

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés
Département des Sciences des Matériaux



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Génie de surface**

Par : **LAZAR Khaled**

Intitulé

Caractérisation et valorisation du sable du grand erg oriental Algérien comme matériaux de construction

Soutenu publiquement, le 01/02/2012, devant le jury composé de :

M^d. ZAOURAR Naima	Professeur à l'USTHB	Présidente
M. NIBOU Djamel	Professeur à l'USTHB	Directeur de mémoire
M. KEDDAM Mourad	Professeur à l'USTHB	Examineur
M. MELLAH Abdelhamid	Directeur de recherche au CRND	Examineur

Dédicace :

A Allah...

A mes parents :

Amor et Méssaouda.

A mon frère Lakhdar et toutes mes
sœurs surtout Thoraya.

A tout mes amis.

Pour votre aide, votre confiance et pour
votre sollicitude.

Remerciements :

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Technologie des Matériaux de l'université des sciences et technologie Houari Boumediene dans le cadre de la préparation d'un mémoire de magister en sciences des matériaux, option Génie des Surface. C'est un travail de recherche qui n'aurait pas été possible sans le soutien et la participation de plusieurs personnes auxquelles je souhaite également exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance.

Mes remerciements vont tout d'abord au Professeur NIBOU Djamel mon encadreur qui, après m'avoir confié ce travail, m'a mis en rapport avec les personnes et les organismes susceptibles d'aider à sa réalisation, et qui avec sa disponibilité constante, ses critiques et suggestions ont permis d'améliorer progressivement la rédaction ainsi que les interprétations des résultats. L'atmosphère dynamique et amicale qui règne autour de lui m'a beaucoup servi dans les moments difficiles

Je tiens à remercier Mme ZAOURAR Naima, professeur à l'USTHB, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ma soutenance. Mes vifs remerciements vont aussi à Mr. KEDDAM MOURAD, professeur à l'USTHB et à Mr MELLAH Abdelhamid, Directeur de recherche au CRND, pour avoir bien voulu faire partie du jury.

Aussi ma gratitude pour le docteur TOUIL Yousef, professeur de département hydraulique de l'université de KASDI Merbah de Ouargla, que je lui dois tous les efforts pour m'aider à finaliser cette étude.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes du laboratoire de géologie de l'ingénieur, le professeur ZORKANE Omar et le professeur OUDJIT et tous les gens de département de Génie Civil qui, par leur collaboration, leurs conseils, et leurs encouragements ont contribué à sa réalisation. Et aussi les personnes de département de chimie qui m'ont aidés avec leurs conseils et avec l'utilisation des équipements.

Mes remerciements aussi au M.CHEBBI Abdelalli et le Professeur DJADOUN du département de géologie pour ses conseils, ses encouragements et l'aide constante qu'ils m'ont accordés.

J'associe mes remerciements à tous les membres des laboratoires du département des sciences des matériaux SDM avec qui j'ai partagé avec plaisir et avec joies ces années d'étude, et je souhaite bonne chance et bonne continuité pour leurs travaux de recherches.

Je tiens à remercier sincèrement toute ma famille : ma bonne mère, mon frère Lakhdar, ma sœur Thoraya et toutes mes autres sœurs de leurs encouragements, soutien et patience durant des années et j'exprime toute ma gratitude et mon amour.

Sans oublier tous mes amis, en particulier AOUI Mehdi et BELAID Rochdi qui m'on donné une belle preuve d'amitié et de courage.

Sommaire :		
Dédicace		i
Remerciement		ii
Sommaire		iv
Introduction générale		vii
I.	Chapitre 01 : Étude bibliographique	09
I.1.	Les milieux granulaires	10
I.1.1.	Les granulats (ou les agrégats)	11
I.1.2.	Les sables	11
I.1.2.1.	Définition	11
I.1.2.2.	Les différents constituants du sable	12
a.	Le silicium	12
b.	La silice (ou quartz ; SiO ₂)	14
c.	Les silicates	16
d.	Les argiles	16
e.	Les carbonates	17
I.2.	Quelques informations sur l'erg oriental et choix de prélèvement	18
I.2.1.	Définition de l'erg	19
I.2.2.	Les formes dunaires élémentaires	20
a.	les nebkas (ou dunettes d'obstacle)	20
b.	Dune en bouclier	20
c.	Les Barkhanes	20
d.	Les dunes paraboliques	21
e.	Les Ghourds	21
I.3.	Généralités sur les bétons	23
I.3.1.	Définition	23
I.3.2.	Classification des bétons	23
I.3.3.	Ordre de grandeur	24
I.3.4.	Avantages et inconvénients du béton	25
I.3.4.1.	Avantages du béton	25
I.3.4.2.	Inconvénients du béton	25
I.3.5.	Les différents composants de béton	25
I.3.5.1.	Le ciment	26
I.3.5.2.	Les granulats	26
a.	Le gravier	26
b.	Le sable	26
I.3.5.3.	Influence de la granularité	28
I.3.5.4.	L'eau de gâchage	30
I.3.5.5.	Les adjuvants	30
I.3.6.	Composition et dosage des bétons	30
I.3.7.	Les propriétés essentielles pour les bétons	30
I.3.7.1.	L'ouvrabilité de béton frais	31

I.3.7.2.	La résistance en compression	31
I.3.8.	Désignation des bétons	32
I.3.9.	Les modes d'endommagements des éprouvettes en béton	33
II.	Chapitre 02 : Moyens techniques et expérimentales	34
II.1.	Caractérisation du sable	35
II.1.1.	Teneur en eau	35
II.1.2.	Compacité, porosité et masse volumique	35
a.	Compacité (c)	35
b.	Porosité (n)	35
c.	Masse volumique (ρ)	36
II.1.3.	Essai de granulométrie par tamisage	36
II.1.3.1.	Principe de l'essai	36
II.1.3.2.	Les tamis utilisés pour le tamisage	36
II.1.3.3.	Classe des granulats	37
II.1.3.4.	Les renseignements obtenus de la de la granularité	37
a.	Les facteurs d'uniformité de Hazen Cu et de courbure Cc	38
b.	Les indices de classement So et d'asymétrie Sk	38
II.1.3.5.	Module de finesse d'un granulats	39
II.1.3.6.	Mode opératoire de l'essai	39
a.	Appareillage	39
b.	Tamisage	39
c.	Pesées de refus	40
II.1.4.	Essai de granulométrie par laser	40
II.1.4.1.	Principales Résultats à calculer	41
II.1.5.	Équivalent de sable (ES)	41
II.1.5.1.	Expression de l'essai de ES	42
II.1.5.2.	Préparation de la solution concentrée	42
II.1.5.3.	Mode opératoire de l'essai de ES	43
II.1.6.	Valeur au bleu de méthylène VBS	44
II.1.6.1.	Ordre de grandeur de VBS	44
II.1.6.2.	Exécution de l'essai	45
II.1.7.	Taux de matière organique (TMO) et de carbonates	46
II.1.7.1.	Taux de matière organique (TMO)	46
II.1.7.2.	Teneur en carbonate (de calcium)	46
II.1.8.	La diffractométrie des rayons X (DRX)	46
II.1.9.	Le microscope électronique à balayage (MEB)	46
II.2.	Valorisation du sable de l'erg oriental comme matériaux de construction	47
II.2.1.	Caractéristique du ciment utilisé	47
II.2.2.	Méthode de préparation des éprouvettes	48
II.2.2.1.	Choix de prélèvement	48
II.2.2.2.	Choix de sable	50

II.2.2.3.	Méthode et choix de composition	51
II.3.	Caractérisation des éprouvettes de bétons confectionnés par les échantillons de sable	52
II.3.1.	Contrôle non destructif	52
II.3.1.1.	Essai sclérométriques	52
II.3.1.2.	Contrôle par les ondes ultrasonores	54
II.3.2.	Essai destructive (essai de compression ou d'écrasement)	56
III.	Chapitre 03 : Résultats et discussions	58
III.1.	Caractérisation du sable	59
III.1.1.	Teneur en eau	59
III.1.2.	Compacité, porosité et masse volumique	59
III.1.3.	Essai de granulométrie par tamisage	60
III.1.3.1.	Les facteurs d'uniformité de Hazen Cu et de courbure Cc	62
III.1.3.2.	indices de classement So et d'asymétrie Sk	63
III.1.3.3.	Module de finesse des sables	64
III.1.4.	Essai de granulométrie par laser	65
III.1.5.	Essais d'équivalent de sable (ES) et de bleu de méthylène (VBS)	67
III.1.6.	Taux de matière organique, de salinité, de carbonate et pH de chaque sable	68
III.1.7.	Caractérisation par diffraction des rayons X	70
III.1.8.	Observation par microscopie électronique à balayage	73
III.2.	Valorisation du sable de l'erg oriental comme matériaux de construction	76
III.2.1.	Préparation des éprouvettes et choix de sable	76
III.2.2.	Contrôle non destructif	78
III.2.2.1.	Essai sclérométriques	78
III.2.2.2.	Contrôle par les ondes ultrasonores	79
III.2.3.	Essai destructive (essai de compression ou d'écrasement)	80
Conclusion générale		85
ANNEXE : Fiche techniques des sables étudiées		88
Références bibliographiques		90
Liste des figures		93
Liste des tableaux		95

Introduction générale :

Dans ce mémoire nous nous intéressons au sable du grand erg oriental Algérien dont le but de réaliser une contribution à l'étude de sa caractérisation physico-chimique ainsi que sa valorisation en tant que matériaux de construction entrant la composition de béton.

Les dunes de sable de l'erg oriental occupent 12 % de la surface du Sahara Algérien. Il existe aussi d'autres ergs tels l'erg occidental, l'erg Chèche et l'erg Eguidi qui occupent une surface d'environ 25 à 30 % du Sahara.

D'un premier point de vue, le sable est un signe de désertification et de malheur pour les populations du Sahara. Il est la cause d'engloutissement des terres agricoles, des routes, des puits et même de disparition de villes entières. En plus, le sable peut augmenter l'usure et les grippages des pièces ou systèmes mécaniques, électriques, ou électronique.

Malgré ces inconvénients, le sable est depuis longtemps très utilisé dans le domaine des travaux civils et publics car c'est un élément essentiel du matériau de construction qui est le béton.

Actuellement, le sable est largement utilisé dans le domaine de filtration, par exemple filtration de l'eau et filtration des produits toxiques. Il est aussi utilisé pour les opérations à hautes températures et qui nécessitent des matériaux réfractaires comme le moulage et les fours. Dans le domaine optique, le sable est utilisé pour la production des verres de toutes sortes. On le trouve aussi dans le domaine énergétique, électrique et électronique comme les panneaux et les équipements d'énergie solaire. Le sable est la matière première pour l'extraction de dioxyde de silicium (SiO_2) qui est lui-même la source de silicium (Si) pur.

Le but de cette étude consiste à :

- Détermination des caractéristiques de quelques types de sable de l'erg oriental.
- Valorisation du sable pour une exploitation et utilisation rationnelle de ce matériau comme matériau de construction.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur le sable de l'erg oriental Algérien, les principales formes dunaires, le choix des prélèvements des échantillons et la valorisation du sable comme matériau de construction et composant du béton.

Le deuxième chapitre traite les principales techniques de caractérisation du sable (granulométrie par tamisage et par laser, la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage, la diffraction des rayons X, la mesure de l'équivalent de sable, la mesure de la valeur au bleu de méthylène et la détermination de la masse volumique), les conditions opératoires utilisées, la méthode de préparation des éprouvettes et les techniques de caractérisation non destructives (essais sclérométriques et ondes ultrasonores) et destructives (essais de compression).

Le troisième chapitre concerne l'exploitation et l'interprétation des résultats.

Et enfin nous terminons par des conclusions et perspectives tirées de ce travail

Chapitre 01 :

Étude

bibliographique

I.1. Les milieux granulaires (Fig.I.1) :

Un milieu granulaire est un assemblage de nombreux éléments solides d'une façon discontinue, qui peuvent interagir par exemple lors des collisions dues au mouvement (par le vent, écoulement d'eau,...), mais aussi sous l'effet de forces électromagnétiques ou gravitationnelles. Ces éléments, désignés sous le terme de grains, sont généralement arrangés de manière désordonnée et présentent souvent des différentes formes, de taille et d'état de surface. On trouve des milieux granulaires à toutes les échelles : des fines poudres compactées composant les cachets d'aspirine, en passant par les dunes du désert, jusqu'au ballast des voies ferrées et aux anneaux de saturne. La structure et les propriétés de ces milieux ne dépendent pas seulement des caractéristiques des grains, mais aussi de l'histoire du milieu, c'est-à-dire de l'ensemble des mouvements subis, des traitements appliqués, etc.

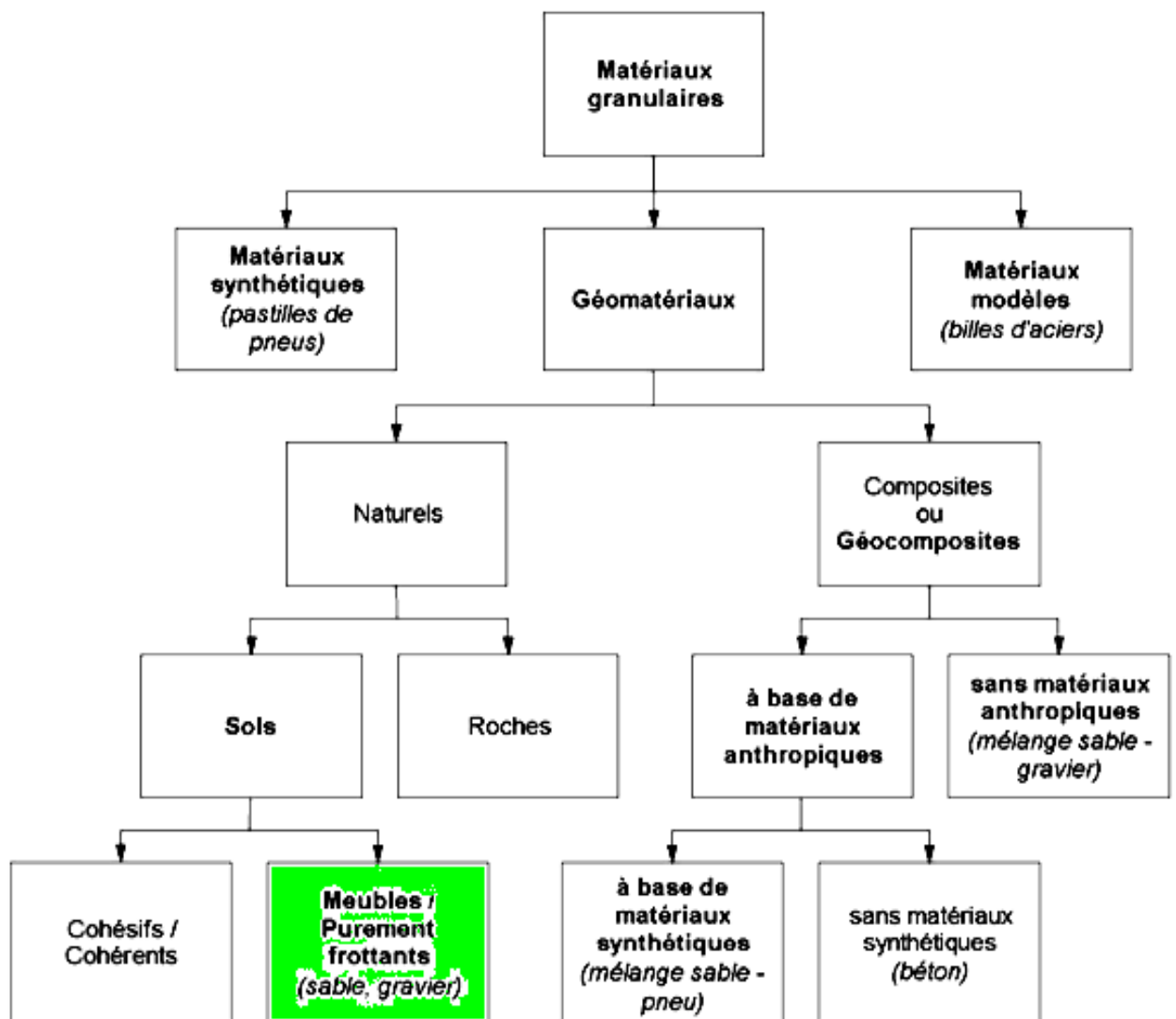


Fig I.1 : Organigramme non exhaustif des matériaux granulaires en mécanique des sols, [10].

