1620.21	x	x	x	Gypse	/
1138	x				SO ₄ ⁻² (vibration d'élongation antisymétrique)
1114.86	x		x		
779.24	x	x	x	Quartz	Si-O (vibration d'élongation symétrique)
671.23	x	x		Gypse	/
601.79			x		SO ₄ ⁻² (vibration de flexion antisymétrique)
516.9		x		Quartz	Si-O-Al (vibration de flexion symétrique)
466.7	x	x			Si-O-Si (vibration de flexion antisymétrique)
459.08			x		

Plusieurs bandes d'absorptions ont été également observées dans les spectres des échantillons étudiés à 601.79, 667.37, 671.23, 1114.86, 1138, 1620 et 1685 cm^{-1} , toutes faisant référence au gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ceci est confirmé avec les résultats de DRX, qui indique que les échantillons de sables étudié constitué de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le pic à 1620 cm^{-1} indique la présence de gypse [17] dans tous les échantillons.

Pour les échantillons de sable de dunes et le sable de la construction dans la région de Sidi Slimane, un ensemble de pics communs ont été observé : la présence de vibration de flexion asymétrique de SO_4^{2-} à 671.23 cm^{-1} fait référence à la présence de gypse [18].

Dans les échantillons de sable des dunes de Zaouïa El-Abidia et de Sidi Slimane, les pics ont été enregistrés à 601.79 et 1114.86 cm^{-1} signifiant la vibration asymétrique de flexion et d'élongation, respectivement, de SO_4^{2-} dans le gypse [19]. Les deux pics observés à 667.37 et 1685 cm^{-1} dans les échantillons de sable de dunes de la région de Zaouïa El-Abidia ont indiqué la présence de gypse dans le sable étudié [20].

Le pic à 1396,46 cm^{-1} fait référence à l'élongation de vibration asymétrique du CO_3^{2-} [15] dans tous les échantillons. Où l'intensité de band d'absorption est très proche dans les échantillons de sable des dunes dans les deux régions, mais la bande d'absorption dans l'échantillon de sable de construction est inférieure, ce qui confirme les résultats de la diffraction des rayons X (DRX). Avec une concentration de calcite (CaCO_3) dans l'échantillon de sable des dunes était de 10 % pour la région de Zaouïa El-Abidia et 5% pour la région de Sidi Slimane.

Concernant aux échantillons de sable de construction, la calcite (CaCO_3) n'apparaît pas dans les résultats de DRX probablement en raison de son concentration très faible dans ces échantillons.

Les bandes d'absorption à 2854.65 et 2924.09 cm^{-1} , **figure III. 2**, pointaient vers les impuretés organiques [13]; ils sont dus à la vibration de la liaison C-H [18].

La bande d'absorption à 3545.16, 3487.30 et 3406.29 cm^{-1} est causée par des vibrations d'élongation antisymétriques et symétriques de molécules H_2O dans le gypse [11, 21] et l'autre bande à 3410.15 cm^{-1} correspondant à la vibration d'élongation et de

flexion du liant (OH) [22] dans le sable de construction de la région de Sidi Slimane (tableau III. 4).

III. 3. Fluorescence des rayons X (XRF)

Le tableau III.5 montre la composition chimique des échantillons étudiés. Pour cela, nous avons utilisé un appareil d'analyse disponible dans l'usine de fabrication de ciment à Aintouta (wilaya de Batna), qui utilise la technique de fluorescence basée sur la dispersion de l'énergie des rayons X (ED-XRF). Cet appareil est programmé pour détecter les concentrations de certains oxydes métalliques utilisés dans l'industrie du ciment. Ces programmes visent à établir un lien entre les concentrations des éléments et leurs proportions molaires dans les oxydes.

Le tableau III.5 résume les résultats de l'analyse chimique des échantillons étudiés à l'aide de la technique ED-XRF.

Tableau III. 5. les résultats de l'analyse chimique des échantillons étudiés avec la technique ED-XRF.

Oxydes % mass	Les échantillons		
	Sable des dunes de la région Sidi Slimane (SDS)	Sable de construction de la région Sidi Slimane (SCS)	Sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia (SDZ)
SiO ₂	74.56	82.5	67.65
Al ₂ O ₃	1.32	3.82	1.87
Fe ₂ O ₃	1.11	1.72	1.38
CaO	10.36	5.74	12.94
MgO	1.17	0.29	1.59
K ₂ O	0.46	0.68	0.59
Na ₂ O	0.99	0.81	0.67
SO ₃	9.91	3.42	13.24
Cl	0.096	0.014	0.060
Somme	99.98	98.99	99.98

On note que les sommes totales d'oxydes (**tableau III.5**) sont inférieures à 100 %, ce qui peut être expliqué par la limitation de la sensibilité de la technique XRF programmée pour détecter certaines oxydes. Ceci a été observé clairement dans l'appareil utilisé dans l'usine de ciment pour évaluer les concentrations des matières premières de fabrication. Par exemple, on voit que l'oxygène est détecté avec plus d'un oxyde. Les minéraux peuvent être oxydés sous différentes formes telles que (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄).

Les concentrations des oxydes mentionnés dans le **tableau III.5** peuvent être converties en concentrations de leurs éléments, en fonction des masses molaires des oxydes.

Pour calculer le pourcentage de silicium, nous procédons comme suit ;

$$\begin{aligned} M_{SiO_2} &= M_{Si} + 2M_O \\ &= 28.0855 + (2 \times 15.9994) \\ &= 60.0843 \text{ g} \end{aligned}$$

Donc le pourcentage calculé pour le silicium sera :

$$P_{Si}(\text{calculé}) = \frac{M_{Si}}{M_{SiO_2}} = \frac{28.0855}{60.0843} = 46.74$$

Et le pourcentage de silicium expérimental devient :

$$P_{Si} = P_{SiO_2}(\text{experimental}) \times P_{Si}(\text{calculé})$$

Le **tableau III.6** récapitule les résultats du calcul des concentrations des différents éléments dans les échantillons étudiés.

Les résultats du **tableau III.6** confirment que les sables étudiés sont constitués principalement de quartz (SiO₂), de gypse (CaSO₄ ; 2H₂O) et de calcite (CaCO₃) mais avec des concentrations variables. Les spectres de FTIR et DRX confirment ces résultats.

Le **tableau III.6** montre clairement que les échantillons de sable de construction sont caractérisés par une concentration élevée (> 82 %) de quartz (SiO₂) par rapport aux échantillons de sable des dunes de la région de Sidi Slimane, qui n'ont qu'environ 74.56 %, tandis que le sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia montre une valeur de 67.65 %.

Tableau III. 6. Les résultats du calcul des concentrations des différents éléments dans les échantillons étudiés ($\frac{mg}{Kg} \equiv 10^{-4}\%$).

Les éléments % mass.	Les échantillons		
	SDS	SCS	SDZ
Na	36.72	30.0453	24.8523
Mg	70.5552	17.4880	95.8827
Al	35.93	101.088	49.5485
Si	348500	385605	316300
S	396.89	136.96	530.2567
K	19.093	28.224	24.4891
Ca	740.41	410.2321	924.808
Fe	38.816	60.148	48.259
Cl	0.096	0.014	0.060

On remarque que les échantillons de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia sont caractérisés par des fortes concentrations d'oxyde de calcium (CaO), qui atteignent ~12.94 % par rapport aux échantillons de sables de construction et de sable des dunes de la région de Sidi Slimane, qui ne dépassent pas 5.74% et 10.36%, respectivement. Ce résultat est confirmé par les résultats de DRX où la concentration de gypse ($\text{CaSO}_4 ; 2\text{H}_2\text{O}$) est 42% et celle de calcite est 10%.

Les échantillons de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia contiennent une quantité considérable de trioxyde de soufre (SO_3), allant jusqu'à 13.24 %, alors qu'ils atteignaient que 3.42 % et 9.91 % pour le sable de construction et le sable des dunes de la région de Sidi Slimane respectivement. Ces résultats sont affirmés par la DRX.

Les concentrations des composants mentionnés précédemment (SiO_2 , CaO et SO_3) sont indiquées dans la première, quatrième et huitième ligne dans le **tableau III. 6**.

L'échantillon de sable de construction est distingué par de petites concentrations d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3), qui atteignent 3.82 % et 1.72%. Tandis que, pour les échantillons de sable des dunes ces concentrations

d'oxydes sont inférieures à celles de l'échantillon précédent avec des pourcentages de 1.32 % et 1.11% pour la région de Sidi Slimane et des pourcentages 1.87% et 1.38% pour la Zaouïa El-Abidia.

Tous les échantillons des sables étudiés contiennent très faibles concentrations d'oxyde de magnésium (MgO), d'oxyde de sodium (Na₂O) et d'oxyde de potassium (K₂O). Elles atteignent: 0.29% (MgO), 0.81% (Na₂O) et 0.68% (K₂O) pour le sable de construction; 1.17% (MgO), 0.99% (Na₂O) et 0.46% (K₂O) pour le sable des dunes de la région de Sidi Slimane et 1.59% (MgO), 1.67% (Na₂O) et 0.59% (K₂O) pour le sable des dunes de la région de Zaouïa El- Abidia. La technique d'XRF montre qu'il y a aussi des traces de chlore (Cl). L'eau est présente d'origine dans le sable.

En résumant, les deux techniques (DRX et FTIR) ont assuré que les échantillons étudiés contiennent du quartz (SiO₂), de la calcite (CaCO₃) et du gypse (CaSO₄).