I.1.1. Les granulats (ou les agrégats) :

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant du recyclage. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation est abandonnée depuis fort longtemps. Certains persistent à utiliser l'appellation « agrégats », vieil usage tout à fait impropre ; en effet le dictionnaire donne la définition suivante :

Agrégat : réunion de substances diverses formant un tout non homogène.

Le béton, par exemple, est un agrégat de gravier sable et ciment, ce dernier jouant le rôle de matière d'agrégation [10].

I.1.2. Les sables :

I.1.2.1. Définition :

C'est un produit de la désagrégation des roches sous l'action des agents d'érosions tels que l'air, la pluie, gradient de température, sable de terre, de mer, de rivière, les sables du désert, des volcans [1].

Cette désagrégation est faite à long terme (sauf dans le cas des sable synthétiques) et qui présente un constituant très important de la texture des sols et des couches terrestres (les Sahara, les plages, les sables volcaniques.....). Donc le sable est considéré comme un sédiment détritique meuble composé de grains jointifs mais libres, dont est la taille des grains à un écart de dimension est bien défini. Cet écart diffère d'ailleurs pour certains auteurs :

Pour FOLK [27] la valeur est de 2 mm à 20 μm et c'est la plus adaptée, 5 mm à 50 μm pour WEYDERT [30], comprise entre 2 mm et 64 μm selon PETT [26]. Le terme sable est en fait très général, la qualification se référant principalement au critère granulométrique (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Dénomination d'un sol selon la granularité, [4].

Nom	Sol à matrice fine			Sol à matrice grossière						cailloux	blocs		
	argile	limon			sable			grave					
		fin	moyen	grossier	fin	moyen	grossier	fin	moyen			grossier	
Dimension des particules (mm)		0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2	6	20	60	200	

Le sable est aussi un matériau naturel aux propriétés étonnantes : le sable se comporte parfois comme un solide, parfois comme un liquide, par exemple si quelqu'un tombe de haut sur du sable, il va se briser les os comme sur de la pierre, et pourtant il a une fluidité ou même les Égyptiens ont utilisé le sable comme un fluide hydraulique pour faire descendre les blocs des rochers et les cercueils de pierre.

I.1.2.2. Les différents constituants du sable :

Le sable comporte différentes variétés de minéraux qui sont dérivés de l'élément de base : le silicium (Si).

Généralement ces minéraux qui constituent les sables sont classés comme suit :

- La silice.
- Les silicates.
- Les argiles.
- Les carbonates.

C'est ainsi que le terme sable, peut être employé sous une qualification indiquant l'origine du composant majoritaire. Alors on parle de sable quartzéux (ou siliceux) lorsqu'il est composé essentiellement de grains de quartz, de sable calcaire, si les éléments constitutifs sont des grains de calcaires, et c'est ainsi de suite.

Les silicates qui sont la famille la plus abondante dans la nature (plus de 90% du poids de l'écorce terrestre), les carbonates et les argiles se trouvent sous forme de trace dans notre sable généralement.

a. Le silicium :



Fig I.2 : Silicium pure.

Le silicium est un corps pur de symbole chimique Si, de numéro atomique 14, de poids atomique 28,08 g/mol, il ne se trouve jamais à l'état natif, mais constitue, sous forme de silice et de

silicate, l'élément le plus abondant de l'écorce terrestre (environ 27,2 %) après oxygène (environ 60%).

Le silicium se présente sous la forme d'une poudre de couleur châtain brune où, le plus souvent, sous forme de blocs informes (Fig I.2).

Il cristallise sous forme d'aiguilles de couleur grise à reflets métalliques. En raison de sa dureté, il polit le verre mais il est poli par l'émeri. La densité à 25 °C est de 2,33 g/cm³.

C'est un mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité, c'est pour ce la qu'on l'utilise plus en plus pour l'obtention des semi-conducteurs [16].

– Propriétés physiques :

La couleur est variable, un monocristal apparaît bleu acier ou bleu ardoise (Fig I.2) quand la lumière traverse une mince pellicule, celle-ci prend un teint brun clair. Le silicium est formé de trois isotopes stables : 28 (92,27 %), 29 (4,68 %) et 30 (2,07%). Le silicium est comme la structure de Diamant et de Germanium, et présente en outre une forme hexagonale rare et instable.

- La densité vaut 2,326 g/cm³ à 0 °C, et 2,325 g/cm³ à 25 °C.
- La dureté sur l'échelle de MOHR est égale à 7.
- La dureté brinell est évaluée à 240 kgf/mm².
- Si est non ductile, très cassant.
- Le module d'élasticité vaut 11495 kg/mm².
- Le module de torsion vaut 4050 kg/mm².
- Le rayon atomique est égal à 1,172 Å.
- T_f (température de fusion) dépend de l'état de pureté, en moyenne 1412 °C et T_{eb} = 2477 °C, (T_{eb} c'est la température d'ébullition).

Le silicium est diamagnétique avec X_s = - 0,19 x10, peu sensible à l'effet de la température.

- Ces propriétés particulières lui sont conférées par les impuretés (donneur et accepteur). Les principaux donneurs sont l'antimoine et le phosphore qui transforme le cristal en silicium n, les récepteurs sont le bore, l'or, l'aluminium, le gallium qui donnent le silicium P.
- Le constant diélectrique est voisin de 13, [1].

– **Propriétés chimiques :** Le silicium, à égale distance entre deux gaz rares, possède une électroaffinité peu marquée, on le classe parmi les éléments non métalliques. Presque toutes les combinaisons sont assurées par des liaisons covalentes, les réactions du silicium dépendent en outre de son état de division : Amorphe, il réagit mieux que si il est cristallisé, il brûle dans l'O₂

donnant la silice, quand il est cristallisé, il faut chauffer au moins à 850 °C. La couche de silice empêche rapidement toute oxydation ultérieure [25].

– **Production et importance économique et industrielle :** Le silicium est produit presque exclusivement par réduction thermique du dioxyde de silicium par le carbone dans des fours électriques à arc. Pour les applications dans le domaine de l'électronique, de la photovoltaïque, des détecteurs et de la micromécanique, le silicium doit être raffiné pour acquérir un degré de pureté beaucoup plus élevé.

Les exigences en matière de pureté pour la fabrication des cellules solaires à rendement élevé, par exemple, sont presque aussi grandes que pour les dispositifs perfectionnés à semi-conducteurs.

L'électronique moderne repose presque exclusivement (> 95 %) sur des dispositifs à base de silicium. Compte tenu de l'importance capitale et sans cesse croissante de l'électronique dans la technologie et la vie quotidienne, le silicium constitue l'un des matériaux technologiques les plus importants, bien que la quantité requise par ces applications soit relativement limitée.

Le silicium est utilisé dans les industries métallurgiques (dans les alliages ferreux où les alliages d'aluminium, par exemple) et pour la préparation du tétrachlorure de silicium.

Le silicium de pureté très élevée, obtenu par tirage de cristaux, par exemple, peut se présenter sous des formes brutes de tirage ou sous forme de cylindres ou de baguettes ; dopé avec du bore, du phosphore, etc. il est utilisé pour la fabrication des diodes, transistors et autres dispositifs à semi-conducteurs.

b. La silice (ou quartz ; SiO₂) :

Le dioxyde de silicium ou silice occupe, parmi les oxydes, une place exceptionnelle. Les nombreuses applications industrielles (optique, électronique, production de matériaux réfractaires, etc.) que connaît cette famille minérale accroissent encore l'intérêt des études.

La silice libre est très abondante dans la nature, on peut la trouver à l'état libre sous différentes formes cristallines ou amorphes et à l'état combiné dans les silicates.

Le quartz, que l'on trouve à l'état naturel en cristaux de grandes dimensions incolores, homogènes [1], et son poids spécifique est de 2.65 g/cm³.

Le module de Young est de 88.7 GPa, et le coefficient de Poisson est de 0.171. Sa cassure est conchoïdale et il ne présente pas de clivage.

A température ordinaire il est quasiment insoluble dans la plupart des agents chimiques. Toutefois, l'eau à haute température et à forte pression a la capacité de dissoudre un peu de

silice, son indice de réfraction moyen peu élevé ($n = 1.54$), lui confère un éclat vitreux. Il peut se présenter sous plusieurs polymorphismes selon les conditions thermodynamique (Tab I.2 et Fig I.3) :

Tableau I.2 : Polymorphisme de la silice, [13].

Forme	Système	Zone de stabilité	Densité	Type de gisement
Quartz α	Rhomboédrique	<573 °C	2.65	Forme usuelle du Quartz
Quartz β	Hexagonale	573 – 870 °C	2.53	Dans certaines pegmatites
Tridymite	Hexagonale	870 – 1470 °C	2.27	Roche volcaniques siliceuses refroidies brutalement
Cristobalite	Cubique	1470 – 1723 °C	2.2	Roche volcaniques siliceuses refroidies brutalement
Coésite	Monoclinique	Haute pression	3.01	Cratères d'impact de météorites
Stishovite	Quadratique	Haute pression	4.32	Cratères d'impact de météorites

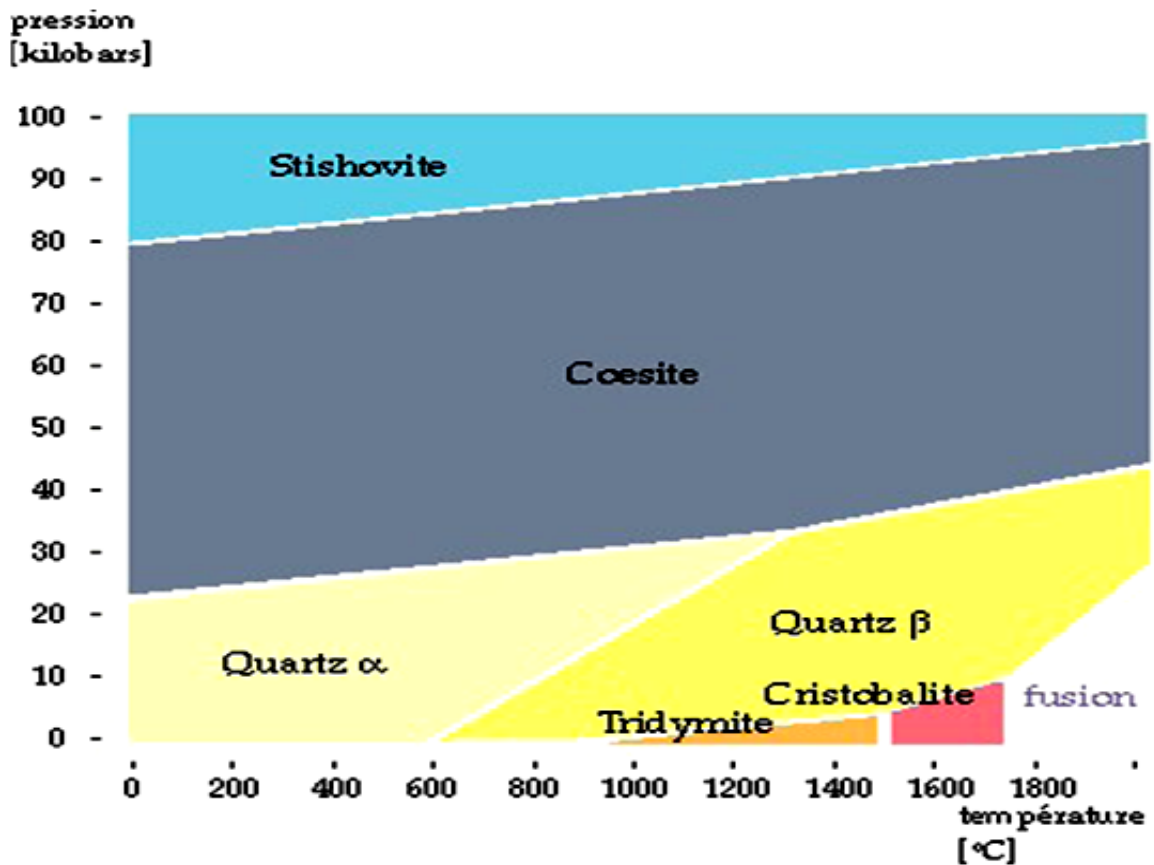


Fig I.3 : Diagramme d'équilibre de SiO_2 en fonction de la température et de la pression, [13].

C'est l'un des minéraux les plus abondants, l'écorce terrestre en contient 12 à 13 % de son poids.

c. Les silicates :

Les silicates désignent une importante famille de minéraux (précisément des sels) dérivants de la silice (SiO_2) car ils constituent environ 97 % de la croûte terrestre.

Ces minéraux dont le squelette est essentiellement formé par des tétraèdres de silicium et d'oxygène $[\text{SiO}_4]^-$ (Fig 1.4) qui est l'élément structural fondamental des silicates, additionnés d'aluminium, magnésium, fer, calcium, potassium, sodium et autres éléments.

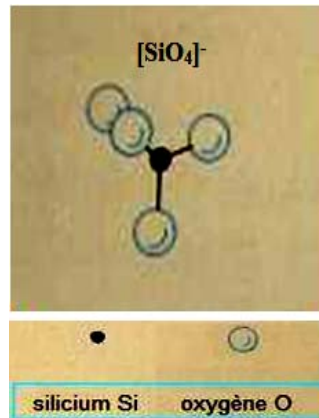


Fig I.4 : Tétraèdre de silicium et d'oxygène $[\text{SiO}_4]^-$.

d. Les argiles :

Les argiles regroupent l'ensemble des matériaux dont les particules n'excèdent pas 2 mm de diamètre équivalent [10], (c.à.d. les particules inférieure à 0.001 mm). Ils correspondent à des minéraux spécifiques que l'on ne rencontre jamais en particule plus grosse. Ces minéraux sont des silicates d'aluminium hydratés, ils appartiennent à la famille des phyllosilicates qui présentent une structure cristalline en feuillet (Fig I.5).

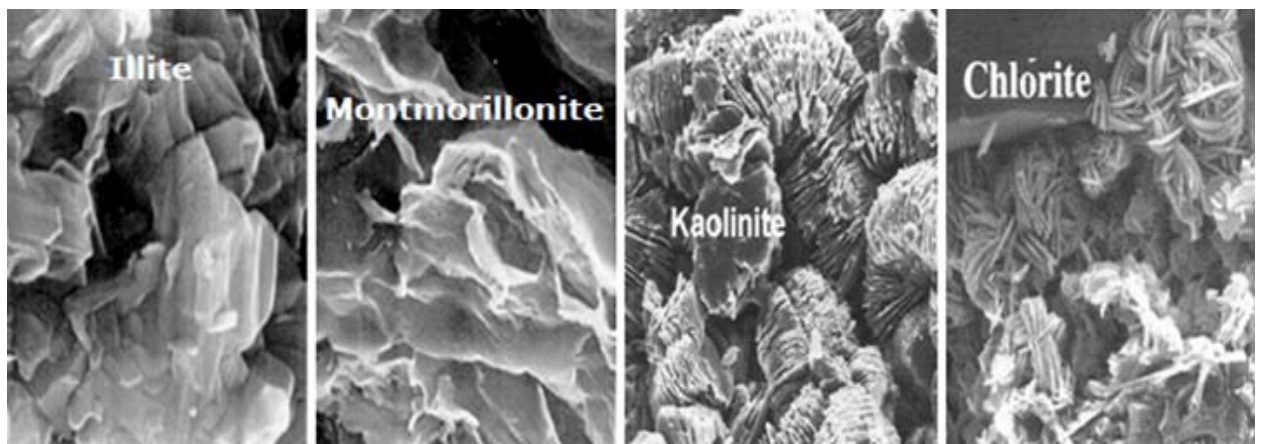


Fig I.5 : Photographies au Microscope Électronique à Balayage de quelques types d'argiles, [8 et 12].

Compte tenu d'une granulométrie très fine des particules et d'une structure en feuillet, ces minéraux présentent donc de très grandes surfaces spécifiques comprises de 5 jusqu'à 800 m²/g [7].

e. Les carbonates :

Le carbonate est un ion formé d'un atome de carbone et de trois atomes d'oxygène portant une double charge électrique négative (CO₃²⁻), ou un composé chimique comprenant cet anion.

Les minerais de carbonate rencontrés le plus souvent dans les sols sont la Calcite CaCO₃, la Dolomite [CaMg(CO₃)₂], Nahcolite (NaHCO₃), Trona [Na₃H(CO₃)₂ H₂O] et le Soda (Na₂CO₃ 10H₂O). La teneur en CaCO₃ d'un sol fin (Tableau I.3) est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 60 - 70 %, [28].

Les carbonates jouent un rôle important dans les sédiments, leur équilibre de dissolution contrôle partiellement le pH et une teneur élevée en carbonates rend le sédiment alcalin, favorisant ainsi l'ensemble des modes de fixation.

De plus la surface des carbonates est le siège de phénomène de sorption des ions métalliques : précipitation, adsorption (accumulation de matière entre les phases solides et liquides, diffusion à l'intérieur de la phase solide) [3 et 14].

Tableau I.3 : Désignations et classement des sols selon le teneur en carbonates de calcium.

Teneur en CaCO ₃ (%)	Désignation	
0 - 10	Argile	} Sols
10 - 30	Argile marneuse	
30 - 70	Marne	
70 - 90	Calcaire marneux	} Roches
90 - 100	Calcaire	

I.2. Quelques informations sur l'erg oriental et choix de prélèvement :

L'erg oriental est une identité géographique multinationale, parce qu'il ne se limite pas dans un seul pays (Fig I.6). Il se situ au sud-est du territoire Algérien. Les frontières de l'erg oriental dans sa partie Algérienne est de Biskra au nord, de Ain amenas au sud, de Ghardaïa à l'ouest, jusqu'à les frontière avec la Tunisie (Fig I.7).

La superficie de l'erg oriental est de 190 000 Km² (envirant 12 à 13 % du Sahara Algérien), il représente un quadrilatère de 500 Km sur 300 Km.



Numéro	Nom de l'Erg
1	Erg Oriental
2	Erg Occidental
3	Erg Er Raoui
4	Erg Isaouane
5	Erg Chech

Forme géographique	Symbole
Erg	
Frontière nationale	- - - - -
Reliefs plus de 1000 m	
Cotes maritime	

Fig I.6 : Distributions des Ergs dans la grande Sahara d'Algérie, [20].



Fig I.7 : Position de l'Erg Oriental selon Google Map.

I.2.1. Définition de l'Erg :

Le mot Erg est un terme issu de l'arabe qui désigne, au Sahara, les massifs de dunes d'une certaine étendue [11] ; au départ ils sont des dunes simples et isolées qui, en se juxtaposant, se combinant, se soudant, finissent par former des ergs jeunes qui deviendront, avec le temps des ergs adultes stables ou l'inverse (Fig I.8).

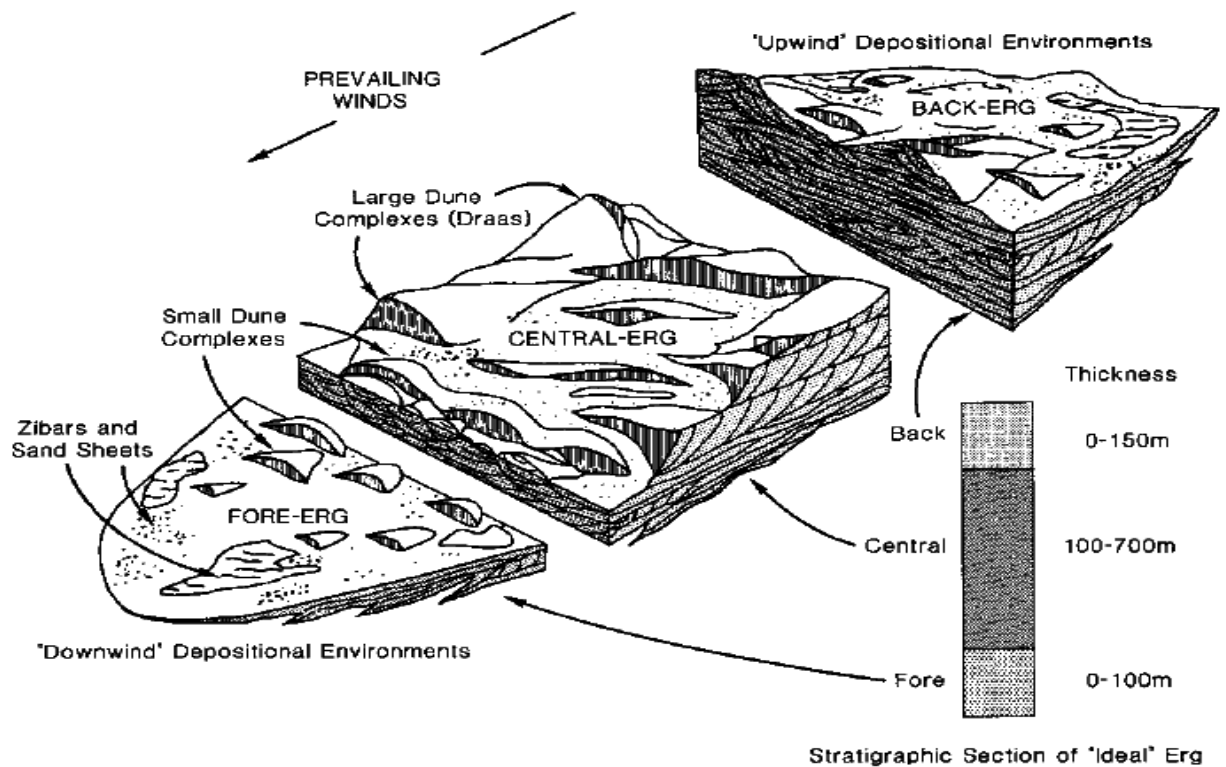


Fig I.8 : Modèle conceptuel d'un erg de migration, montrant l'ordre sédimentaire stratigraphique de l'Erg, [15].

Cette forme de désert, ne représente que 15 à 20 % de la superficie totale du Sahara et se limite à des régions bien précises. Ils sont constitués par le sable que le vent arrache aux regs et aux hamadas. L'eau abonde parfois en profondeur, assurant la cohésion des grains de sable et la stabilité des lignes générales du relief [11].

Les dunes sont généralement regroupées en cordon de quelques dizaines de mètres, des fois jusqu'à quelques kilomètres ; elles peuvent atteindre plus de 300 m de hauteur.

Elles sont sans cesse en mouvement : poussées par les vents, leurs grains de sable se propagent par saltation, translation ou par les avalanches.

le mot erg a été adopté dans le langage géographique international, d'autres termes sont utilisés : dans le Sahara, les Touaregs emploient le mot **Edeyen**, les Libyens parlent de **Ramla**, en Arabie et en Asie centrale, les populations locales les désignent respectivement sous les vocables de **Nefoud** et de **Koum**.

I.2.2. Les formes dunaires élémentaires :

Les spécialistes ont essayées de classifier les formes dunaires, mais jusqu'à maintenant il ni y'a pas une classification normalisée car les recherches dans ce domaine est récentes. Ils utilisent maintenant les potos satellitaire et la modalisation pour comprendre la formation et l'évolution de ces formes dunaires parfois très compliquée.

C'est pour sa que le choix et les conditions de prélèvement est compliquée et difficile.

Nous on a choisies de séparer ces formes dunaires en deux types :

Les formes élémentaires peuvent être l'origine des formes complexes suivantes :

a. Les Nebkas (ou dunettes d'obstacle) :

Ce sont de petites buttes de sable caractéristiques à la base des plantes (ou obstacle), ils sont placés en flèche sous le vent derrière un obstacle dont l'orientation permet aux chameliers de suivre la direction voulue. Ces dunes ou dunettes isolées n'ont cependant rien à voir avec les grands ergs, mais c'est un signe de danger de l'avance de sable et de désertification.

b. Dune en bouclier (ou en dôme).

c. Les Barkhanes (Barchan Dune) :

Dunes en croissant avec une partie convexe tournée face au vent (pente douce et sable compact) et une partie concave sous le vent (pente abrupte et sable mou) (Fig I.9 a et b).

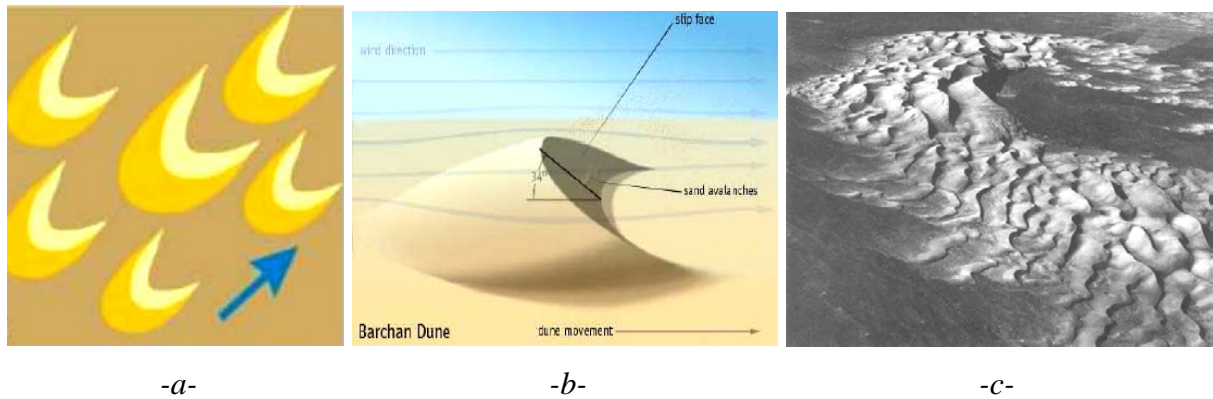


Fig I.9 : Les Barkhanes, [17].

Les Barkhanes progresse par ses cornes, au rythme de 2 à 30 m par année, d'autant plus vite qu'elle est plus petite, et c'est une dune très mobile.

Il peut rarement continuer sont évolution jusqu'à une Méga Barkhanes, (Fig I.9 c).

d. Les dunes paraboliques :

Elles sont en forme de langue (forme linguoïde) (Fig I.10) dont la convexité abrupte est sous le vent.

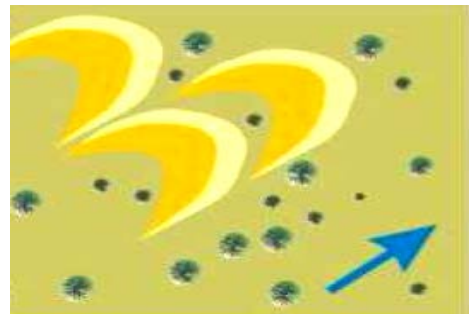


Fig I.10 : Les dunes paraboliques, [15].

e. Les Ghourds :

Dunes pyramidales en forme de tente de nomade, il a la particularité de ne pratiquement pas bouger.

I.2.3. Les ressources naturelles de l'erg oriental :

En générale les ergs se situent aux zones les plus basses du territoire Algérienne (pas plus de 200 m au dessus de la mer), sa explique sont les domaines des immenses richesses oasis dattière et hydraulicienne.

Mais dans ces dernières dizaines d'années et avec les découverts des hydrocarbures et les nouveaux gisements miniers qui vont éclipsé progressivement ces édens sans les effacer bien sur, et devenir la direction préférer pour une grande quantité de travailleurs.

Dans l'avenir proche le Sahara Algérienne va devienrai une véritable source de richesse pour notre payé, vue du développement rapide de l'agriculture Saharienne et de l'énergie solaire (thermique et électrique) qui deviendra avec l'évolution technologique rentable et nette.

I.3. Généralités sur les bétons :

I.3.1. Définition :

Le terme **béton** est un terme générique désignant un matériau de construction composite fabriqué à partir de mélange et l'agglomération de plusieurs composants par un liant, ou tout simplement le béton est un mélange de deux composants : agrégats et pâte.