En comparant les résultats des compositions chimiques obtenues par les mesures XRF avec les résultats obtenus par le travail de Meftah N et al. (2019) [14], qui a été montré que l'échantillon d'El-Oued contient une forte concentration (97.63%) de silice, une faible concentration d'oxyde de calcium (0.56%) et un très faible pourcentage d'aluminium et oxyde de fer. De petites quantités de MgO (0.61 %) et de Na₂O (0.54 %) ont été observées. De plus, les sables d'El-Oued contiennent une quantité négligeable d'autres éléments comme des traces, tels que le brome (Br), le germanium (Ge), le bismuth (Bi), le niobium (Nb), le strontium (Sr) et le zinc (zinc), le baryum (Ba) et le chlore (Cl). Ces résultats confirment que les dunes de sable d'El-Oued sont principalement composées de quartz avec un peu de calcite et de très faibles quantités de Fe₂O₃, Al₂O₃, Na₂O, SO₃, MgO et TiO₂. En plus de la présence de cations Mg, Ca et K, nous avons constaté que nos résultats correspondent aux résultats de ces travaux (les oxydes), mais la différence réside dans les concentrations. Le brome (Br), le germanium (Ge), le bismuth (Bi), le niobium (Nb), le strontium (Sr), le zinc (Zn) et le baryum (Ba) ne figurent pas dans nos échantillons.

III. 4. Microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

La morphologie des grains de sable est une propriété physique très importante dans l'évaluation du sable pour différentes utilisations dans le domaine industrielle comme la fabrication du verre [23]. Par conséquent, nous avons adopté la microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) afin d'étudier les différentes morphologies au niveau des surfaces des grains des échantillons.

III. 4. 1. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Les figures III.3, III.4 et III.5 représentent la morphologie de la surface des échantillons étudiés dans la région de Touggourt.

Les échantillons de sable prélevés dans la région de Zaouïa El-Abidia semblent d'être constitués de grains de sable arrondies (très arrondies, arrondies et semi arrondies), anguleuses (très anguleuses, anguleuses et semi anguleuses) et irréguliers (figure III.3). Alors que les grains de sable des dunes prélevés de Sidi Slimane montrent des formes variant entre: anguleuses (très anguleuses, anguleuses et semi anguleuses), irrégulières ou arrondies (très arrondies, arrondies et semi arrondies) (figure III.4). Pour les échantillons de sable de construction de la même région, on observe que les grains de sable avaient des formes allongées, arrondies (très arrondies, arrondies et semi arrondies) ou anguleuses (très anguleuses, anguleuses et semi anguleuses) (figure III.5).

Les résultats de MEB présentent des formes arrondies, anguleuses irrégulières et allongée des grains des échantillons étudiés, ceci a été expliqué par la référence [24]:

- la forme des grains dépendait du processus de transport et de la forme originale des grains de la roche-mère.
- la forme arrondie des grains des sables indique une longue voie de transport (un long trajet de transport).
- la forme anguleuse suggère que les grains de sable se sont déposés près de leur région d'origine.

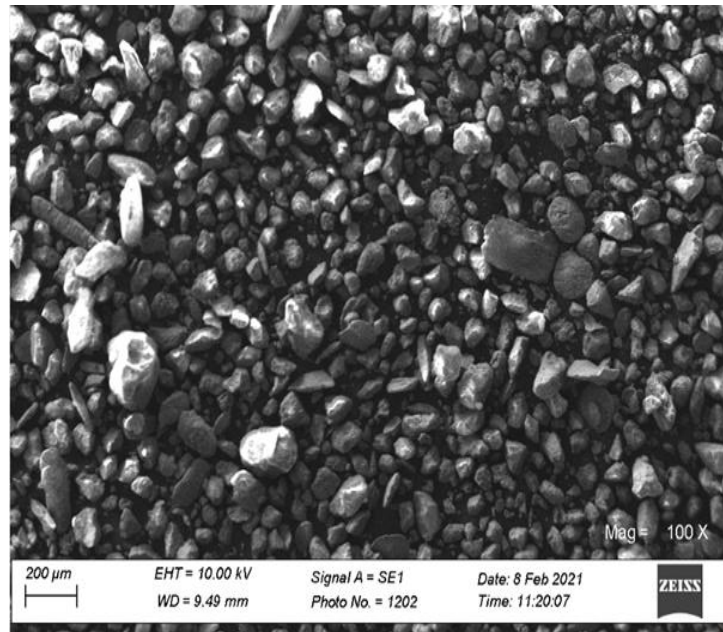


Figure III. 3. Micrographie MEB de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia.

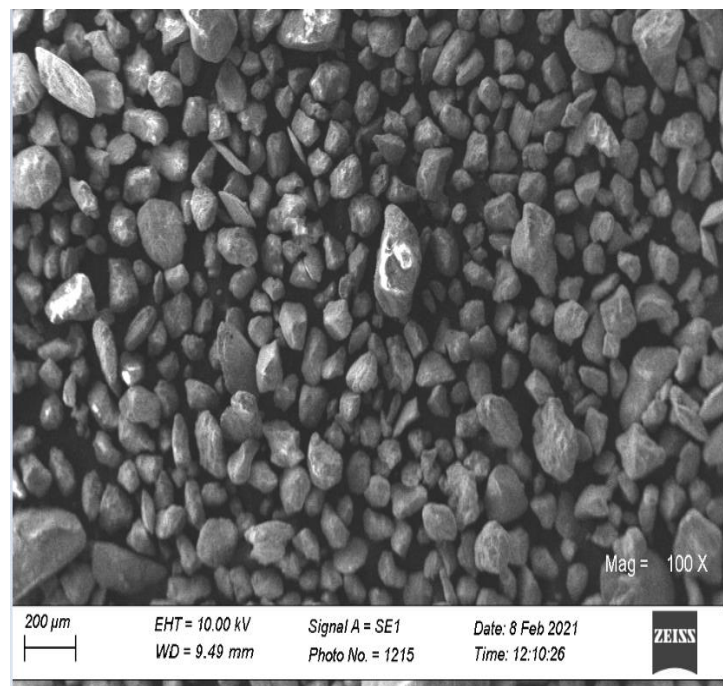


Figure III. 4. Micrographie MEB de sable des dunes de la région de Sidi Slimane.

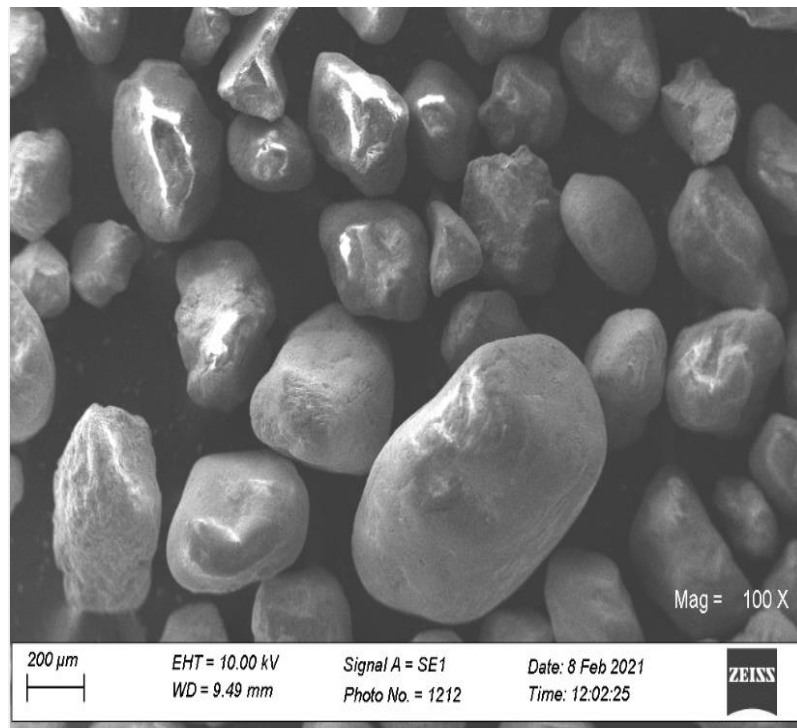


Figure III. 5. Micrographie MEB de sable de construction de la région de Sidi Slimane.

III. 4. 2. Analyse par la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

L'analyse avec la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) des sables étudiés permis d'effectuer des analyses chimiques et de déterminer la composition chimique minéralogique des échantillons. Le [tableau III. 7](#) présente la composition élémentaire des sables étudiés.

La [figure III.6](#) montre la morphologie de la surface, les éléments chimiques présents dans les échantillons, et la concentration de chaque élément dans chaque échantillon. Les résultats illustrés dans le [tableau III.7](#) montrent que la concentration du silicium (Si) dans le sable de construction dans la région de Sidi Slimane est plus élevée que celle dans les échantillons des sables des dunes. Ceci confirme les résultats obtenus avec la diffraction des rayons X où le contenu en quartz (SiO_2) dans le sable de

construction est supérieur à celui du sable des dunes.

Tableau III. 7. Concentration massiques et atomiques de la composition chimique des échantillons des sables étudiés.

Les éléments	Zaouïa El-Abidia		Sidi Slimane			
	Sable des dunes		Sable des dunes		Sable de construction	
	Mass (%)	At (%)	mass (%)	at (%)	mass (%)	at (%)
C	34.31	45.02	21.57	30.58	17.02	25.17
O	44.77	44.10	50.16	53.39	51.35	57.02
Mg	2.54	1.65	3.91	2.74	1.39	1.02
Si	11.63	6.53	15.44	9.36	18.27	11.56
S	1.77	0.87	2.76	1.46	2.81	1.56
K	0.54	0.22	0.7	0.3	0.66	0.30
Ca	3.21	1.26	4.11	1.75	5.31	2.36
Fe	1.23	0.35	1.34	0.41	3.19	1.01

Le **tableau III.7** montre aussi les concentrations massiques des éléments chimiques de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia, le sable des dunes et le sable de construction de la région de Sidi Slimane, où on observe que la concentration d'oxygène (O) et de silicium (Si) dans les échantillons de sable de construction est supérieure à celles des sables de dunes dans les deux régions. La concentration de Si est de 18.27% pour les échantillons de sable de construction, de 15.44% et de 11.63% pour la région de Sidi Slimane et la région de Zaouïa El-Abidia respectivement (sable des dunes). Ces pourcentages sont confirmés par les résultats de DRX, FTIR et XRF. En effet, les résultats de DRX montrent que la concentration de quartz (SiO_2) dans le sable de construction est supérieure à celle des échantillons de sable des dunes des deux régions. Elle est de 78% pour les échantillons de sable de construction, de 55% pour le sable des dunes dans la région de Sidi Slimane et 48% pour le sable des dunes de la région de Zaouia El-Abidia.

D'autre part, de petites concentrations de Ca, S, Mg, K et de Fe ont été observées dans les échantillons des sables étudiés.

La concentration de calcium (Ca) est presque similaire dans tous les échantillons de sables, qui sont de 5.31 % dans le sable de construction, de 4.11 % dans le sable des dunes de la région de Sidi Slimane et de 3.21 % dans les échantillons de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia.

Par contre, la concentration du S est faible dans tous les échantillons, il se trouve avec un pourcentage de 2.81 % et 2.76 % dans le sable de construction et le sable des dunes de la région de Sidi Slimane et un pourcentage de 1.77 % pour le sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia.

Les concentrations de magnésium (Mg) sont de 2.54% et 3.91% dans les échantillons de sables des dunes (la région de Zaouïa El-Abidia et la région de Sidi Slimane respectivement) et de 1.39 % pour les échantillons de construction de la région de Sidi Slimane.

La concentration de fer (Fe) possède une valeur de 1.23 % dans la région de Zaouïa El-Abidia et une valeur de 1.34 % dans le sable des dunes de Sidi Slimane. En revanche, le sable de construction de la région de Sidi Slimane révèle une valeur supérieure avec un pourcentage de 3.19 %

La concentration en potassium (K) est très faible, elle était de 0.66 % et 0.7 % dans les échantillons de sable de construction et de sable des dunes de la région de Sidi Slimane, respectivement, et de 0.54 % dans la région de Zaouïa El-Abidia.

Les résultats EDS à bonne accord avec les résultats de DRX, FTIR et XRF. Les diffractogrammes (DRX) obtenus assurent que les échantillons de sables consistent principalement de quartz (SiO_2), de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de Calcite (CaCO_3). De plus, les spectres de FTIR montrent que la plupart des bandes d'absorptions sont attribuées au quartz, gypse et calcite. Il existe aussi des bandes d'absorptions de l'eau et de carbone organique. Les résultats d'XRF accordent aussi avec les deux techniques précédentes en montrant que les échantillons étudiés sont composés des oxydes tels que l'oxyde silicium (SiO_2), l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de fer (Fe_2O_3), l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de magnésium (MgO), l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O) et l'oxyde de soufre(SO_3).

En comparant les résultats d'EDS obtenus avec les résultats de Zouaouid et al. (2019) [25]. Nous constatons que les résultats de sable des dunes de la région d'Ouargla montrent une concentration élevée des éléments silicium (Si) et oxygène (O). La concentration de calcium est de 23.20 %, de soufre (S) est de 16.76 % et de fer (Fe) ont été trouvés à 2.05%. Où nos résultats ont montré une concentration élevée des éléments de silicium (Si) et d'oxygène (O) dans tous les échantillons dans notre étude. Les analyses indiquent aussi l'existence d'autres éléments tels que le calcium (Ca), le soufre (S), le fer (Fe), le magnésium (Mg) et le potassium (K).

La présence de ces éléments dans ces régions peut être des sources naturelles pour l'exploitation dans différentes applications industrielles.

III. 5. Distribution granulométrique par diffraction laser

La distribution granulométrique de sable est un paramètre critique pour déterminer son aptitude à diverses applications [26-28]; Il peut fournir des informations sur les conditions de transport, de tri et de dépôt du sable étudié [29, 30]. Dans cette analyse, nous avons utilisé la méthode de la distribution granulométrique par diffraction laser avec l'appareil (LA-960 HORIBA), qui donne des résultats sous forme des courbes granulométriques des échantillons et qui sont illustrés dans les figures III.7, III.8 et III.9 et le tableau III. 11.

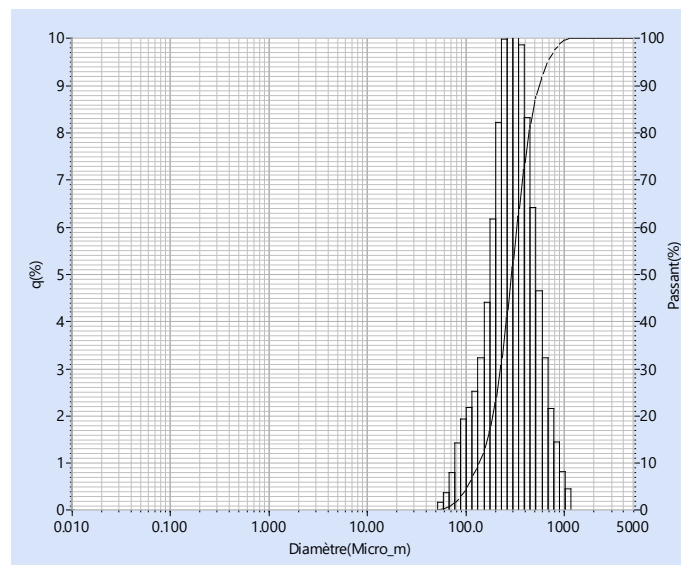


Figure III. 7. Résultats de l'analyse granulométrique du sable des dunes de la région de Sidi Slimane (SDS).

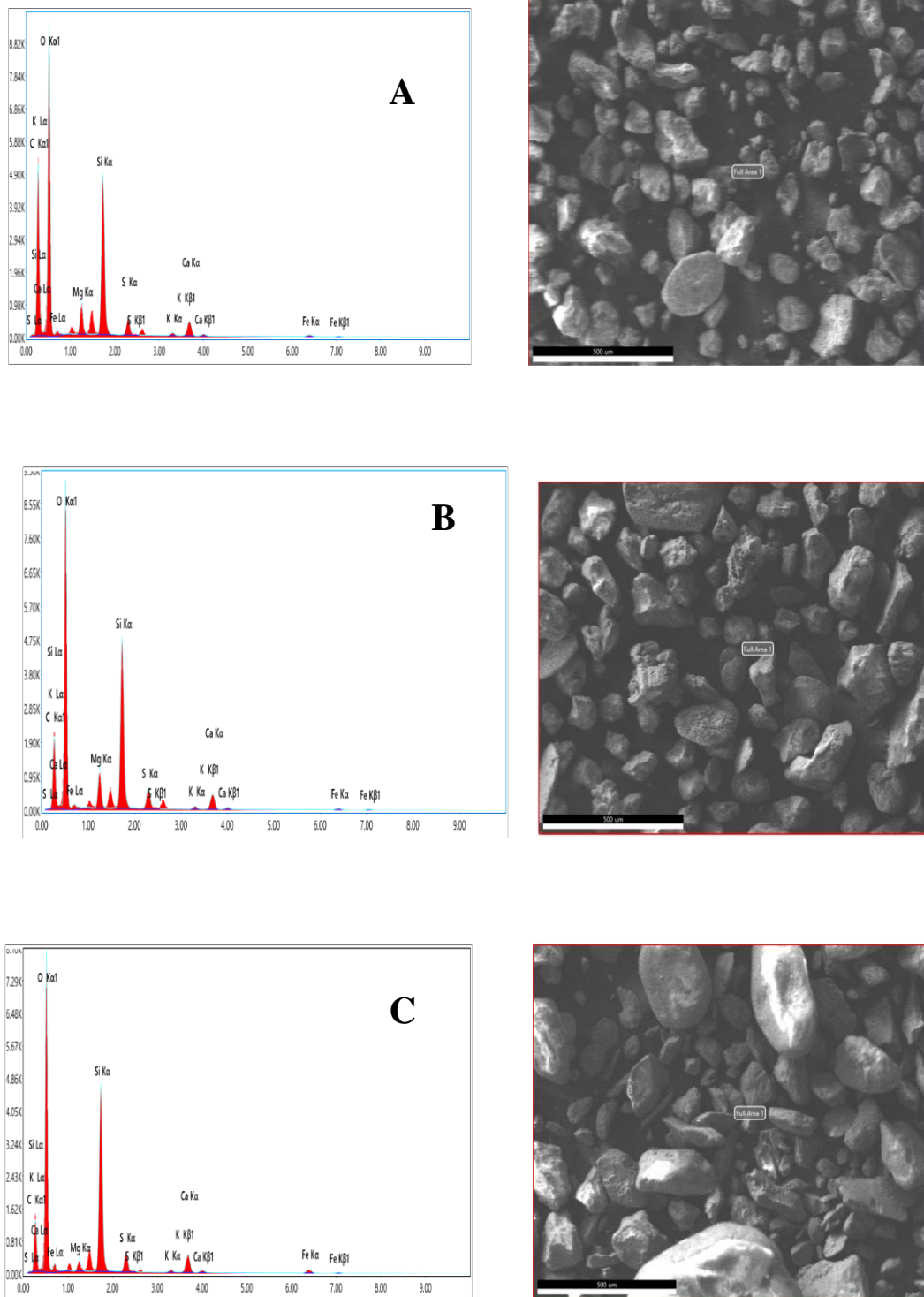


Figure III. 6. Micrographies SEM combinées à l'analyse EDS des sables étudiés: sable des dunes de la région de Zaouïa El- Abidia (A), sable des dunes de la région de Sidi Slimane (B) et sable de construction de la région de Sidi Slimane (C).

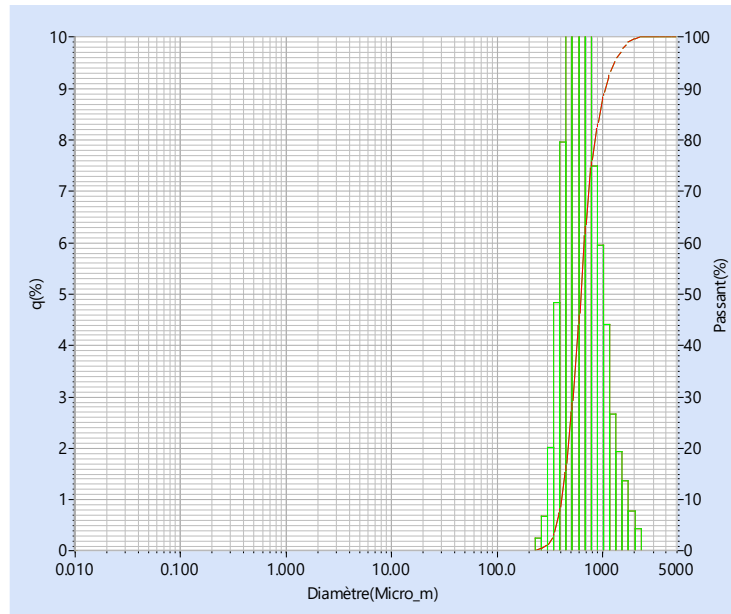


Figure III. 8. Résultats de l'analyse granulométrique du sable de construction de la région de Sidi Slimane (SCS).