Si le liant est qualifié **d'hydrique** (lorsque sa prise se fait par hydratation), il est appelé couramment **ciment** ; on obtient dans ce cas un **béton de ciment** couramment utilisé et c'est le sujet de notre étude.

Ce type de béton est généralement constitués de :

- Granulats (ou agrégats) : granulats d'origine naturels (sable, gravillons) ou recyclée, ou les granulats artificiels (granulats légers), ils ne devraient pas contenir les matériaux qui causeront la détérioration du béton.
- Ciment : on en trouve toutes une grande variété, et selon les conditions on choisie le types qui conviens.
- Eau, (Pate = Ciment + Eau).
- Adjuvants ; le plus souvent.

Lorsque les granulats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de **mortier**, et on peut optimiser la courbe granulaire du sable, auquel cas on parlera de **béton de sable**.

Le béton frais associé à de l'acier permet d'obtenir le **béton armé**, qui est un matériau de construction plus résistant. Le béton frais associé à des fibres permet d'obtenir des bétons fibrés.

Il existe aussi un liant **hydrocarboné** (bitume), ce qui conduit à la fabrication **du béton bitumineux** largement utilisée pour les travaux routiers.

Comme les roches naturelles, le béton possède une grande résistance à la compression et une faible résistance à la traction, c'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction [2].

I.3.2. classification des bétons :

Le béton comprend plusieurs catégories selon les critères qu'on choisie, il peut varier en fonction de la masse volumique, nature des liants, façon d'amélioration, nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect. Les classements les plus connue sont :

Selon la masse volumique (ρ) :

En général le béton peut être classé en quatre groupes, selon la masse volumique (ρ) :

- Béton lourd (béton courant) : 1800 - 2500 kg/m³.
- Béton très lourd : > 2500 kg/m³.
- Béton léger : 500 - 1800 kg/m³.
- Béton très léger : < 500 kg/m³.

Le classement selon la masse volumique est lié directement à la nature des granulats, donc si on va utiliser des granulats lourd on obtient un béton lourd et vis versa.

Selon la façon d'amélioration :

a. Béton non améliorée (ou ordinaire).

b. Béton améliorée :

On trouve deux méthodes pour améliorer les propriétés des bétons :

– **Amélioration par renforcement** : Soit par des armatures ou par des fibres.

• Amélioration par des fibres :

Lorsque des fibres sont ajoutées, et selon les dimensions des fibres on distingue :

- Les bétons renforcés de fibre (BRF) qui sont des bétons "classiques" qui contiennent des macro-fibres (diamètre ~1 mm) dans proportion volumique allant de 0.5% à 2% ;
- Les bétons fibrés à ultra haute performance (BFUHP) qui sont des bétons (BUHP) qui contiennent des micro-fibres (diamètre > 50 μ m) ou un mélange de macro-fibres et de micro-fibres.

On peut aussi distinguer les bétons fibrés selon la nature des fibres :

- Les bétons renforcés par des fibres métalliques.
- Les bétons renforcés par des fibres synthétiques.
- Les bétons renforcés par des fibres minérales.

I.3.3. Ordre de grandeur :

Les résistances mécaniques en compression obtenues classiquement sur éprouvettes cylindriques normalisées, sont de l'ordre de :

- BFC : bétonnage fabriqué sur chantier : 25 à 35 MPa, peut parfois atteindre 50 MPa.
- BPE : béton prêt à l'emploi, bétonnage soigné en usine (préfabrication) : 16 à 60 MPa.
- BHP : béton hautes performances : jusqu'à 80 MPa.
- BUHP : béton ultra hautes performances, en laboratoire : 120 MPa.
- BFUHP : béton fibré à ultra haute performance.

La résistance en traction est moindre avec des valeurs de l'ordre 2,1 à 2,7 MPa pour un béton de type BFC, [29].

I.3.4. Avantages et inconvénients du béton :

I.3.4.1. Avantages du béton :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu énergie pour sa fabrication.

I.3.4.2. Inconvénients du béton : Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux)
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage [20].

I.3.5. Les différents composants de béton :

Dans cette partie on va donner un aperçu sur chaque un des différents composants de béton : ciment, granulats (gravier et sable), l'eau de gâchage et les adjuvants (en cas de nécessité).

I.3.5.1. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50 % de la masse du ciment, [10].

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- Du calcaire.
- Des cendres volantes.
- Des schistes calcinés.
- De la pouzzolane naturelle (produit d'origine volcanique).
- Du laitier de haut fourneau.
- Des fins calcaires.
- Des fumées de silice.

I.3.5.2. Les granulats :

L'appellation «Granulat» sert à désigner les matériaux généralement inertes, sable graviers ou cailloux qui entre dans la composition des bétons. Ils occupent généralement de 60 à 70 % du volume du béton (70 à 85 % en masse). Les granulats influent fortement sur les propriétés du béton, son dosage et son coût, tant à l'état plastique qu'à l'état durci, [21].

Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels. Leur taille variable déterminera l'utilisation du béton (les gros granulats pour le gros œuvre, les très fins pour le béton sophistiqué). La résistance du béton augmente avec la variété des calibres mélangés.

a. Le gravier :

La qualité de gravier a une grande importance sur les propriétés du béton, car il représente la quantité majoritaire dans le mélange, donc le béton obtenu va certainement s'influencer sur la nature, la granulométrie, la forme et la propreté de ce gravier.

b. Le sable :

Les sables destinés pour la confection des bétons doivent satisfaire quelques exigences.

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables (Mf) sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles tels que ceux représentés sur la Fig.I.11.

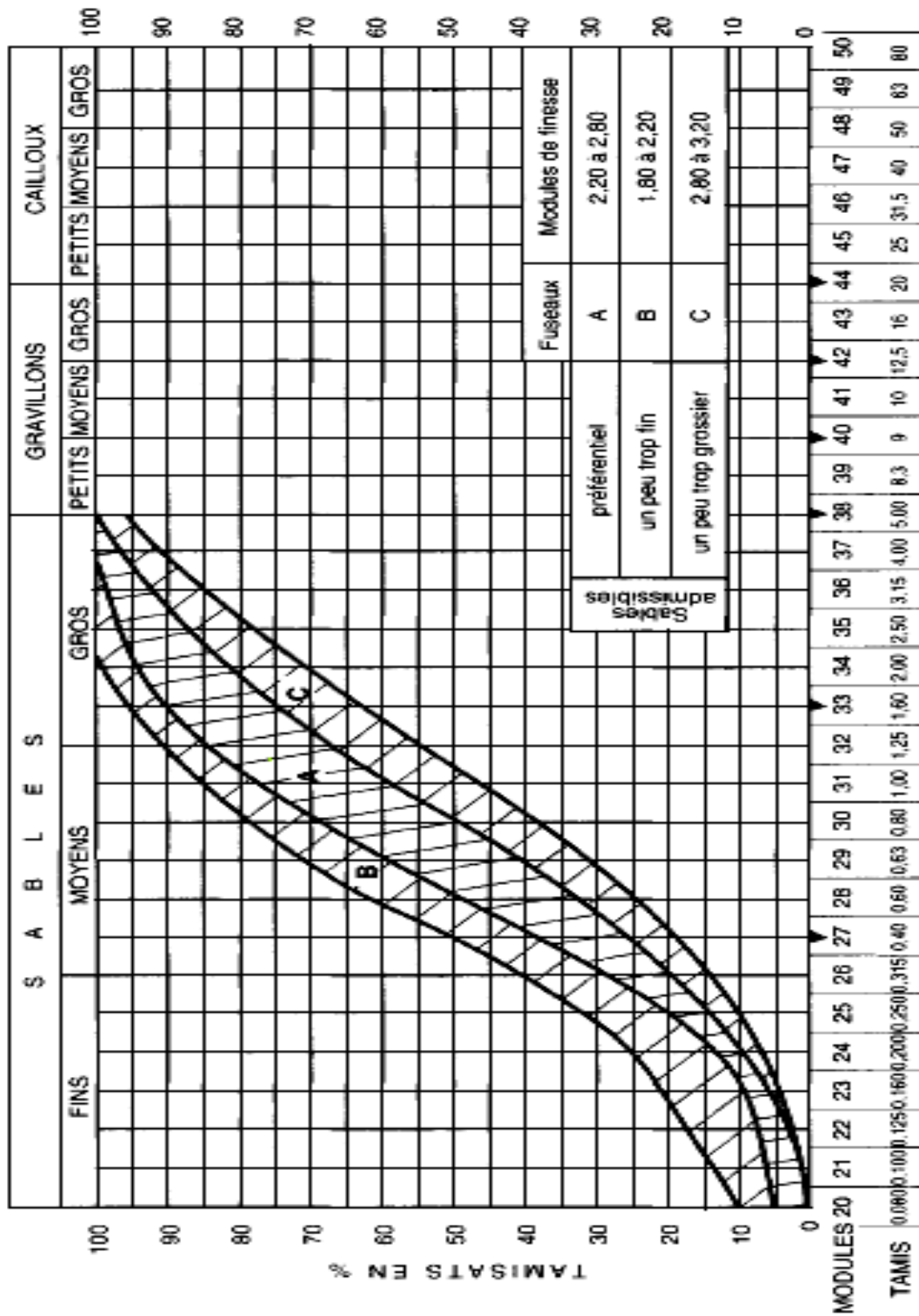


Fig I.11 : Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton, [10].

- La partie centrale A ($2,2 < M_f < 2,8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités,
- La partie supérieure B ($1,8 < M_f < 2,2$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance,

– La partie inférieure C ($2,8 < M_f < 3,2$) correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistances élevées, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

L'ancienne norme P 18-541 indiquait que le module de finesse des sables devait être compris entre 1,8 et 3,2. À cette prescription s'ajoutait, pour les bétons de $f_{c28} > 36$ MPa (c.a.d la contrainte de compression), l'obligation que la valeur de ce module de finesse ne s'écarte pas plus de + ou - 0,3, en valeur absolue, de sa valeur moyenne, cette tolérance qui impliquait une régularité dans la fourniture du sable étant reprise par le fascicule 65 A dans le cas des bétons de $f_{c28} \geq 30$ MPa ou pour les bétons de $f_{c28} < 30$ MPa quand ceux-ci sont mis en œuvre à la pompe, [10].

I.3.5.3. Influence de la granularité :

Nous supposons dans ce qui suit, en particulier pour ce qui concerne le rapport **G/S** (G = Gravier et S = Sable) que la coupure entre sable et gravier se fait, selon l'usage, au module 38 (tamis de 5 mm).

Le rapport **G/S** correspond au rapport des volumes absolus. Si G et S ont même masse spécifique correspond au rapport des poids, le tableau I.4 montre l'influence de la granularité du sable et gravier sur le béton :

Tableau I.4 : Les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S et de leur granularité continue ou discontinue, [10].

Caractéristiques	Appréciations concernant les bétons	
	À G/S élevé par rapport à ceux à G/S faible	À granularité discontinue par à ceux à granularité continue
Ouvrabilité	moins bonne surtout pour $G/S > 2,2$	moins bonne surtout si $G/S > 2,2$
Résistance en compression	Meilleure surtout pour $G/S \geq 2,2$	très légèrement supérieure
Résistance en traction	sans corrélation apparente	très légèrement inférieure
Module d'élasticité	sans corrélation très nette sauf pour le module statique un peu plus élevé en fonction de G/S	un peu plus élevé
Vitesse du son	sans corrélation très nette	légèrement supérieure

Indice Sclérométriques	un peu supérieur	très légèrement supérieur
Retrait	sans corrélation très nette	moins élevé surtout si $G/S > 2,2$
Compacité. densité	légèrement plus élevée pour $G/S > 2.2$	un peu plus élevée

Ce qui surprend, c'est l'influence relativement faible de la composition granulométrique du béton, et ce qui concerne les proportions relatives de sable et de gravier (rapport G/S) c'est la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique qui joue un rôle très important.

Les appréciations concernant ces influences sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le tableau II.2 récapitulant les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S dont les indications sont tirées en partie des courbes expérimentales de la Fig.I.12.

Par contre, la granularité du sable, définie par exemple par son module de finesse, est un facteur très important. Il faut utiliser de préférence pour un sable 0/5 mm, et qui a un module de finesse de 2,20 à 2,80.

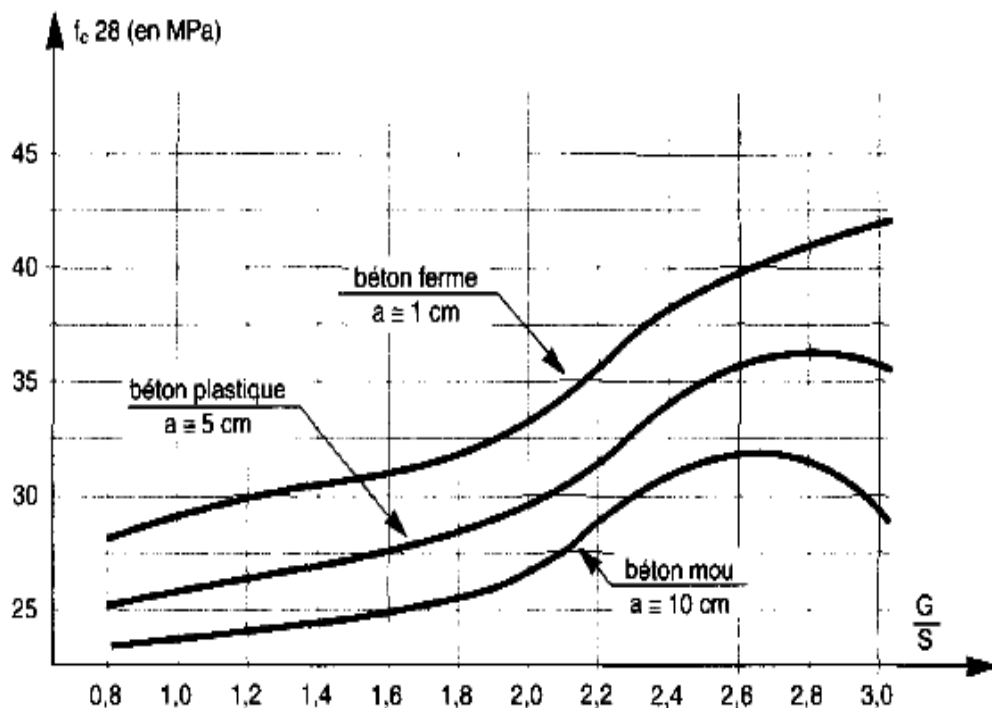


Fig I.12 : Variation de la résistance en compression en 28 jours en fonction de G/S et pour 3 plasticités différentes Béton 350 kg de ciment/m³, granularité continue $D = 25$ mm, [10].

I.3.5.4. L'eau de gâchage :

Pour convenir à la confection de bétons, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. La norme P 18-303 limite à cet effet le pourcentage de matières en suspension à 2 ou 5 g/l et la teneur en sels dissous à 15 ou 30 g/l suivant la nature du béton.