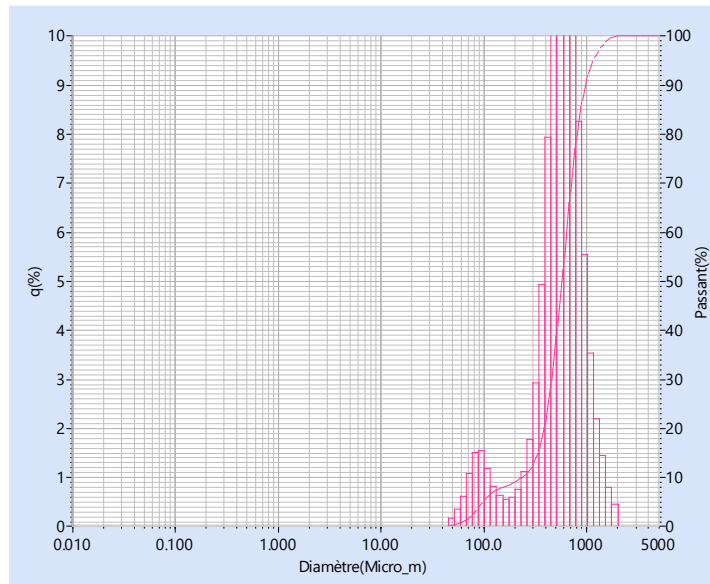


Figure III. 9. Résultats de l'analyse granulométrique du sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia (SDZ).

Nous pouvons analyser chaque courbe obtenue par la distribution granulométrique par diffraction laser des sables étudiés comme suit :

- La première courbe est un histogramme qui représente le pourcentage en fonction du diamètre des grains de sable étudié.
- La deuxième courbe représente le pourcentage des grains passant en fonction de leurs diamètre.

Après l'analyse des résultats obtenus (**figures III.7, III.8 et III.9**), on remarque que la distribution granulométrique du sable étudié variait entre 51.471 et 2301.841 μm .

La taille des grains de sable des dunes de la région de Zaouïa El- Abidia allant de 51.471 à 2009.687 μm avec une granulométrie moyenne de 605.15 μm (**figure III.9**).

Pour les échantillons de sable des dunes de Sidi Slimane, la distribution granulométrique varie entre 58.953 et 1167.725 μm (**figure III.7**) avec une valeur moyenne de 327.74 μm et entre 262.376 et 2301.841 μm avec une valeur moyenne de 689.996 μm pour le sable de construction (**figure III.8 et tableau III.8**).

Le **tableau III. 8** résume le pourcentage des grains de sable par leur diamètre et le pourcentage de grains de sable qui passent de l'appareil par leur diamètre. Ce **tableau III.8** montre également une comparaison entre les échantillons étudiés.

En comparant entre les résultats de la classification granulaire obtenues (**figure III.7, figure III.8 et figure III.9**) et les classifications internationales du sol, on conclut que nos échantillons peuvent être classés en limon, sable, et gravier selon la classification du Département Américain de l'Agriculture mais avec des pourcentages différents. Le **tableau III.9** présente les résultats de la classification granulométrique avec les pourcentages.

Tableau III. 9. Résultats de la classification granulométrique des sables avec leur pourcentages selon les références [19, 31, 32].

	Diamètre (μm)	Pourcentages (%)		
		SDS	SCS	SDZ
Argile	<2	-	-	-
Limon	2-63	0.14	-	0.49
Sable	63-2000	99.86	98.842	99.1
gravier	>2000	-	1.16	0.44

Tableau III. 8. Les résultats d'analyse granulométrique des sables étudiés.

No	SDS		SCS		SDZ		Diamètre (μm)
	q (%)	Passant (%)	q (%)	Passant (%)	q (%)	Passant (%)	
01					0.159	0.159	51.471
02	0.142	0.142			0.330	0.488	58.983
03	0.35	0.493			0.605	1.094	67.523
04	0.791	1.284			1.059	2.152	77.339
05	1.412	2.696			1.5	3.652	88.583
06	1.92	4.615			1.528	5.18	101.46
07	2.169	6.784			1.166	6.346	116.21
08	2.498	9.282			0.811	7.157	133.103
09	3.205	12.487			0.612	7.769	152.453
10	4.401	16.888			0.540	8.309	175.616
11	6.15	23.038			0.58	8.888	200.00
12	8.199	31.237			0.746	9.635	229.075
13	9.962	41.199	0.226	0.226	1.098	10.733	262.376
14	10.846	52.044	0.657	0.883	1.745	12.478	300.515
15	10.727	62.772	2.002	2.884	2.908	15.387	344.206
16	9.851	72.623	4.814	7.699	4.929	20.315	394.244
17	8.315	80.938	7.951	15.649	7.92	28.235	451.556
18	6.3958	87.333	12.015	27.664	11.184	39.419	517.00
19	4.634	91.967	16.809	44.474	13.539	52.958	592.387
20	3.208	95.175	17.623	62.097	13.61	66.568	678.504
21	2.142	97.318	13.008	75.105	11.312	77.88	777.141
22	1.439	98.757	7.472	82.576	8.245	86.125	890.116
23	0.799	99.556	5.936	88.513	5.523	91.648	1019.515
24	0.444	100.00	4.385	92.8977	3.513	95.349	1167.725
25			2.651	95.549	2.188	97.349	1337.481
26			1.922	97.47	1.422	98.771	1531.914
27			1.357	98.827	0.79	99.561	1754.613
28			0.754	100.00	0.439	100.00	2009.687

En comparant les résultats obtenus de la classification granulométrique des sables étudiés avec les résultats des échantillons des sables de travail de CHAOUCHÉ K et al. 2019 [33], qui sont étudiés les sables au niveau de trois régions. La première est Ouragla-Touggourt-El-Oued (OTE); la deuxième à Ouargla-El-Hadjira-El Guettara(OHG) et la troisième à Ouargla- Hassi Messaoud-El Borma (OHB). L'OTE possède une valeur de 43.05 % limon, de 51 % sable et 5.50 % gravier. Chez OHB se compose de 0.09% limon, 66.44% sable et 2.67% gravier. Dans le même temps, 53.82% et 1% ont été enregistrés respectivement sable et gravier dans la région OHG.

Cette variation de la composition de sable était directement liée à la nature d'origine de sable ou aux effets naturels. Le sable éolien était formé principalement par les grosses particules. En revanche, le sable des dunes a été formé par les fines particules.

III. 6. Certaines applications des sables selon la taille des grains et leur forme

La taille et la forme (morphologie) des grains du sable jouent un rôle très important pour la détermination de l'adéquation du sable à différentes applications. Voici quelques exemples d'applications du sable basées sur ces propriétés physiques :

Construction : le sable avec une granulométrie constante et une forme arrondie est idéal pour les applications de construction telles que la production de béton. La forme arrondie des grains améliore la fluidité et la maniabilité du béton. La granulométrie uniforme assure une résistance et une finition constantes.

Filtration : le sable avec une taille des grains constante et une forme anguleuse est idéal pour les applications de filtration telles que le traitement de l'eau et la production de pétrole et de gaz. La forme anguleuse des grains offre une plus grande surface de filtration du fluide et la taille uniforme des grains assure une filtration efficace.

Réalimentation de plage : le sable avec une granulométrie constante et une forme arrondie est idéal pour réalimenter la plage. La forme arrondie des grains les rend moins susceptibles d'être transportés par l'action des vagues et la taille uniforme des grains assure un profil de plage cohérent.

Fracturation : le sable avec une granulométrie et une forme anguleuse constantes est idéal pour la fracturation hydraulique dans l'industrie pétrolière et gazière. La forme anguleuse des grains fournit un meilleur agent de soutènement pour ouvrir les fractures créées dans les formations rocheuses.

Sablage : le sable avec une granulométrie constante et une forme anguleuse est idéal pour les applications de sablage. La forme anguleuse des grains offre un meilleur effet abrasif que les grains arrondis.

Remplissage de sable : le sable avec une granulométrie constante et une forme anguleuse est idéal pour les applications de remplissage telles que les décharges, les tranchées et les fondations. La forme anguleuse des grains offre une meilleure stabilité et un meilleur soutien.

Fabrication de verre : la distribution granulométrique ou la forme des grains est un autre facteur très important dans la fabrication du verre. Selon G. A. Duvuna et A. Ayuba [34], la taille des grains doit se situer dans une limite de taille donnée et doit être uniforme. La taille idéale des grains doit être comprise entre 0.1 et 0.5 mm de diamètre. Il est nécessaire que 75 % du grain se situe dans cette plage. La morphologie du grain est une autre propriété physique, qui détermine l'aptitude du sable de silice pour la fabrication du verre. Selon M. C. Powers [35] la rondeur du grain doit être anguleuse plutôt qu'arrondie.

En résumé, les applications de sable dépendent de la taille et de la forme des grains. Le sable avec une granulométrie constante et une forme arrondie est idéal pour la construction et l'alimentation des plages. Le sable avec une granulométrie constante et une forme anguleuse est idéal pour la filtration, la fracturation hydraulique, le sablage et le remplissage du sable.

On revenant aux résultats obtenus par le MEB et l'analyse granulométrique par diffraction laser pour les échantillons étudiés :

Après l'analyse granulométrique effectuées aux échantillons étudiés, on peut dire que tous les prélèvements sont confinés au l'intervalle de sable, puisqu'il représente 98.84% de l'échantillon de sable de construction et 99.86% de l'échantillon de sable des dunes pour la région de Sidi Slimane. Pour les échantillons de sable des dunes de la région de Zaouïa El-Abidia, il présente 99.1 %.