I.3.5.5. Les adjuvants :

Depuis plusieurs décennies leur usage s'est généralisé et depuis une vingtaine d'années la presque totalité des bétons sont avec adjuvants, tout ouvrage de quelque importance ne se concevant pas sans que le cahier des charges ne précise le ou les types d'adjuvants à prévoir dans le béton.

D'ailleurs au fur et à mesure du développement de leur emploi, la formulation des adjuvants est devenue de plus en plus élaborée et fait appel maintenant à des produits de synthèse.

I.3.6. Composition et dosage des bétons :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause [2].

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

I.3.7. Les propriétés essentielles pour les bétons :

Parmi les propriétés les plus importants que les bétons doivent satisfaire c'est l'ouvrabilité et la résistance. Ouvrabilité et résistance sont à étudier de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton, et si l'ouvrabilité augmente la résistance diminue et l'inverse. Donc on doit choisir selon l'ouvrage qu'on veut réaliser un arrangement entre l'ouvrabilité et la résistance nécessaire.

I.3.7.1. L'ouvrabilité de béton frais :

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à

la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du moule, coffrage et du ferrailage ; une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquences fâcheuses, une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale.

De l'ouvrabilité dépendent, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité.

C'est pourquoi l'ouvrabilité doit être considérée comme une qualité aussi importante que la résistance. Il arrive encore trop fréquemment que des formules de composition qui ont peut être permis en laboratoire la confection de belles éprouvettes, doivent être modifiées sur le chantier par défaut d'ouvrabilité qui, on l'oublie trop souvent, risquerait d'entraîner pour le béton dans l'ouvrage un certain nombre de défauts.

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité, comme l'essai Affaissement au cône d'ABRAMS, étalement à la table à secousses et le maniabilimètre.

I.3.7.2. La résistance en compression :

C'est la qualité la plus important pour un béton durcie, on trouve la résistance en compression, en traction, en cisaillement...etc, mais la résistance en compression reste la qualité prioritaire.

La Résistance en compression se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre.

Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de diamètre 16 cm ($\Phi = 15,96$ cm) dont la section est de 200 cm^2 .

La normalisation européenne indique comme dimensions des cylindres $\Phi = 15$ cm de $H = 30$ cm.

Notation : La résistance en compression (**Rc**) à 28 jours est désignée par : f_{c28} ; [10 et 13].

I.3.9. Les modes d'endommagements des éprouvettes en béton :

En générale il y'a 03 manières avec les quelles les éprouvettes cylindriques de béton se rompent, ces modes de fissurations sont illustrés sur la figure I.13 :

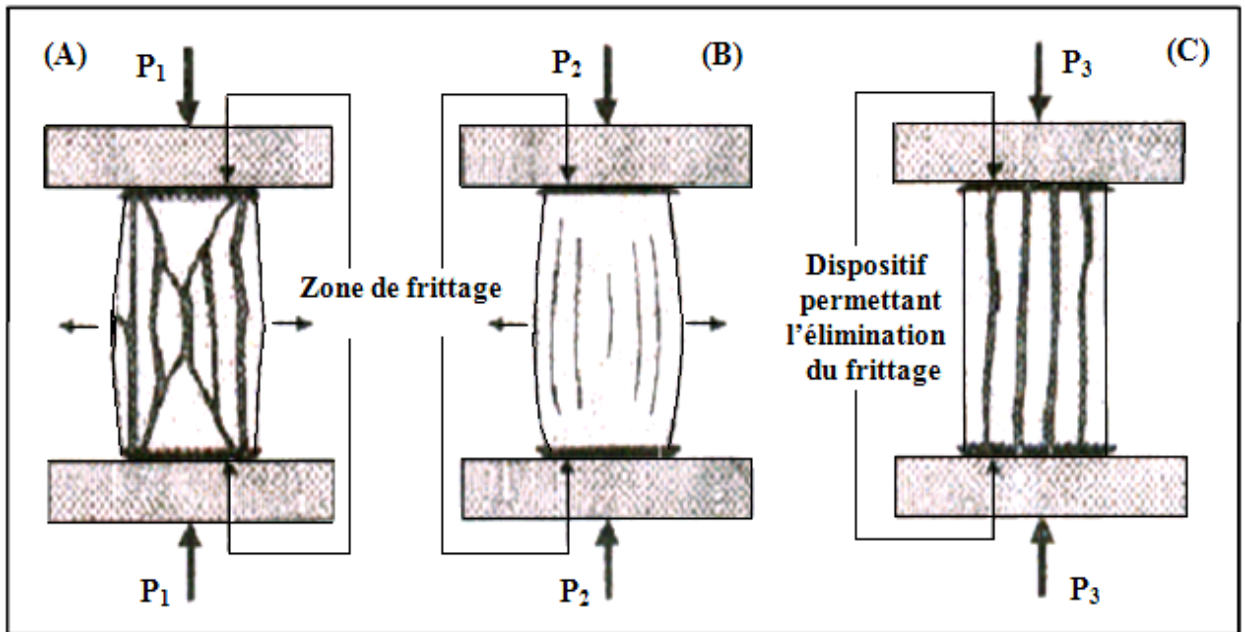


Fig I.13 : Les modes de ruptures des éprouvettes cylindriques de béton en compression, [21].

– Pour le type de rupture **A**, dans la partie centrale, la déformation transversale est libre ; elle résulte des contraintes de traction perpendiculaires à la compression (et à la fissuration).

Ce sont ces contraintes de traction qui aboutissent dans la zone centrale à la fissuration longitudinale de l'éprouvette, puis à sa ruine.

Les zones extrêmes, protégées par le frittage créé par les plateaux, ne sont pas détruites.

– Pour le type de rupture **B**, deux cônes apparaissent aux extrémités de l'éprouvette rompue ; en effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone.

– Pour le type de rupture **C**, le frittage peut être limité en graissant les zones de jonctions plateaux / éprouvette ou en y interposant des appuis en téflon.

La rupture se produit pour une charge **P₃** habituellement plus faible que celle obtenue dans le cas générale **P₂** en protégeant ses extrémités de l'éclatement, le frittage permet à l'éprouvette d'encaisser des charges légèrement plus importantes, [21].

Chapitre 02 :

Moyens et Techniques Expérimentales

II.1. Caractérisation du sable :

II.1.1. Teneur en eau (w) :

Pour un sol saturé, la teneur en eau est directement liée à l'indice des vides. Elle permet donc de caractériser l'état du sol, c'est pour cette raison qu'on a commencé par le calculer. Aussi la teneur en eau (ou le taux d'humidité) est nécessaire pour les autres essais (comme l'Essai d'équivalent de sable ES, et la Valeur au Bleu de Méthylène VBS).

La teneur en eau se mesure conventionnellement en portant le sol à la température de 105 °C jusqu'à ce que sa masse se stabilise. Cela correspond au départ de l'eau libre du sol. L'échantillon de sol est pesé avant et après son passage à l'étuve [14].

La teneur en eau se détermine par deux pesées. Une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m de l'échantillon humide et une deuxième pesée, après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon m_s .

D'où :

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad \text{avec } m_w = m - m_s$$

Avec :

– m : masse du sable naturelle. – m_s : masse du sable séché (par étuvage).

Pour les sols contenant des matières organiques, la température d'étuvage est limitée à 60 °C, pour éviter de brûler les matières organiques. C'est aussi le cas des sols contenant du gypse (le gypse perd son eau de constitution vers 65 °C).

Dans les sols non saturés, l'eau ne remplit pas les pores du sol et le comportement du sol est lié directement à l'indice des vides et au degré de saturation.

Pour le sable et l'argile, on a généralement les valeurs de teneur en eau suivantes :

– Sable : $w = 1$ à 15%. – Argile : $w = 10$ à 20%.

II.1.2. Compacité, porosité et masse volumique :

Par définition on peut calculer ces paramètres élémentaires, qui nous permettent de prendre une idée sur nos échantillons de sable.

a. Compacité (c) :

C'est le rapport du volume des grains de sable au volume total ; $c (\%) = v_g / v$.

b. Porosité (n) :

La porosité, rapport du volume des vides au volume total ; $n (\%) = v_v / v$.

c. Masse volumique (ρ) :

La masse volumique ρ est le coefficient de proportionnalité entre le volume et la masse d'un corps. Elle dépend de la substance du corps. Pour les solides et les liquides, elle dépend légèrement de la température et presque pas de la pression. Pour les gazeux elle dépend fortement de la température et de la pression.

D'où :
$$\rho \text{ (kg / m}^3\text{)} = \mathbf{m} / \mathbf{v}.$$

II.1.3. Essai de granulométrie par tamisage :

II.1.3.1. Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau granulométrique en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

On définit les notions de granularité, refus et tamisât comme suit :

- **Granularité** : distribution dimensionnelle des grains.
- **Refus sur un tamis** : matériau qui est retenu sur le tamis.
- **Tamisât (ou passant)** : matériau qui passe à travers le tamis.

La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau.

Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique. Avec :

- **En abscisse** : le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes.
- **En ordonnée** : le pourcentage, en poids du matériau total, de la fraction du sol dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant).

II.1.3.2. Les tamis utilisés pour le tamisage :

L'analyse granulométrique du sol [2], jusqu'au diamètre de 80 μ m se fait en utilisant une série de tamis (Fig II.1).

Fig II.1 : Les tamis et les refus sur les différents tamis.



La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles normalisées ont les dimensions suivantes en mm :

0,063 – 0,08 – 0,10 – 0,125 – 0,16 – 0,2 – 0,25 – 0,315 – 0,4 – 0,5 – 0,63 – 0,8 – 1 – 1,25 – 1,6 – 2 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125.

Les tamis (à ouverture carrée) dont les dimensions sont soulignées et notées en gras correspondent à la série de base préconisée par le CEN (NF EN 933-2) : de ce fait, lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe. Nous avons utilisé dans cette étude la série suivante :

0,04 – 0,063 – 0,08 – 0,16 – 0,25 – 0,5 – 0,8 – 1,6 – 2 – 3,15 – 4 – 5 mm.

II.1.3.3. Classes des granulats :

Le terme « Granulat d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments.

Le granulat est dit de classe d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

Le refus sur le tamis D est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$.

Le tamisât au tamis d est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$.

Le refus sur le tamis $1.56 D$ est nul.

Le tamisât au tamis $0.63 d < 3\%$; toutefois pour $D \leq 5$ mm, cette limite est portée à 5%. Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné $0/D$, et si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm [3]. La norme XP P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

- Filler $0/D$: Pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm.
- Sablon $0/D$: Pour $D \leq 1$ mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm.
- Sable $0/D$: Lorsque D est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$.
- Graves $0/D$: Lorsque $D > 6,3 \text{ mm}$.
- Gravillons d/D : Lorsque $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$.
- Ballast d/D : Lorsque $d \geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$.

II.1.3.4. Les renseignements obtenus de la granularité :

On détermine à partir des graphes de distributions granulométriques beaucoup d'informations importantes, en particulier :

- Les dimensions **d** et **D** du granulat,
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.
- Le pourcentage de tamisât (matériau qui passe à travers le tamis) à 2 mm et à 80 µm, car 2 mm et 80 µm sont les limites de l'essai de granulométrie par tamisage pour les sables, mais nous avons choisi de pousser la série des tamis jusqu'à 5 mm pour les raisons suivantes :
 - Il y'a encore des spécialistes qui considère que la limite supérieure des sables c'est 5 mm.
 - On a besoin de connaître le refus sur le tamis de 5 mm pour trouver le taux d'humidité et les essais d'Equivalent de Sable ES, et la Valeur au Bleu de Méthylène VBS.
- Les dimensions d_N pour N fixée (c.à.d. pour un pourcentage cumulative N on a la dimension des grains d, et inversement).
- Le **d₁₀** qui est le diamètre efficace (d₁₀ : tamis d'ouverture d qui laisse passer 10 % du poids des grains).

a. Les facteurs d'uniformité de Hazen Cu et de courbure Cc :

Le facteur d'uniformité de Hazen est défini par : **Cu = d₆₀/d₁₀**. Par contre, le facteur de courbure est défini par : **Cc = (d₃₀)² / (d₁₀.d₆₀)**.

Tel que :

d₁₀ : tamis d'ouverture d qui laisse passer 10 % du poids des grains.

d₃₀ : tamis d'ouverture d qui laisse passer 30 % du poids des grains.

d₆₀ : tamis d'ouverture d qui laisse passer 60 % du poids des grains.

De façon générale, **d_y** est l'ouverture du tamis qui laisse passer y % du poids des grains.

b. Les indices de classement So et d'asymétrie Sk :

L'indice de classement (Sorting-index de Trask) **So** est donné par :
$$So = \sqrt{\frac{Q3}{Q1}}$$

So : Permet de déterminer le degré de classement d'un sédiment.

L'indice d'asymétrie (Skewness de Trask) est exprimé par **Sk** :
$$Sk = \frac{Q1 \times Q3}{(Q2)^2}$$

Sk : exprime la symétrie du mode de l'histogramme par rapport à la médiane.

Avec :

Q1 : est la valeur du diamètre à 25% de la courbe granulométrique cumulative.

Q2 : est la valeur du diamètre à 50% de la courbe granulométrique cumulative.

Q3 : est la valeur du diamètre à 75% de la courbe granulométrique cumulative, [1].

II.1.3.5. Module de finesse d'un granulat (Mf) :

Le module de finesse d'un granulat est égal au $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante :

0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 et 80 mm.

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables, les tamis concernés sont : 0.16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm.

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 \}$$

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante, surtout en ce qui concerne les sables.

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité.

II.1.3.6. Mode opératoire de l'essai :

Dans cette essai on a pris une masse initiale de 1 Kg (1000 g), pour faire le tamisage de chaque échantillon (Si). Les opérations de l'essai granulométrique ont été réalisées au laboratoire de Mécanique Des Sols (MDS) de département de Génie civil de l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene (USTHB), BAB EZZOUAR Algérie.

a. Appareillage :

- Bacs, brosses et pinceaux pour le nettoyage.
- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- Étuve ventilée réglée à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Un dispositif de lavage.
- Tamis dont l'ouverture est de diamètre 250 mm.

b. Tamisage :

- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne pendant 15 minutes, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture. D'une

manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.

c. Pesées de refus :

Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R1 la masse de ce refus. Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur. Soit R2 la masse de refus. Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus jusqu'à R6 [23].

↳ Remarque :

L'analyse granulométrique du sol se mesure par tamisage par voie sèche pour les sols dont les éléments sont supérieurs à 80 μm et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à 80 μm [22].

La méthode de sédimentation utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des particules fines est fonction de leur dimension. La loi de Stokes donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique que les particules de sol, la relation entre le diamètre des particules et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux particules de sol pour déterminer leurs diamètres équivalents. C'est une hypothèse très simpliste puisque les particules d'argile se présentent sous forme de plaquettes et non pas sous forme de grains sphériques. Cette méthode ne permet pas de descendre en dessous de diamètres équivalents à 1 μm .