De plus, selon les résultats de la microscopie électronique à balayage ; les échantillons de sable prélevés de la région de Zaouïa El-Abidia et la région de Sidi Slimane sont constitués de grains de sable arrondies (très arrondies, arrondies et semi arrondies), anguleuse (très anguleuse, anguleuse et semi anguleuse) et irréguliers (**Figure. III.3, Figure. III.4**) Pour les échantillons de sable de construction de la région de Sidi Slimane, il est observé qu'il s'agit des grains ayant des formes allongées, anguleuse (très anguleuse, anguleuse et semi anguleuse) ou arrondies (très arrondies, arrondies et semi arrondies) (**Figure. 5.III**).

Nous concluons que nous pouvons utiliser les échantillons étudiés dans les applications mentionnés ci-dessus selon la taille et la forme des grains.

Références Bibliographies

- [1] MEHDADI N. (2017). Détermination de la composition des principaux types de couleur des dunes de sable de la région d'Ouargla et détermination de la cause de leur coloration à l'aide de méthodes spectroscopiques, (thèse de Doctorat).
- [2] Kern, A., Eysel, W. (1993). Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ. Heidelberg, Germany, ICDD Grant-in-Aid.
- [3] Effenberger, H., Mereiter, K., Zemann, J. (1981). Crystal structure refinements of magnesite, calcite, rhodochrosite, siderite, smithonite, and dolomite, with discussion of some aspects of the stereochemistry of calcite type carbonates. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, **156 (1-4)**, 233-244.
- [4] Atoji, M., Rundle, R. E. (1958). Neutron diffraction study of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *The Journal of Chemical Physics*, **29 (6)**, 1306-1311.
- [5] Pedersen, B. F., Semmingsen, D. (1982). Neutron diffraction refinement of the structure of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, **38 (4)**, 1074-1077.
- [6] Mahdadi, N., Chihi, S., Bouguettaia, H., Beddiaf, S., Mechri, M. L. (2017). Chromatic classification of Ouargla (Algeria) dunes sand: determination of main compositions and color causes, by using XRD, FTIR and XRF. *Silicon*, **9 (2)**, 211-221.
- [7] Mechri, M. L., Chihi, S., Mahdadi, N., Beddiaf, S. (2017). Study of heat effect on the composition of dunes sand of Ouargla (Algeria) using XRD and FTIR. *Silicon*, **9 (6)**, 933-941.
- [8] Sivakumar, S., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Jebakumar, J. P. P. (2013). FT-IR Spectroscopic studies on coastal sediment samples from nagapattinum district, Tamilnadu, India. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, **3 (4)**, 366.
- [9] Kiros, A., Gholap, A. V., Gigante, G. E. (2013). Fourier transform infrared spectroscopic characterization of clay minerals from rocks of Lalibela churches, Ethiopia. *International Journal of Physical Sciences*, **8 (3)**, 109-119.
- [10] Böke, H., Akkurt, S., Özdemir, S., Göktürk, E. H., Saltik, E. N. C. (2004). Quantification of CaCO_3 - $\text{CaSO}_3 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mixtures by FTIR analysis and its ANN model. *Materials Letters*, **58 (5)**, 723-726.
- [11] Stefov, V., Jovanovski, G., Shoptrajanov, B., Minceva-Sukarova, B., Dimitrovska, S., Boev, B. (2000). Minerals from Macedonia V. Characterization of gypsum, barite

and their synthetic analogues by FTIR and RAMAN spectroscopy. *Geologica Macedonica*, **14**, 61-66.

[12] Gnanasaravanan, S., Rajkumar, P. (2013). Characterization of minerals in natural and manufactured sand in Cauvery River belt, Tamilnadu, India. *Infrared Physics & Technology*, **58**, 21-31.

[13] Yin, Y., Yin, H., Wu, Z., Qi, C., Tian, H., Zhang, W., Feng, L. (2019). Characterization of coals and coal ashes with high Si content using combined second-derivative infrared spectroscopy and Raman spectroscopy. *Crystals*, **9** (10), 513.

[14] Meftah, N., Mahboub, M. S. (2020). Spectroscopic characterizations of sand dunes minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD analyses. *Silicon*, **12** (1), 147-153.

[15] Benchaa, S., Gheriani, R., Achouri, A., Bouguettaia, H., Mechri, M. L. (2021). Structural characterizations of dune sand and construction sand of Sidi Slimane and Zaouia El Abidia areas in the Touggourt region in southeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 1-11.

[16] Manssor, M. (2012). Studying the structural and optical properties of Zn O: Cu prepared by APCVD technique. *Jordan Journal of Physics*, **5** (2), 89-103.

[17] Anbalagan, G., Prabakaran, A. R., Gunasekaran, S. (2010). Spectroscopic characterization of Indian standard sand. *Journal of applied spectroscopy*, **77**, 86-94.

[18] Saikia, B. J., Parthasarathy, G., Sarmah, N. C., Baruah, G. D. (2008). Fourier-transform infrared spectroscopic characterization of naturally occurring glassy fulgurites. *Bulletin of Materials Science*, **31**, 155-158.

[19] Beddiaf, S., Chihi, S., Bouguettaia, H., Mechri, M. L., Mahdadi, N. (2017). Qualitative and quantitative evaluation of quartz in different granular types of Ouargla region sand dunes–Algeria. *Silicon*, **9** (4), 603-611.

[20] Osseni, S. A., Masseguin, M., Sagbo, E. V., Neumeyer, D., Kinlehounme, J. Y., Verelst, M., Mauricot, R. (2019). Physico-chemical characterization of siliceous sands from Houéyogbé in Benin Republic (West Africa): potentialities of use in glass industry. *Silicon*, **11**, 2015-2023.

[21] Kiros, A., Gholap, A. V., Gigante, G. E. (2013). Fourier transform infrared spectroscopic characterization of clay minerals from rocks of Lalibela churches, Ethiopia. *International Journal of Physical Sciences*, **8** (3), 109-119.

[22] Kokkinos, E., Zouboulis, A. (2020). Hydrometallurgical recovery of Cr (III) from tannery waste: optimization and selectivity investigation. *Water*, **12** (3), 719.

- [23] Ismaiel, H. A., Askalany, M. M., Ali, A. I. (2017). Evaluation of white silica sands in North Eastern Desert, Egypt. *Int J Sci Eng Res*, **8** (5), 1713-1722.
- [24] Kleesment, A. (2009). Roundness and surface features of quartz grains in Middle Devonian deposits of the East Baltic and their palaeogeographical implications. *Estonian Journal of Earth Sciences*, **58** (1).
- [25] Zouaouid, K., Gheriani, R. (2019). Mineralogical analysis of sand roses and sand dunes samples from two regions of South Algeria. *Silicon*, **11** (3), 1537-1545.
- [26] Saleh, N. J., Ibrahim, R. I., Salman, A. D. (2015). Characterization of nano-silica prepared from local silica sand and its application in cement mortar using optimization technique. *Advanced Powder Technology*, **26** (4), 1123-1133.
- [27] Diago, M., Iniesta, A. C., Soum-Glaude, A., Calvet, N. (2018). Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology. *Applied Energy*, **216**, 402-413.
- [28] Osseni, S. A., Masseguin, M., Sagbo, E. V., Neumeyer, D., Kinlehounme, J. Y., Verelst, M., Mauricot, R. (2019). Physico-chemical characterization of siliceous sands from Houéyogbé in Benin Republic (West Africa): potentialities of use in glass industry. *Silicon*, **11**, 2015-2023.
- [29] Lancaster, N., Nickling, W. G., Neuman, C. M. (2002). Particle size and sorting characteristics of sand in transport on the stoss slope of a small reversing dune. *Geomorphology*, **43** (3-4), 233-242.
- [30] Zhang, Y., Chun, X., Zhou, H., Zhang, Y., Huang, S., Wang, X. (2020). Particle size characteristics of surface sediments and their environmental significance: a comparative study of deserts in arid western Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences*, **79** (10), 203.
- [31] Dane, J. H., Hopmans, J. W. (2002). Water retention and Storage. *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America Book Series, Madison, WI.
- [32] Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., Froyen, L. (1998). Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, **32** (3-4), 193-208.
- [33] Chaouche, K., Moussaoui, Y., Belfar, M. L., Douadi, A., Djidel, M. (2019). Physical and chemical properties of aeolian and dune sand of the region 31-33° N, 4-9° E at southern Algeria. *Fresenius Environmental Bulletin*, **28** (12), 9208-9217.
- [34] Duvuna, G. A., Ayuba, A. (2015). A study on silica sand quality in Yazaram and Mugulbu deposits for glass making. *Nigerian Journal of Technology*, **34** (1), 109-112.

[35] Powers, M. C. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, **23** (2), 117-119.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans l'optique d'une valorisation technologique des ressources naturelles et particulièrement du sable assez présent dans les régions sahariennes de l'Algérie, nous avons étudié les propriétés structurales et physico-chimiques des trois séries d'échantillons de sable de deux régions de Touggourt El-kobra dans le sud-ouest d'Algérie. Il s'agit d'échantillons de sable de construction et sable des dunes au niveau de la commune de Sidi Slimane (Sud-ouest de Touggourt) et de sable des dunes au niveau de la commune de Zaouïa El-Abidia (Est de Touggourt).

Nous avons utilisé un panel de méthodes expérimentales d'investigation : la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie d'absorption infrarouge à transformation de Fourier (FTIR), la fluorescence des rayons X (XRF), la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et la distribution granulométrique par diffraction laser.

A l'issue de ce travail, les conclusions les plus importantes sont résumées dans les points suivants:

D'après la DRX, les résultats montrent que la concentration d'existence de quartz pour les sables des dunes de la région de Sidi Slimane et la région de Zaouïa El-Abidia sont respectivement de 55 et 48%, la concentration de gypse de 40 et 42% et en plus de la calcite de 5 et 10%. Les résultats obtenus à partir du sable de construction de la région de Sidi Slimane sont assez différents et sont de l'ordre de 78% et 22 % de quartz et de gypse.