II.1.4. Essai de granulométrie par laser :

La technique de granulométrie laser permet la mesure :

- Du diamètre d'un ensemble de particules sphériques ou « non sphériques » d'indice mal connu ou d'une particule isolée,
- De la concentration spatiale en particules,
- Pas de mesure de vitesses ni de flux.

Les avantages de la granulométrie laser :

- Durées d'analyse courtes,
- Bonne précision et Reproductibilité des mesures ;
- Calibration simple,
- Grande étendue de la plage de mesure et souplesse opératoire.

II.1.4.1. Principales Résultats à calculer :

Les principales données retenues sont :

- $D(v ; 0,1)$ = taille de particule pour laquelle 10% de l'échantillon se trouve en dessous de cette dimension.
- $D(v ; 0,5)$ = taille de particule à laquelle 50% de l'échantillon a une taille inférieure et 50% de l'échantillon a une taille supérieure.
- $D(v ; 0,9)$ = taille de particule pour laquelle 90% de l'échantillon se trouve en dessous de cette dimension.
- $D(4 ; 3)$ = diamètre moyen (volume).
- $D(3 ; 2)$ = diamètre moyen pondéré en surface (diamètre de Sauter).
- Span = mesure de la largeur de la distribution.

$$\text{Span} = D(v ; 0,9) - D(v ; 0,1) / D(v ; 0,5)$$

- SSA = Aire de surface spécifique.

$$\text{SSA} = \text{Surface totale des particules} / \text{Poids total}$$

Pour cela il faut fixer la densité de l'échantillon [6].

II.1.5. Équivalent de sable (ES) :

L'équivalent de sable désigné par le symbole **ES** c'est un essai qui détermine la proportion de sol fin (ou les impuretés) dans les sables, donc permettant de mesurer la propreté d'un sable.

C'est un essai empirique, simple, rapide et ne nécessitant qu'un appareillage très élémentaire (Fig II.2). Il permet de contrôler sur place la constance de certaines qualités de matériaux mis en œuvre sur chantier à une cadence rapide. Il est très largement utilisé, en particulier en géotechnique routière.

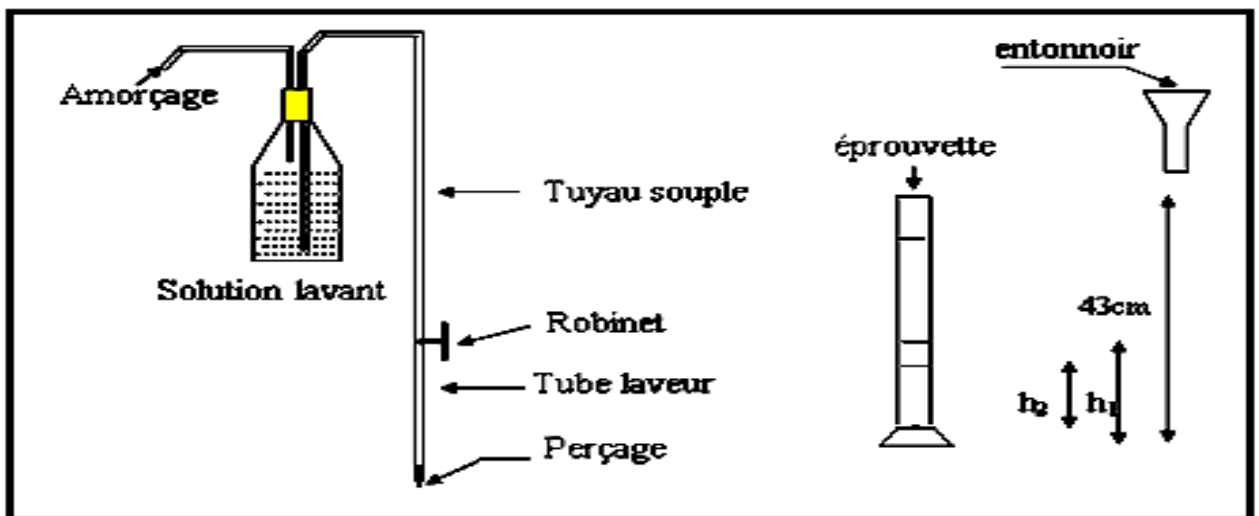


Fig II.2 : Dispositif expérimentale pour l'essai de ES.

Il faut savoir que cet essai est normalisé (dans tout les laboratoires l'essai se réalise dans les mêmes conditions). Et pour suivre exactement ces procédures, il est impératif de bien choisir l'échantillon et de veiller à ce que le diamètre des grains ne dépasse pas les 5 mm, c'est possible et faisable avec un tamis à mailles carrées de 5 mm.

Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floclent.

II.1.5.1. Expression de l'essai de ES :

La valeur de l'équivalent de sable (Es) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

L'équivalent de sable est donc donné par la formule :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

h_1 : hauteur entre la base de l'éprouvette et niveau supérieur du flocculat.

h_2 : hauteur entre la base de l'éprouvette et niveau supérieur du sable sédimenté.

Tel que :

La détermination portant sur deux échantillons, la propreté du sable est la moyenne des deux valeurs obtenues (c.à.d. moyen de deux valeur de ES obtenue par deux essai sur chaque échantillon) [24].

II.1.5.2. Préparation de la solution concentrée :

La préparation de la solution concentrée s'effectue à partir :

- De chlorure de sodium cristallisé, qualité produit pur.
- De glycérine à 99 % de glycérol, qualité pharmaceutique.
- D'eau distillée ou déminéralisée.

Préparer un litre de solution concentrée avec :

- 111 g \pm 1 g de chlorure de sodium anhydre.
- 480 g \pm 5 g de glycérine.

La solution lavante est préparée, en prenant 125 ml \pm 1 ml de la solution concentrée et en diluant à 5L \pm 0,005L avec de l'eau distillée.

II.1.5.3. Mode opératoire de l'essai de ES :

L'essai s'effectue sur le sable à sa teneur en eau naturelle, la masse sèche de l'échantillon pour essai doit être de $120\text{g} \pm 1\text{g}$. Dans tous les cas, deux échantillons par essai ont été préparés.

La solution lavante ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur (c.à.d. jusqu'à un volume de 81ml), la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120\text{g} \pm 1\text{g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

– Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.

Laisser reposer dix minutes.

– À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation à $90 \text{ cycles} \pm 1 \text{ cycle}$ en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$, on peut aussi agiter manuellement.

– Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.

– Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au dessus de l'éprouvette avec la solution lavante. En descendant le tube laveur dans l'éprouvette rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette. Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale.

– Laisser reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.

– Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du régleur la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.

– Lire aussi la hauteur du sédiment (ou sable) h_2 du niveau de par rapport au fond de l'éprouvette (Fig II.3 a et b).

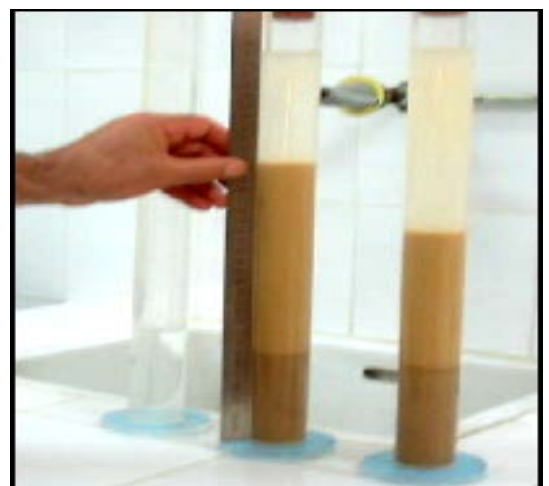
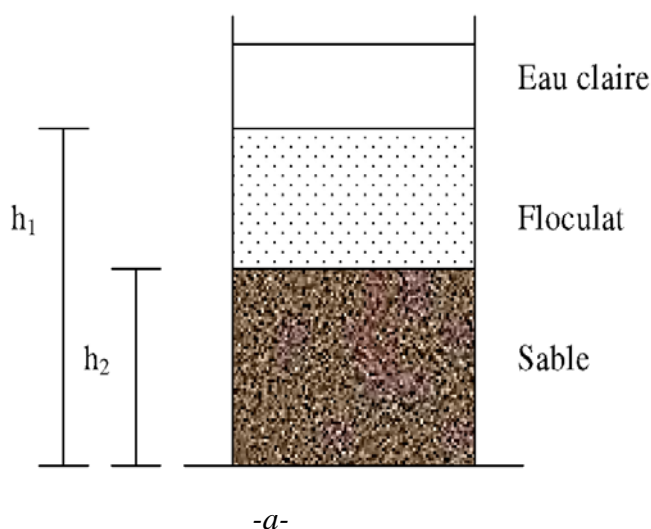


Fig II.3 : L'essai d'équivalent de sable.

II.1.6. Valeur au bleu de méthylène (VBS) :

L'essai au bleu de méthylène VBS (ou activité argileuse), est un essai nouveau, utilisable pour les sols grenus et les sols fins, et qui mesure l'argilité globale du sol.

La valeur au bleu de méthylène VBS représente la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée sur les surfaces externes et internes des particules de sol.

Etant donné que dans un sol c'est avant tout, la surface spécifique des particules fines et les particules argileuses qui déterminent sa surface spécifique totale, on peut donc considérer que la VBS exprime globalement la surface spécifique totale, la quantité et l'activité de l'argile contenue dans ce sol.

La VBS se détermine à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/5 mm.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène, tant que le bleu de méthylène est absorbé, il ne colore pas l'eau. A chaque ajout on contrôle l'adsorption en prélevant une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre normalisé (papier buvard), pour faire une tache. L'adsorption maximale est atteinte quand une auréole bleu clair se produit à la périphérie de la tache (Fig II.5).

La valeur trouvée est alors rapportée à la fraction 0/50 mm par une règle de proportionnalité.

C'est cette dernière valeur qui est appelée valeur au bleu de méthylène du sol.

La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines.

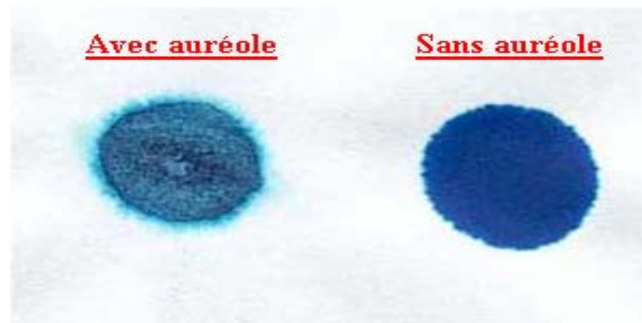
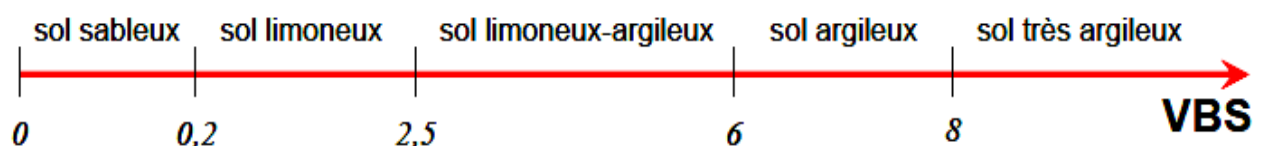


Fig II.4 : Essai au bleu de méthylène sur papier filtre.

II.1.6.1. Ordre de grandeur de VBS :

La valeur trouvée de l'essai de VBS nous permet de classer les échantillons de sable parmi l'une des classes suivantes [5] :



L'appareillage spécifique comporte :

- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 10 cm^3 , 5 cm^3 et 2 cm^3 des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée à $\pm 1 \text{ cm}^3$
- Un récipient cylindrique (en verre, plastique, métal inoxydable) d'une capacité minimale de 3000 cm^3 et de diamètre intérieur (155 ± 10) mm
- Une baguette de verre de (8 ± 1) mm de diamètre.
- Des tamis de maille $80 \mu\text{m}$, 5 mm et 50 mm .
- Balances dont les portées sont compatibles avec les masses à peser et permettent de faire les pesées.
- Thermomètre gradué en degrés (de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ à $100 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Chronomètre indiquant la seconde.
- Appareil de séchage permettant de déterminer la teneur en eau des sols.

Les produits utilisés sont :

- Solution de bleu de méthylène à ($10 \pm 0,1$) g/l qualité pharmaceutique.
- Eau déminéralisée ou distillée.
- Du papier filtre blanc (papier buvard) de masse surfacique (95 ± 5) g/m^2 , d'épaisseur ($0,2 \pm 0,02$) mm, de vitesse de filtration (75 ± 10) s pour 100 ml.

II.1.6.2. Exécution de l'essai :

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache.

L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

L'expression de valeur au bleu de méthylène VBS (ou Activité argileuse) est donnée par la formule suivante :

$$\text{VBS} = \frac{\text{B}}{\text{m}_0} \times \text{C} \times 100$$

Avec :

- B : Masse de bleu de méthylène adsorbé dans l'échantillon (g).
- m_0 : La masse sèche de l'échantillon (on calcule la teneur en eau).
- C : étant la proportion de la fraction $0/5 \text{ mm}$ dans la fraction $0/50 \text{ mm}$ du matériau sec.
- VBS est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériau.

II.1.7. Taux de matière organique (TMO) et de carbonates :

Les essais pour trouver les taux de matière organique et de carbonates (ainsi taux des sels et le pH), sont effectués au niveau du laboratoire Hydraulique de l'université de Kasdi MERBAH de Ouargla.

II.1.7.1. Taux de matière organique (TMO) :

La teneur en matières organiques TMO est le rapport de la masse de la matière organique présente dans le sol à la masse totale des matières solides du sol.

La présence de la matière organique dans le sable se vérifie au moyen de l'essai colorimétrique qui consiste à s'assurer que la coloration de la solution à base de soude dans laquelle on a plongé le sable examiné.

La détermination de la masse des matières organiques consiste à les oxyder par un mélange d'acide sulfurique concentré et de bichromate de potassium porté à ébullition.

II.1.7.2. Teneur en carbonate (de calcium) :

La teneur en carbonate de calcium CaCO_3 d'un sol est déterminée par attaque à l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité de sol sec. La mesure de la quantité de gaz carbonique dégagé permet de calculer la masse de carbonate de calcium dissoute et donc la teneur en carbonates de calcium du sol CaCO_3 , exprimée en pourcentage de la masse de la phase solide du sol [14].

II.1.8. La diffractométrie des rayons X (DRX) :

La diffractométrie de rayons X (DRX) est une méthode d'analyse physico-chimique qui se base sur la particularité cristallographique de chaque matériau ; elle marche sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés).

L'analyse de DRX est effectuée au CRNA en utilisant un appareil de type Philips.

II.1.9. Le microscope électronique à balayage (MEB) :

Le microscope électronique à balayage de type Philips, est un appareil d'analyses permet de visualiser la microstructure des sédiments sur des zones sélectionnées rapidement. Des analyses semi-quantitatives avec détecteur EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ont également été effectuées dans le but d'avoir une idée des constituants et la composition chimique des produits.

II.2. Valorisation du sable de l'erg oriental comme matériaux de construction :

II.2.1. Caractéristique du ciment utilisé :

Dans notre cas, nous avons travaillé avec du ciment portland composé CPJ-CEM II/A 32.5, produit par la cimenterie de MEFTAH d'Alger (Fig II.5). Les ciments composés CPJ-CEM II, ils sont les ciments les plus utilisés en Algérie pour les cas courants de construction.



Fig II.5 : Sac de ciment utilisé pour la préparation de béton dans notre étude.

Les ciments portland composés CPJ-CEM II/A 32.5 sont constitués de 80 à 94 % de clinker, le reste pouvant être un ou plusieurs des constituants suivants : cendres V ou W, laitier S, pouzzolanes Z, calcaire L ou schistes calcinés T dont les proportions varie de 6 à 20%, ainsi qu'éventuellement des fillers dans la proportion maximale est de 5 % (constituants secondaires). La classe 32,5 signifie une résistance inférieure caractéristique de 32,5 MPa à 28 jours respectée à 95 %, la résistance moyenne mesurée étant voisine de 30 MPa (tableau II.1).

Tableau II.1 : Evolution de la résistance minimale garantie des bétons avec le ciment portland CPJ-CEM II/A 32.5.

Classe de ciment	Résistances minimale garanties en MPa (fc)		
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours
CPJ-CEM II/A 32.5	-----	17.5	30

Les principales utilisations de ciment portland CPJ-CEM II/A 32,5 sont :

– Bétons courants, armés ou non armés, et tous travaux de génie civil n'exigeant pas des

contraintes particulièrement élevées.

- Travaux de maçonnerie, réalisation de dallage, confection d'enduit (dans ce dernier cas, il peut être utilisé soit seul, soit mélangé avec de la chaux pour confectionner des mortiers bâtards).
- Préfabrication avec ou sans traitement thermique.
- Travaux routiers notamment traitement de gravés, réalisation de chaussées, des pistes ...
- Bétons prêts à l'emploi.
- Travaux de bétonnage en grande masse, barrages, piles ...

II.2.2. Méthode de préparation des éprouvettes :

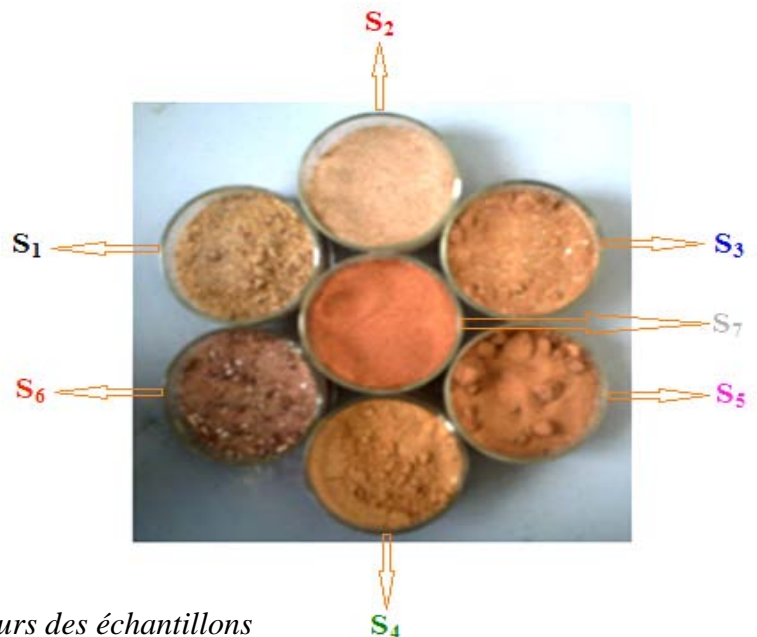
II.2.2.1. Choix de prélèvement :

Le choix et la sélection de prélèvement des échantillons pour cette étude sont faits à partir de plusieurs critères. Les principaux critères sont :

↳ La différence de couleur qui doit être apparente même à l'œil nu, car cette différence implique aussi une différence des propriétés.

Cela exige une longue connaissance approfondie sur la région pour permettre de distinguer les types à partir de leurs couleurs.

La figure (Fig II.6) des sept échantillons sélectionnés pour notre étude montre les variétés de la couleur visualisée entre ces échantillons.



*Fig II.6 : Les couleurs des échantillons
des sables sélectionnés à étudier.*

↳ La quantité qui doit être importante pour notre recherche peut avoir une utilité scientifique, économique et industrielle pourquoi pas.

↳ Distance suffisante entre les sites de prélèvement sauf s'il y'a une nécessité comme le cas de Negrine ou on a pris deux échantillons mais qui sont largement distinctes, (Fig II.8).

On était aussi obligé à suivre certaines conditions pour que les prélèvements soient plus proches du sable à son état réel (c.à.d. pour qu'ils soient représentatifs), ces conditions sont :

↳ De prendre une partie de chaque échantillon à la surface, puis à une profondeur de 0.5 m ensuite de profondeur d'environ 1 m, pour éviter les corps organiques et les impuretés et pour que l'échantillonnage soit plus représentatif (Fig II.7).



a : S₂



b : S₃



c : S₇

Fig II.7 : Méthode d'échantillonnage sur quelques sites de prélèvement.

↳ De bien enfermer les échantillons avec des sacs doubles pour qu'ils restent à l'état naturel et pour assurer qu'ils restent loin de toutes les interactions avec le milieu extérieur pendant le transport et pendant le stockage.

↳ De ramener une quantité suffisante pour toutes les analyses et les travaux nécessaires pour notre étude.

Nous avons décidé de prendre des prélèvements de la région de Negrine wilaya de Tébessa (S₄ et S₅) pour vérifier la qualité de ces sables très valorisés en construction dans la wilaya d'El-Oued ces deux dernières décennies.

En plus, les sables des régions de Still et Djamaa ont été choisis pour cette étude car ils sont actuellement très utilisés par différentes wilayas du sud à savoir El-Oued, Biskra, Ouargla ; et même des wilayas du nord comme Batna, M'Sila, Alger, Blida, Bouira, Tizi-Ouzou et Boumerdes.

Ces sites ou régions (Fig II.8) sont classés comme suit :

- Échantillon S₁ : région de Djamaa wilaya d'Eloued.
- Échantillon S₂ : région de Djebadi wilaya d'Eloued.
- Échantillon S₃ : région de Djerch wilaya d'Eloued.
- Échantillon S₄ : région de Negrine (sable claire) wilaya de Tébessa.
- Échantillon S₅ : région de Negrine (sable foncée) wilaya de Tébessa.

- Échantillon S₆ : région de Still wilaya d'Eloued - Biskra.
- Échantillon S₇ : région de Taibine wilaya de Ouargla.



Fig II.8 : Les sites de prélèvement selon Google Map.

II.2.2.2. Choix de sable :

Nous avons préparé deux familles d'éprouvettes d'essai cylindriques de béton ayant les dimensions 16 × 32 (diamètre de = 16 cm, et la hauteur $h_e = 32$ cm ; Fig II.9.a).

La première famille composée de sept (07) éprouvettes (E₁, E₂, E₃, E₄, E₅, E₆ et E₇) est préparée à partir des échantillons de sable brut. Par contre, la deuxième famille composée de quatre (04) éprouvettes (E₂₁, E₂₂, E₂₆ et E_{2+ E₆}) est préparée à partir de sable après correction.



-a-

-b-

-c-

-d-

Fig II.9 : Les étapes de préparations des éprouvettes d'essais de compression.

(a) : Moule de béton normalisée vide, (b) : les différents granulats après malaxage a sec, (c) : Moule normalisée remplie par de béton frais, (d) : Eprouvette de béton après 28 jours.

Nous avons restauré la réalisation des éprouvettes de la deuxième famille sur trois types de sable S_1 , S_2 et S_6 . Le choix de ces sables a été fait selon leurs courbes de distribution granulométrique. En effet, dans la partie caractérisation de sable, nous avons montré que les courbes de distribution granulométrique des échantillons de sable S_2 , S_3 , S_4 , S_5 et S_7 sont très proches. Nous avons alors opté pour l'échantillon S_2 comme un sable type de ce groupe. Tandis que les échantillons de sable S_1 et S_6 manifestent des courbes de distribution granulométrique différentes entre eux et même entre le groupe précédant représenté par le sable S_2 .

La deuxième famille d'éprouvettes est préparée comme suit :

- E_{21} = sable S_1 ramené au sable idéal sans aucun ajout de l'extérieur.
- E_{22} = sable S_2 ramené au sable idéal avec correction par le sable S_1 .
- E_{26} = sable S_2 ramené au sable idéal avec correction par le sable S_6 .
- $E_2 + E_6$ = sables S_2 et S_6 mélangés et ramenés au sable idéal de béton.

II.2.2.3. Méthode et choix de composition :

Nous avons opté pour la méthode la plus simple et qui prend en considération la composition normalisée qui est la plus utilisée dans les chantiers. Généralement pour préparer 01 m^3 de béton, la composition normalisée est comme suit :

- Ciment : 350 jusqu'à 400 Kg.
- Sable 0/5 mm : 400 l.
- Gravier 5/25 : 800 l.
- Eau : 200 l.

Afin de préparer nos éprouvettes cylindriques de volume V_e ($V_e = \pi \times (d_e / 2)^2 \times h_e$), nous devons calculer la quantité de béton nécessaire pour le remplissage des différents moules. Connaissant la dimension du moule (16×32 cm), nous déduisons alors le volume recherché qui est de l'ordre de $V_e = 6.434$ l. Selon la composition normalisée les quantités nécessaires pour le remplissage de chaque moule sont comme suit :

- Ciment : $m_c = 2.252$ Kg.
- Sable 0/5 mm : $V_s = 2.57$ l.
- Gravier 5/25 : $V_g = 5.147$ l.
- Eau : $V_e = 1.28$ l.

Le malaxage a été réalisé manuellement durant 15 à 20 min pour chaque composition et nous avons utilisé une eau potable de robinet. Nous signalons que toutes ces expériences ont été menées au laboratoire de structure du département génie civil de l'université de l'USTHB.

II.3. Caractérisation des éprouvettes de bétons confectionnés par les échantillons de sable :

II.3.1. Contrôle non destructif :

II.3.1.1. Essai sclérométriques :

Il existe deux modèles de scléromètres, l'un étant simplement manuel, l'autre enregistreur, ce qui évite, après chaque mesure, de relever les valeurs obtenues appelées indices.

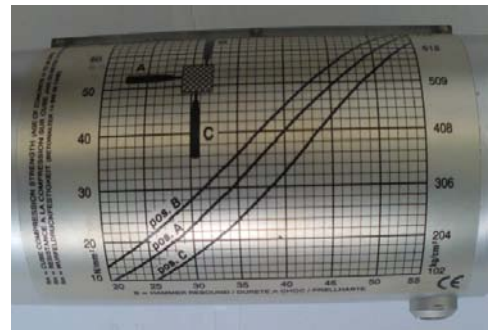
Nous avons travaillé avec le scléromètre manuel (Fig II.10.a), pour chaque mesure, il faut réarranger l'appareil pour assurer le rebondissement d'une petite masselotte projetée violemment par un ressort qui se comprime lors de l'application de l'appareil contre la surface du béton à mesurer et qui se trouve brusquement libéré lorsque la pression exercée est suffisante.



Fig II.10 -a-



-b-



-c-

Fig II.10 : Appareil de scléromètre avec ces différentes parties.

Le rebondissement de la masselotte est d'autant plus important que le béton est plus dur, donc en principe plus résistant, et les valeurs trouvées d'autant plus élevées, que l'on peut lire sur l'échelle de valeur imprimée sur le scléromètre lui-même (Fig II.10.b et Fig II.10.c).

Pour avoir une idée correcte de la valeur du béton, il est nécessaire de procéder à un nombre important de mesures. Nous avons appliqué entre 15 et 20 frappes pour chaque éprouvette distribuée sur la surface latérale, et en prend la valeur moyenne pour la faire correspondre au graphe de la Fig II.9 pour tirer la valeur de résistance de béton précisément sur la surface de béton. Il faut citer aussi que cette valeur de résistance sera utile pour l'essai de l'ultra son.

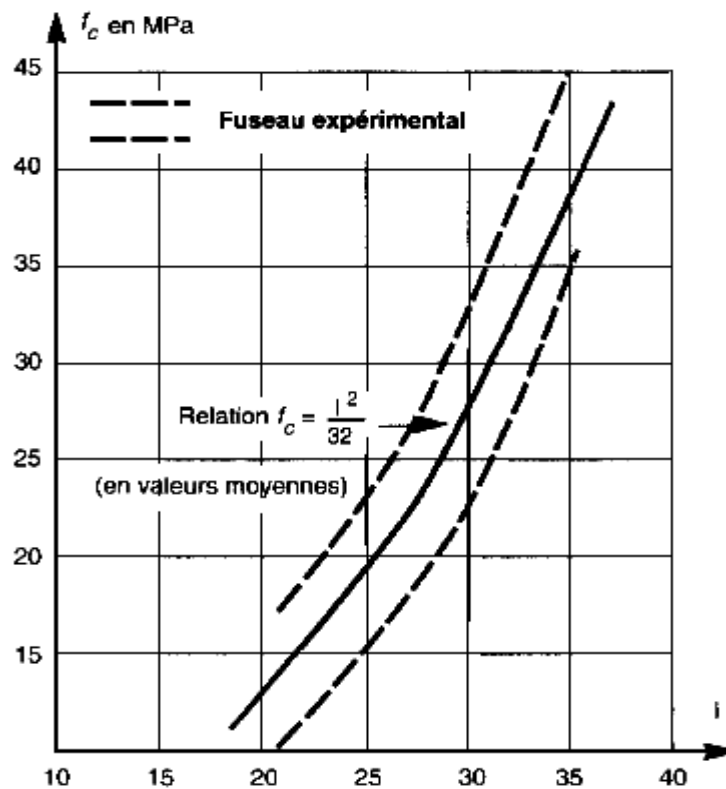


Fig II.11 : Variation de la résistance en fonction de la valeur de rebondissement, [10].

II.3.1.2. Contrôle par les ondes ultrasonores :

Le contrôle par les ondes ultrasonores se fait par mesure de la vitesse du son, laquelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant. On admet en général, que la connaissance de la vitesse du son permet de porter sur le béton une appréciation sur la résistance en compression (Fig II.12).