Les résultats de FTIR indiquent que la plupart des bandes d'absorption sont du quartz (SiO_2) et du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dans le sable étudié avec de faibles concentrations de calcite (CaCO_3). Par ailleurs, l'on relève de faibles bandes d'absorption indicatrices d'existence de compositions amorphes telles que le carbone organique et de la présence d'eau. Ces résultats sont confirmés par ceux obtenus par XRD.

Les résultats obtenus par XRF indiquent que le sable des dunes et le sable de construction des deux régions sont constitués principalement de quartz (SiO_2), d'oxyde de calcium (CaO), d'oxyde de soufre (SO_3) et de faibles quantités d'autres oxydes tels

que l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de fer (Fe_2O_3), l'oxyde de magnésium (MgO), l'oxyde potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O) et des traces de chlore (Cl). Ceci confirme les résultats obtenus à partir des deux techniques DRX et FTIR.

La microscopie électronique à balayage (MEB) a fourni des informations sur la morphologie des grains de sable : ces grains de sable sont arrondies, anguleux et irréguliers pour le sable de dunes de la région de Zaouïa El-Abidia et de la région de Sidi Slimane. Ceux du sable de construction sont allongés, anguleux et arrondis.

Les mesures EDS montrent une concentration élevée des éléments d'oxygène (O) et de silicium (Si) à la base de la formation du quartz (SiO_2) qui constitue le principal composant des sables étudiés. La concentration en silicium du sable de dunes des deux zones d'étude a varié entre 11.63 et 15.44 % ; cette concentration est plus importante pour le sable de construction de la région de Sidi Slimane soit 18.27 %. Les résultats indiquent par ailleurs que les échantillons de sable sont composés de calcium (Ca), de soufre (S), de fer (Fe), de magnésium (Mg) et de potassium (K).

L'analyse granulométrique montre, en matière de distribution granulométrique des échantillons de sable, la prédominance des grains de 51.471 à 2009.687 μm de diamètre avec une valeur moyenne de 605.15 μm pour Zaouïa El Abidia. La granulométrie du sable des dunes de Sidi Slimane varie de 58.953 à 1167.725 μm avec une taille moyenne de 327.74 μm . Pour le sable de construction, la distribution granulométrique varie entre 262.376 et 2301.841 μm avec une valeur moyenne de 689.996 μm .

En conclusion, nous pensons que le travail accompli dans cette thèse a contribué à une connaissance plus approfondie de quelques propriétés structurales et physico-chimiques du sable de dunes mais aussi de construction au niveau de la région de Touggourt (Sud-est d'Algérie). Cette étude donne une bonne idée pour la possibilité d'extraction du quartz (silicium), l'élément de plus importance technologique et industriel dans plusieurs applications modernes telles que les applications nanotechnologies en photovoltaïques.

ANNEXE: les fiches ASTM
(PDF)

Name and formula

Reference code: 00-046-1045

Mineral name: Quartz, syn
 Compound name: Silicon Oxide
 PDF index name: Silicon Oxide

Empirical formula: O₂Si
 Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
 Space group: P3221
 Space group number: 154

a (Å): 4,9134
 b (Å): 4,9134
 c (Å): 5,4052
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,65
 Measured density (g/cm³): 2,66
 Volume of cell (10⁶ pm³): 113,01
 Z: 3,00

RIR: 3,41

Subfiles and quality

Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
 Cement and Hydration Product
 Common Phase
 Forensic
 Inorganic
 Mineral

Quality: Star (S)

Comments

Color: White
 Creation Date: 01/01/1970
 Modification Date: 01/01/1970
 Color: White
 Temperature of Data Collection: Pattern taken at 23(1) C. Low temperature quartz. 2q determination based on profile fit method

Optical Data: B=1.544, Q=1.553, Sign=+
 Additional Patterns: To replace 33-1161.

References

Primary reference: Kern, A., Eysel, W., Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ.

Annexe : les fiches ASTM (PDF)

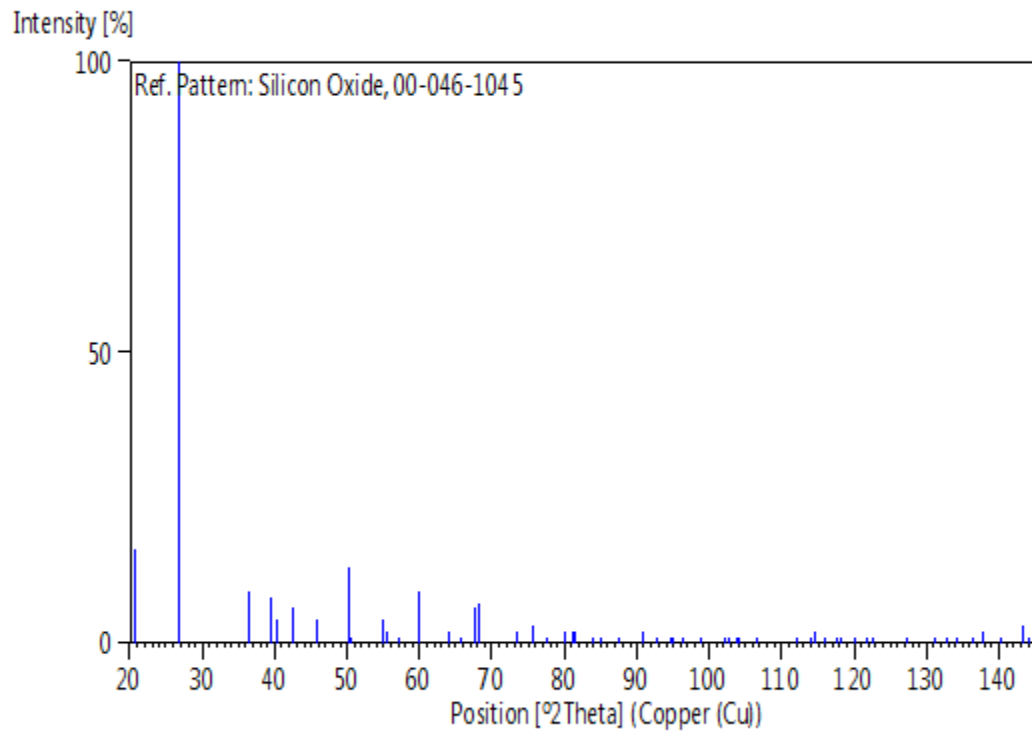
Heidelberg, Germany., *ICDD Grant-in-Aid*, (1993)
 Structure: *Z. Kristallogr.*, **198**, 177, (1992)
 Optical data: Swanson, Fuyat., *Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, *Circ. 539*, **3**, 24, (1954)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	4,25499	20,860	16,0
2	1	0	1	3,34347	26,640	100,0
3	1	1	0	2,45687	36,544	9,0
4	1	0	2	2,28149	39,465	8,0
5	1	1	1	2,23613	40,300	4,0
6	2	0	0	2,12771	42,450	6,0
7	2	0	1	1,97986	45,793	4,0
8	1	1	2	1,81796	50,139	13,0
9	0	0	3	1,80174	50,622	1,0
10	2	0	2	1,67173	54,875	4,0
11	1	0	3	1,65919	55,325	2,0
12	2	1	0	1,60827	57,235	1,0
13	2	1	1	1,54153	59,960	9,0
14	1	1	3	1,45289	64,036	2,0
15	3	0	0	1,41841	65,786	1,0
16	2	1	2	1,38210	67,744	6,0
17	2	0	3	1,37496	68,144	7,0
18	3	0	1	1,37188	68,318	5,0
19	1	0	4	1,28791	73,468	2,0
20	3	0	2	1,25595	75,660	3,0
21	2	2	0	1,22832	77,675	1,0
22	2	1	3	1,19982	79,884	2,0
23	2	2	1	1,19779	80,047	1,0
24	1	1	4	1,18399	81,173	2,0
25	3	1	0	1,18017	81,491	2,0
26	3	1	1	1,15298	83,840	1,0
27	2	0	4	1,14065	84,957	1,0
28	3	0	3	1,11455	87,439	1,0
29	3	1	2	1,08155	90,831	2,0
30	4	0	0	1,06380	92,788	1,0
31	1	0	5	1,04772	94,651	1,0
32	4	0	1	1,04380	95,119	1,0
33	2	1	4	1,03461	96,238	1,0
34	2	2	3	1,01490	98,751	1,0
35	1	1	5	0,98958	102,231	1,0
36	3	1	3	0,98725	102,567	1,0
37	3	0	4	0,97834	103,877	1,0
38	3	2	0	0,97617	104,203	1,0
39	3	2	1	0,96078	106,593	1,0
40	4	1	0	0,92853	112,114	1,0
41	3	2	2	0,91816	114,061	1,0
42	4	0	3	0,91606	114,467	2,0
43	4	1	1	0,91518	114,639	2,0
44	2	2	4	0,90889	115,885	1,0
45	0	0	6	0,90085	117,537	1,0
46	2	1	5	0,89719	118,313	1,0
47	3	1	4	0,88891	120,124	1,0
48	1	0	6	0,88135	121,853	1,0
49	4	1	2	0,87817	122,605	1,0
50	3	0	5	0,85980	127,251	1,0
51	1	1	6	0,84584	131,203	1,0
52	5	0	1	0,84075	132,756	1,0
53	4	0	4	0,83592	134,293	1,0
54	2	0	6	0,82956	136,424	1,0

55	4	1	3	0,82539	137,895	2,0
56	3	3	0	0,81891	140,318	1,0
57	5	0	2	0,81168	143,251	3,0
58	3	3	1	0,80967	144,119	1,0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code: 01-083-1762

Mineral name: Calcite
Compound name: Calcium Carbonate
ICSD name: Calcium Carbonate

Empirical formula: CCaO_3
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167

a (Å): 4,9896
b (Å): 4,9896
c (Å): 17,0610
Alpha (°): 90,0000
Beta (°): 90,0000
Gamma (°): 120,0000

Calculated density (g/cm³): 2,71
Volume of cell (10⁶ pm³): 367,85
Z: 6,00

RIR: 3,25

Subfiles and quality

Subfiles: Inorganic
Mineral
Modelled additional pattern

Quality: Calculated (C)

Comments

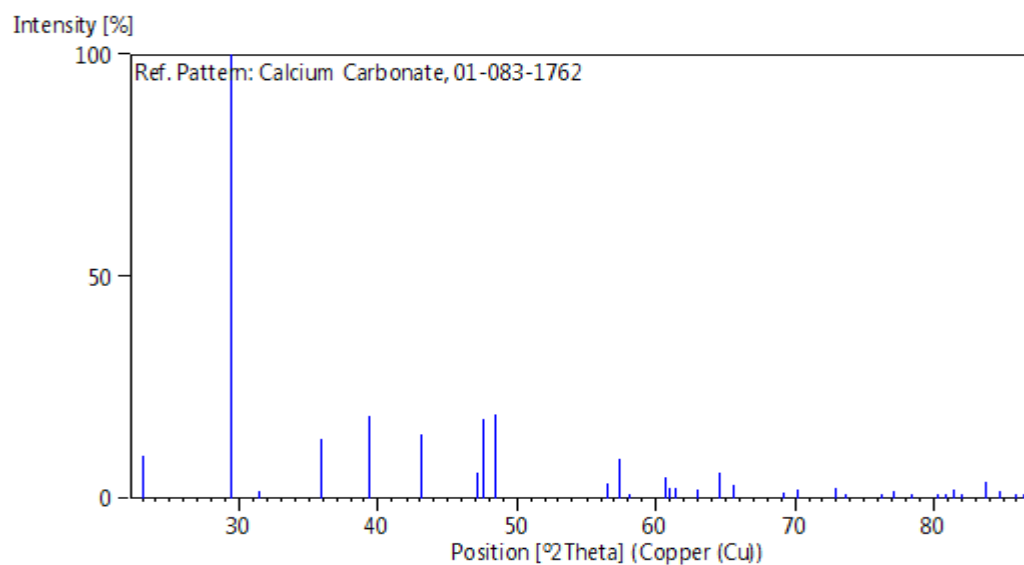
ICSD collection code: 100676
Creation Date: 01/01/1970
Modification Date: 01/01/1970
ICSD Collection Code: 100676
Temperature Factor: ATF
Sample Source or Locality: Specimen from Iceland.

References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*, (1997)
Structure: Effenberger, H., Mereiter, K., Zemmann, J., *Z. Kristallogr.*, **156**, 233, (1981)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3,85478	23,054	9,6
2	1	0	4	3,03555	29,400	100,0
3	0	0	6	2,84350	31,435	1,8
4	1	1	0	2,49480	35,969	13,3
5	1	1	3	2,28463	39,409	18,5
6	2	0	2	2,09443	43,158	14,3
7	0	2	4	1,92739	47,114	5,8
8	0	1	8	1,91240	47,506	18,0
9	1	1	6	1,87532	48,505	19,0
10	2	1	1	1,62580	56,562	3,5
11	1	2	2	1,60409	57,398	8,8
12	1	0	10	1,58689	58,079	1,0
13	2	1	4	1,52524	60,667	4,7
14	2	0	8	1,51777	60,998	2,4
15	1	1	9	1,50937	61,374	2,5
16	1	2	5	1,47317	63,052	2,0
17	3	0	0	1,44037	64,660	5,7
18	0	0	12	1,42175	65,612	3,1
19	2	1	7	1,35677	69,186	1,2
20	0	2	10	1,33897	70,240	2,0
21	1	2	8	1,29666	72,892	2,3
22	3	0	6	1,28493	73,666	0,5
23	2	2	0	1,24740	76,271	0,9
24	1	1	12	1,23524	77,160	1,8
25	2	2	3	1,21843	78,426	0,1
26	1	3	1	1,19552	80,230	0,1
27	3	1	2	1,18681	80,940	0,4
28	2	1	10	1,17979	81,523	2,1
29	0	1	14	1,17289	82,106	0,3
30	1	3	4	1,15378	83,769	3,8
31	2	2	6	1,14232	84,804	1,8
32	3	1	5	1,13075	85,880	0,1
33	1	2	11	1,12467	86,457	0,4

Stick Pattern

Name and formula

Reference code: 01-074-1905

Mineral name: Gypsum
 Compound name: Calcium Sulfate Hydrate
 ICSD name: Calcium Sulfate Hydrate

Empirical formula: $\text{CaH}_4\text{O}_6\text{S}$
 Chemical formula: $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$

Crystallographic parameters

Crystal system: Monoclinic
 Space group: I2/c

a (Å): 5,6800
 b (Å): 15,1800
 c (Å): 6,5200
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 118,3700
 Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 2,31
 Volume of cell (10⁶ pm³): 494,65
 Z: 4,00

RIR: 1,90

Subfiles and quality

Subfiles: Inorganic
 Mineral
 Modelled additional pattern

Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 027876
 Creation Date: 01/01/1970
 Modification Date: 01/01/1970
 ICSD Collection Code: 027876
 ICSD SG: I12/C1 IT is: 15 SG short form: I2/c. Calculated Pattern
 Original Remarks: ATOM H 1 +1. 16.00 Atoms not
 located in unit cell. Calculated Pattern Original Remarks: REM
 M PDF 6-46, 33-311 (setting C2/c). Test from ICSD: No R
 value given. Test from ICSD: At least one TF missing. Sample
 Source or Locality: Specimen from UT, USA.

References

Primary reference:

Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)

Structure:

Atoji, M., Rundle, R.E., *J. Chem. Phys.*, **29**, 1306, (1958)**Peak list**

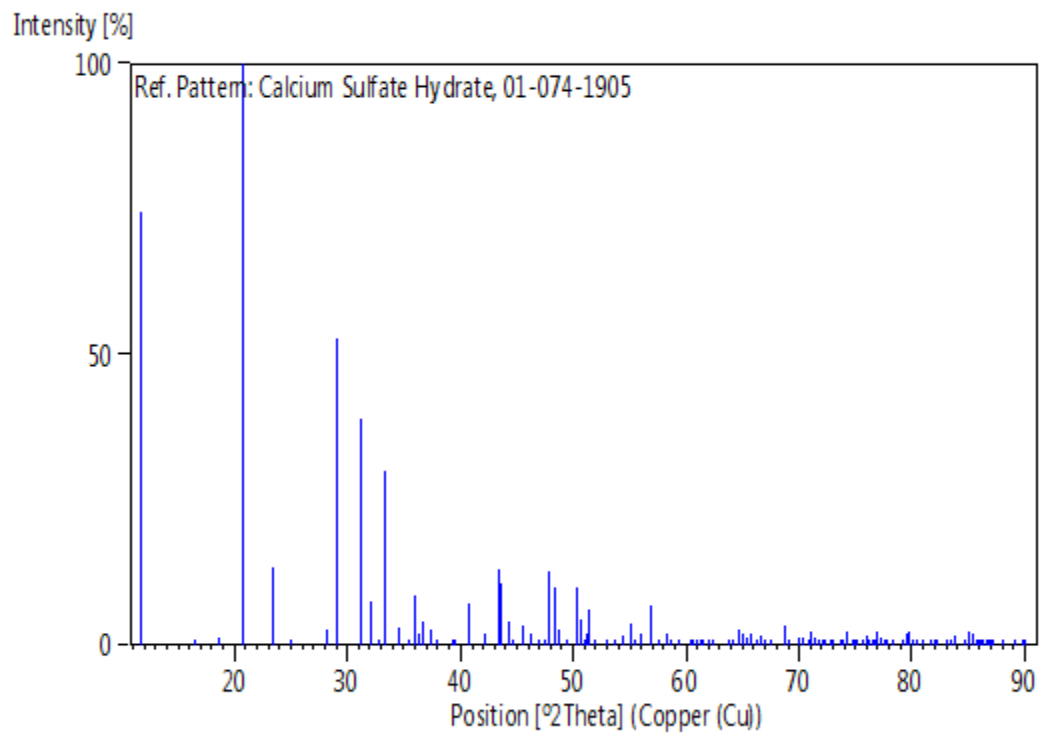
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	2	0	7,59000	11,650	74,6
2	0	1	1	5,36647	16,505	0,4
3	1	1	0	4,74715	18,677	1,4
4	-1	2	1	4,27832	20,745	100,0
5	0	4	0	3,79500	23,422	13,3
6	1	3	0	3,55577	25,023	0,6
7	-1	1	2	3,16830	28,142	2,7
8	-1	4	1	3,06126	29,148	52,9
9	1	2	1	2,87573	31,074	38,9
10	0	0	2	2,86847	31,155	27,6
11	-2	1	1	2,78884	32,068	7,5
12	-1	3	2	2,72836	32,799	0,8
13	0	5	1	2,68324	33,366	29,8
14	1	5	0	2,59476	34,539	2,6
15	-2	0	2	2,58980	34,607	3,0
16	0	6	0	2,53000	35,452	0,5
17	2	0	0	2,49891	35,908	8,7
18	-2	3	1	2,47468	36,272	1,9
19	-2	2	2	2,45105	36,634	4,2
20	1	4	1	2,40425	37,373	2,7
21	2	2	0	2,37357	37,874	0,1
22	0	4	2	2,28833	39,342	0,1
23	-1	6	1	2,27330	39,613	0,1
24	-1	5	2	2,21527	40,696	7,3
25	-2	4	2	2,13916	42,212	2,0
26	2	4	0	2,08708	43,318	13,1
27	-1	2	3	2,07877	43,500	7,0
28	1	1	2	2,07290	43,629	10,5
29	-2	1	3	2,04523	44,250	4,2
30	0	7	1	2,02849	44,635	0,5
31	1	7	0	1,98937	45,562	3,4
32	2	1	1	1,95683	46,363	2,1
33	1	3	2	1,93559	46,902	0,1
34	-2	3	3	1,91116	47,538	0,5
35	0	6	2	1,89742	47,904	12,8
36	-1	4	3	1,87816	48,427	9,9
37	-3	1	2	1,86559	48,774	2,6
38	2	3	1	1,83844	49,543	0,3
39	-2	6	2	1,80975	50,382	10,0
40	-1	7	2	1,80006	50,673	4,5
41	0	3	3	1,78882	51,014	0,9
42	-1	8	1	1,78171	51,232	1,9
43	2	6	0	1,77789	51,350	6,2
44	-3	3	2	1,76216	51,842	0,1
45	1	5	2	1,72426	53,070	0,1
46	-2	5	3	1,70693	53,651	0,6
47	-3	2	3	1,68353	54,458	1,6
48	-3	4	1	1,66505	55,114	3,6
49	3	1	0	1,65452	55,495	0,3
50	-1	6	3	1,64336	55,904	2,0

Annexe : les fiches ASTM (PDF)

51	-2	0	4	1,61982	56,790	6,8
52	-3	5	2	1,59827	57,627	0,4
53	0	8	2	1,58238	58,261	2,0
54	-3	4	3	1,57154	58,702	0,6
55	2	0	2	1,55370	59,443	0,5
56	-2	8	2	1,53063	60,431	1,0
57	1	2	3	1,52449	60,700	0,3
58	-1	3	4	1,52030	60,885	1,1
59	0	10	0	1,51800	60,987	0,6
60	2	8	0	1,51120	61,291	0,5
61	1	7	2	1,50670	61,494	0,5
62	-2	7	3	1,49488	62,034	1,0
63	-2	4	4	1,48979	62,270	0,6
64	-3	1	4	1,48567	62,462	0,8
65	3	5	0	1,45949	63,712	1,0
66	-1	10	1	1,45673	63,847	0,9
67	-2	9	1	1,44981	64,188	0,2
68	1	4	3	1,43985	64,686	2,7
69	0	7	3	1,43423	64,971	2,0
70	-3	3	4	1,43183	65,093	1,0
71	-3	6	3	1,42596	65,394	1,2
72	-4	0	2	1,41857	65,778	2,1
73	0	2	4	1,40929	66,266	0,2
74	3	2	1	1,40374	66,562	1,6
75	-4	2	2	1,39442	67,066	0,4
76	-4	1	3	1,38593	67,532	0,5
77	-2	6	4	1,36395	68,771	3,5
78	-4	1	1	1,35743	69,148	0,3
79	0	10	2	1,34162	70,081	1,2
80	3	4	1	1,33682	70,370	1,2
81	1	11	0	1,33022	70,771	0,6
82	-3	8	1	1,32569	71,050	1,5
83	2	6	2	1,32397	71,156	2,2
84	3	7	0	1,32111	71,334	1,3
85	1	9	2	1,31378	71,793	0,1
86	-2	10	2	1,30961	72,057	0,3
87	-2	9	3	1,30606	72,284	0,2
88	-2	1	5	1,29900	72,740	0,2
89	-4	0	4	1,29490	73,007	0,2
90	-1	7	4	1,28433	73,707	0,2
91	2	9	1	1,28213	73,854	0,2
92	-3	8	3	1,27702	74,199	2,4
93	-1	11	2	1,26961	74,706	0,3
94	0	12	0	1,26500	75,025	0,6
95	-2	3	5	1,26255	75,196	0,3
96	-3	9	2	1,25541	75,698	0,1
97	-3	2	5	1,24945	76,124	1,5
98	0	6	4	1,24769	76,250	1,1
99	3	6	1	1,24383	76,530	0,6
100	-1	10	3	1,24224	76,645	0,9
101	-1	2	5	1,23914	76,872	2,4
102	-4	6	2	1,23734	77,004	0,9
103	4	2	0	1,23286	77,336	1,4
104	-3	7	4	1,22888	77,633	0,8
105	-4	4	4	1,22552	77,886	0,3
106	2	3	3	1,22031	78,282	0,1
107	3	1	2	1,20819	79,221	0,1
108	1	8	3	1,20328	79,609	1,9
109	2	8	2	1,20212	79,701	2,2
110	1	3	4	1,19710	80,102	0,4
111	-1	4	5	1,19239	80,483	0,6

112	4	4	0	1,18679	80,942	0,2
113	3	3	2	1,17870	81,615	0,5
114	-3	10	1	1,17425	81,990	0,5
115	1	12	1	1,17128	82,243	0,3
116	2	5	3	1,16122	83,112	0,1
117	0	12	2	1,15745	83,444	0,8
118	-4	7	1	1,15393	83,756	0,5
119	-4	6	4	1,15269	83,866	1,6
120	0	8	4	1,14416	84,636	0,5
121	-3	10	3	1,14003	85,015	2,3
122	-2	12	2	1,13665	85,327	1,9
123	-3	6	5	1,13303	85,665	0,8
124	2	11	1	1,13089	85,866	0,2
125	2	12	0	1,12863	86,080	0,7
126	3	5	2	1,12565	86,364	0,4
127	-5	2	3	1,12189	86,725	0,4
128	4	6	0	1,12029	86,879	0,7
129	0	11	3	1,11905	87,000	0,3
130	-3	9	4	1,11738	87,162	0,4
131	-2	10	4	1,10764	88,125	0,2
132	-5	1	4	1,09851	89,050	0,3
133	-1	12	3	1,09176	89,749	0,1
134	4	3	1	1,08942	89,995	0,1

Stick Pattern



Title: Etude Physique et Structurale des Echantillons de Sable Prises de la
Région de Sidi Slimane et la Région de Touggourt.

Abstract

The aim of this work is to identify the existed phases in the dune sand for the area of the Zaouia El Abidia (**SDZ**), the dune sand and construction sand for the Sidi Slimane area (**SDS**, **SCS**), their concentrations as well as the grains size and morphology. These characteristics were carried out using the following techniques: X-ray diffraction (**XRD**), X-ray fluorescence (**XRF**), Fourier-transformation infrared spectroscopy (**FTIR**), scanning electron microscopy (**SEM**) occupied with an energy dispersive X-ray spectroscopy (**EDX**) and the granular classification by diffraction laser (**LA-960**). It was found that the sand dunes of the two regions mainly consist of α -quartz (SiO_2), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and calcite (CaCO_3), while the construction sand of the Sidi Slimane region is also composed of α -quartz (SiO_2) and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

The SEM yielded information of sand morphology grains were the samples **SDZ** and **SDS** are rounded, angular, and irregular and **SCS** is elongated, rounded and angular. The granulometric analysis (LA-960) showed that in the size distribution of **SDZ** samples prevail grains with 51.471 to 2009.687 μm in diameter. The particle size of **SDS** ranged from 58.953 to 1167.725 μm , and for **SCS**, the grain size distribution varied between 262.376 and 2301.841 μm .

Keywords: Dunes Sand, Construction Sand, XRD, XRF, FTIR, SEM, EDX, Zaouia El Abidia, Sidi Slimane (Touggourt Southeastern Algeria).

الملخص

حددت في هذا العمل مختلف التراكيب المكونة لرمل الكثبان لمنطقة الزاوية العابدية ورمل الكثبان ورمال البناء لمنطقة سيدي سليمان مصحوبة ببعض تراكيزها وكذلك تمت دراسة شكل سطح حبيبات الرمال المدروسة وتحديد أقطارها، وذلك باستعمال التقنيات التالية: انعراج الأشعة السينية (DRX)، ومطيافية الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوري (FTIR)، و فلورة الأشعة السينية (XRF)، والمجهر الإلكتروني الماسح (MEB) المصحوب بمطيافية الأشعة السينية لتشتت الطاقة (EDS) والتصنيف الحبيبي بتقنية حيود الليزر (LA-960). لقد تبين أن رمل الكثبان للمنطقتين يتكون أساسا من الكوارتز (SiO_2) طور ألفا (α)، والجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) و الكالسيت (CaCO_3) أما رمل البناء لمنطقة سيدي سليمان فيتكون كذلك من الكوارتز (SiO_2) طور ألفا (α) والجبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). تراوحت أشكال عينات الحبيبات لرمال الكثبان لمنطقة الزاوية العابدية و منطقة سيدي سليمان من مستديرة إلى شبه مستطيلة إلى غير منتظمة. ومع ذلك، فإن رمال البناء لمنطقة سيدي سليمان لها أشكال تتراوح من مستطيلة، زاوية إلى شبه مستديرة. تراوح حجم حبيبات الكثبان الرملية لعينات منطقة الزاوية العابدية بين 51.471 و $2009.687 \mu\text{m}$. أما بالنسبة لرمال الكثبان لمنطقة سيدي سليمان، فقد تراوحت بين 58.953 و $1167.725 \mu\text{m}$ و $2301.841-262.376 \mu\text{m}$ لرمال البناء لنفس المنطقة.

الكلمات المفتاحية: رمل الكثبان، رمل البناء، DRX, XRF, FTIR, MEB, EDS, الزاوية العابدية, سيدي

سليمان (تقرت جنوب شرق الجزائر).

Résumé

Dans le cadre de ce travail de recherche ayant pour objet la caractérisation physico-chimique du sable des régions sahariennes, nous avons identifié les différentes compositions de sable des dunes dans la région de Zaouïa-El-Abidia, sable des dunes et sable de construction dans la région de Sidi Slimane. Les concentrations ainsi que la morphologie et la taille des grains ont été déterminés à l'aide des techniques d'investigation suivantes : la diffraction des rayons X (DRX), la fluorescence des rayons X (XRF), la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS) et la classification granulométrique par diffraction laser.

Les résultats obtenus attestent que les sables des dunes des deux régions sont principalement constitués de quartz (SiO_2) en phase alpha (α), de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de calcite (CaCO_3) ; le sable de construction de la région de Sidi Slimane est composé de quartz (SiO_2) phase (a) et gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

L'analyse morphologique de surface indique des grains de sable arrondies, anguleuse et irréguliers pour le sable de dunes dans les deux régions d'étude. Ceux du sable de construction sont allongés, anguleuse et arrondies. La taille des grains de sable des dunes pour les échantillons étudiés de la région Zaouïa El- Abidia varie entre 51.471 et 2009.687 μm et de 58.953 à 1167.725 μm pour la région de Sidi Slimane, enfin de 262.376 à 2301.841 μm pour le sable de construction.

Mots clé : Sable des dunes, Sable de Construction, XRD, XRF, FTIR, MEB, EDS, Zaouïa El-Abidia, Sidi Slimane (Touggourt Sud-est algérien).