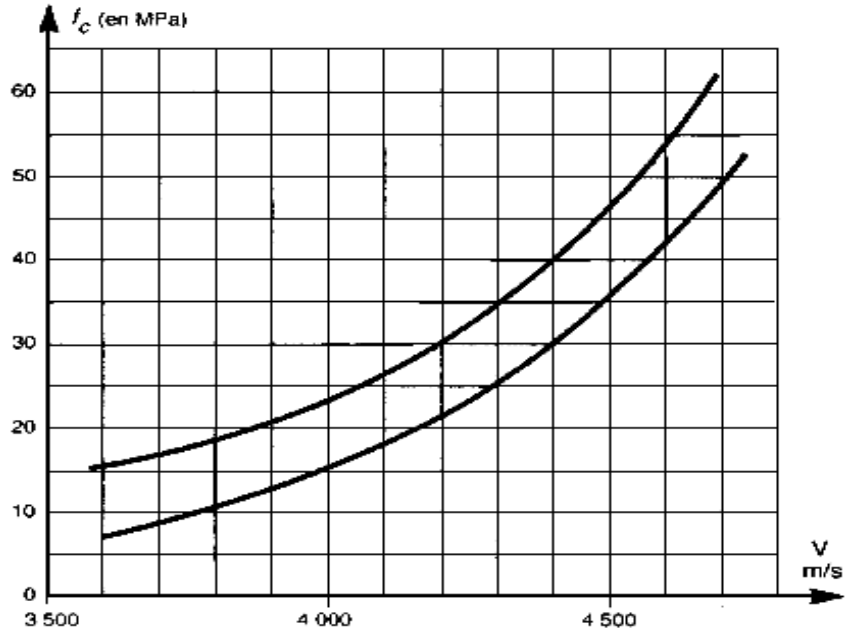


Fig II.12 : Relation entre la vitesse du son (m/s) et la résistance en compression f_c (MPa), [10].

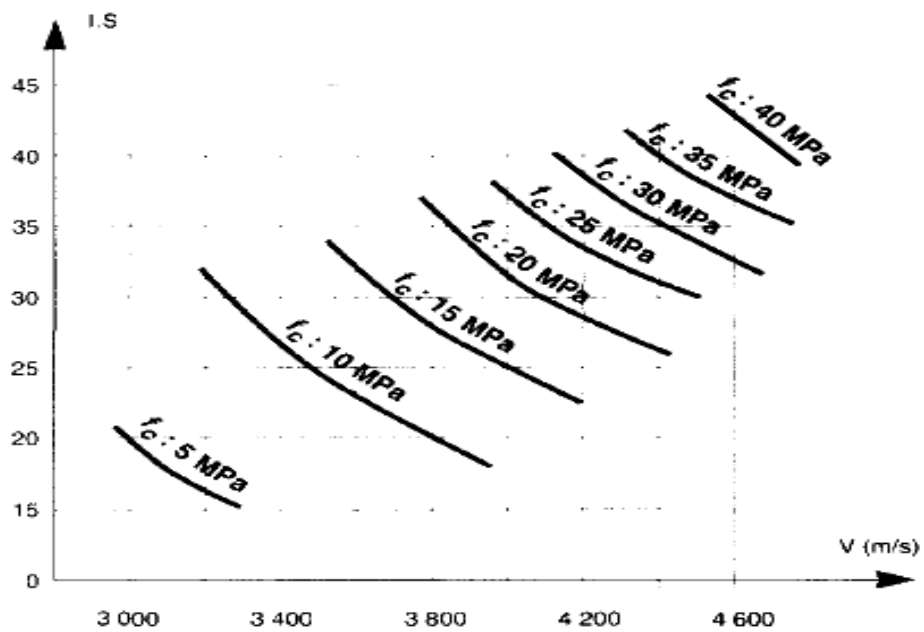


Fig II.13 : Abaque permettant d'évaluer la résistance d'un béton en combinant l'indice sclérométriques (IS) et la vitesse du son, [10].

La vitesse du son n'est pas une fonction simple car elle ne dépend pas seulement de la résistance mais d'autres paramètres telles que la densité et le module d'élasticité. A titre d'exemple, pour un béton de granulat léger, de résistance $R = 27$ MPa, la vitesse du son n'est que de 3800 m/s. Alors que pour un béton dense de granulats silico-calcaire, elle serait de l'ordre de 4200 m/s pour une résistance du même ordre. Mais pour ce béton léger la densité n'est que 1,65 et le module d'élasticité instantanée est de 18000 MPa (au lieu de 2.35 et 33000 MPa pour le béton dense traditionnel).

Dans notre cas, on combine les deux méthodes, essais sclérométriques et le contrôle par les ondes ultrasonores (auscultation dynamique), ce qui permet, à partir de l'abaque de la Fig II.13 d'établir à la suite d'un grand nombre de recoupements, de cerner d'assez près la résistance à la compression de l'élément examiné.

Nous avons utilisé un appareil à ultrasons de marque TICO conçue par le constructeur spécialisée très connue PROCEQ (Fig II.14). Cet appareil appartient au laboratoire de structure du département de génie civil de l'USTHB.

Les étapes pour l'exécution des tests sont les suivantes :

a- Etape 01 : Préparation des surfaces supérieures et inférieures de chaque éprouvette cylindrique de béton pour avoir des surfaces les plus lisses et les plus parallèles entre elles.

b- Etape 02 : Étalonnage de l'appareil en utilisant un étalon spécial en posant une couche du gel de Glycérine pour assurer un contact parfait entre les transducteurs et l'étalant, et on vérifie si le temps de propagation des ondes ultrasonores respecte la norme (20.3 μ s), si ce n'est pas le cas il faut recalibrer l'appareil ou prendre en considération la différence (Fig II.14).

c- Etape 03 : Introduire les valeurs de rebondissement, la longueur de l'éprouvette et le type de ciment (dans notre cas ciment Portland).

d- Etape 04 : On dépose une couche de Glycérine sur les deux surfaces de l'éprouvette et on appuie les transducteurs l'un contre l'autre à travers l'éprouvette et on attend l'affichage des résultats.

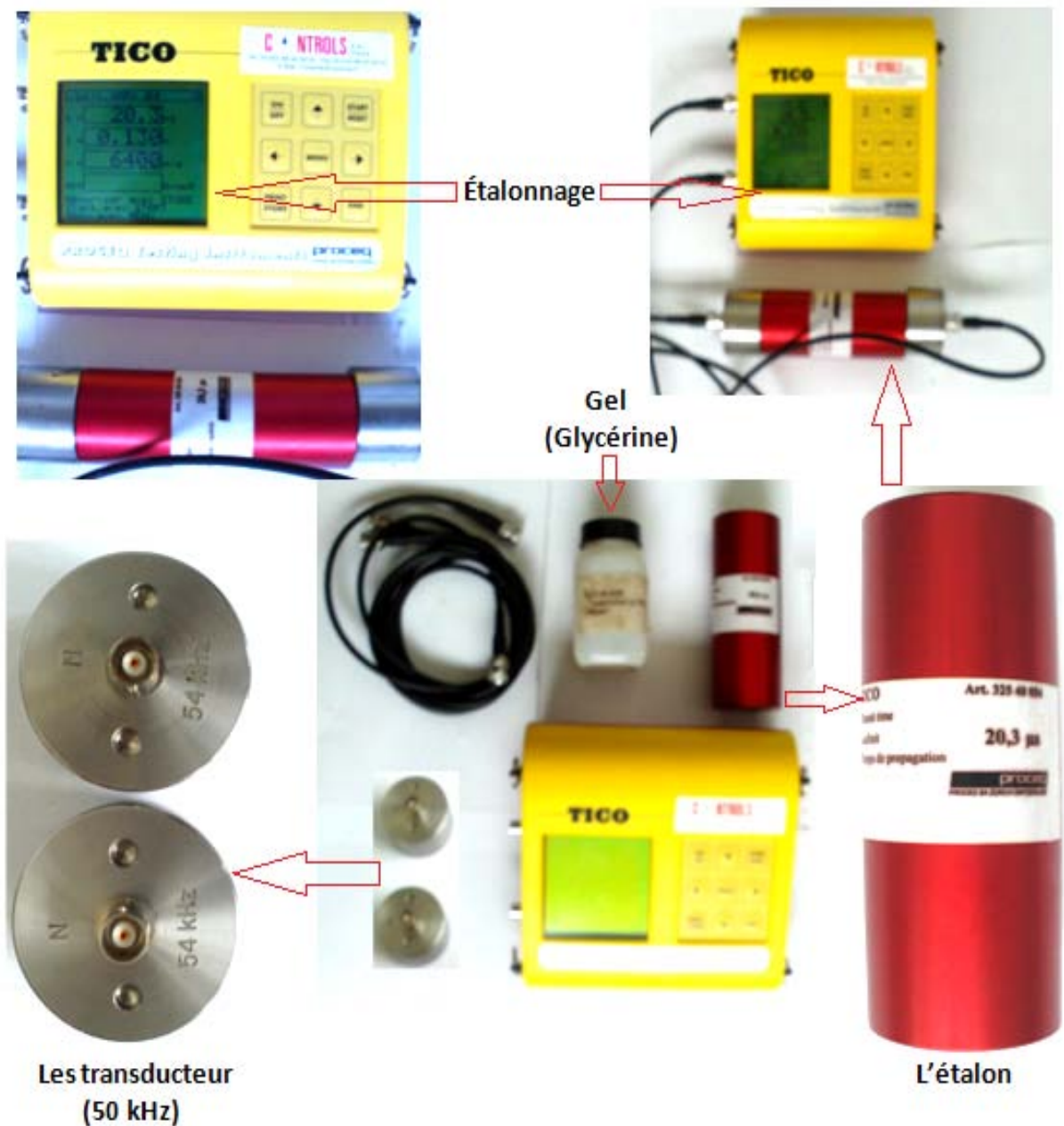


Fig II.14 : Appareil de contrôle ultrasonore et ses différentes parties.

II.3.2. Essai destructif (essai de compression ou d'écrasement) :

La résistance R ou f_c est considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton durcie. Pour cela, nous allons effectuer l'essai de compression axiale sur les différentes éprouvettes de béton (Fig II.15.a). Les détails d'exécution et toutes les précautions à prendre sont précisés dans la norme [19].



-a-



-b-

Fig II.15 : Essai de compression d'une éprouvette d'un échantillon de béton à partir de sable de l'erg.

Nous retiendrons en particulier les points suivants :

- Les extrémités des éprouvettes (faces de chargement) doivent être surfacées parallèles entre elles,
- L'éprouvette doit être bien centrée entre les plateaux de la presse,
- La mise en charge doit s'effectuer d'une manière continue à la vitesse moyenne de 0,5 MPa/s.
- Le contact et la distribution uniforme de la charge appliquée par la presse, sont assurés en mettant une couche de 4 à 5 cm de carton comme le montre la Fig II.15.b.

La surface de compression d'une éprouvette de béton ($S = \pi \times (d/2)^2$) est estimée à 2.01×10^4 mm². De même le rétrécissement absolu, ϵ ($\epsilon = (L_0 - L)/L_0$, où $L_0 = 320$ mm) est estimé à partir du test d'écrasement. Quant à la résistance R ou f_c , les différents essais d'écrasement des éprouvettes de béton permettent de la mesurer.

Chapitre 03 :

Résultats et

discussions

III.1. Caractérisation du sable :

III.1.1. Teneur en eau :

Les teneurs en eau W (%) des échantillons de sable sont montrés dans le tableau III.1. Rappelons que ces échantillons sont issus des régions suivantes :

- Échantillon S₁ : région de Djamaa wilaya d'Eloued.
- Échantillon S₂ : région de Djebadi wilaya d'Eloued.
- Échantillon S₃ : région de Djerch wilaya d'Eloued.
- Échantillon S₄ : région de Negrine (sable claire) wilaya de Tébessa.
- Échantillon S₅ : région de Negrine (sable foncée) wilaya de Tébessa.
- Échantillon S₆ : région de Still wilaya d'Eloued - Biskra.
- Échantillon S₇ : région de Taibine wilaya de Ouargla.

Tableau III.1 : Les teneurs en eau des différents échantillons de sable.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
Masse d'eau (g)	2	0.5	2.5	3.5	1	2	0.5
W (%)	2.04	2.01	2.05	2.07	2.02	2.04	2.01

La teneur en eau de ces échantillons varie entre 2,01 et 2,07 indiquant que ces sables sont d'origine de dune (propre et utilisable en construction) et alluvienne (pouvoir de rétention d'eau élevée et contiennent des argiles et des calcaires).

III.1.2. Compacité, porosité et masse volumique :

Le Tableau III.2 regroupe les taux de porosité, les compacités et les masses volumiques des différents échantillons de sable.

Tableau III.2 : Taux de porosité, compacité et la masse volumique des différents échantillons de sable.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
Vol des pores (l)	0.238	0.340	0.242	0.241	0.283	0.230	0.302
Vol des grains (l)	0.762	0.660	0.758	0.759	0.717	0.770	0.698
n (%)	23.8	34	24.2	24.1	28.3	23	30.2
c (%)	76.2	66	75.8	75.9	71.7	77	69.8
ρ (kg/m ³)	1575.3	1605.2	1511.8	1512.1	1544.2	1770.1	1574.8

Nous remarquons que ces factures diffèrent d'un sable à un autre montrant ainsi une variété granulométrique que nous allons caractériser par l'essai de tamisage.

↳ **Remarque :**

L'erreurs de calcule pour teneur en eau **w**, compacité **c**, porosité **n** et masse volumique **ρ** est estimé à 5 % , due en générale à la différence de l'humidité entre le nord et le sud de l'Algérie

III.1.3. Essai de granulométrie par tamisage :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis l'échantillon de sable en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisas sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique). Ainsi, le tableau III.3 montre la distribution granulométrique (en %) des échantillons de sable.

Tableau III.3 : Distribution granulométrique des sables (en %).

Tami	S1: Djamaa	s2: Djebadi	S3: Djerch	S4: Negrine C	S5: Negrine F	S6: Still	S7: Taibine
mm	%						
0,04	0,05	0,2	2,28	0,55	0,43	0,81	0,25
0,063	0,06	0,25	2,73	0,75	0,78	0,97	0,7
0,08	0,85	0,35	3,68	1,05	1,58	1,31	1,3
0,16	5,1	5,5	10,33	6,55	8,33	3,64	8,4
0,25	14,7	16,65	16,43	18,1	25,73	6,3	16,75
0,5	55,75	100	99,58	92,55	96,68	35,35	99,35
0,8	81,1	100	99,98	94,5	99,08	57,97	100
1,6	95,05	100	100	95,65	99,46	68,32	100
2	96,5	100	100	96	99,63	70,24	100
3,15	98,8	100	100	96,9	99,68	77,24	100
5	99,75	100	100	97,65	99,7	84,57	100

La répartition de la dimension moyenne des grains des différents échantillons est exprimée aussi sous forme de pourcentage du poids total du matériau. Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique comme le montre la Fig.III.1. Où l'abscisse représente le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes. L'ordonnée représente le pourcentage du tamisât cumulatif.

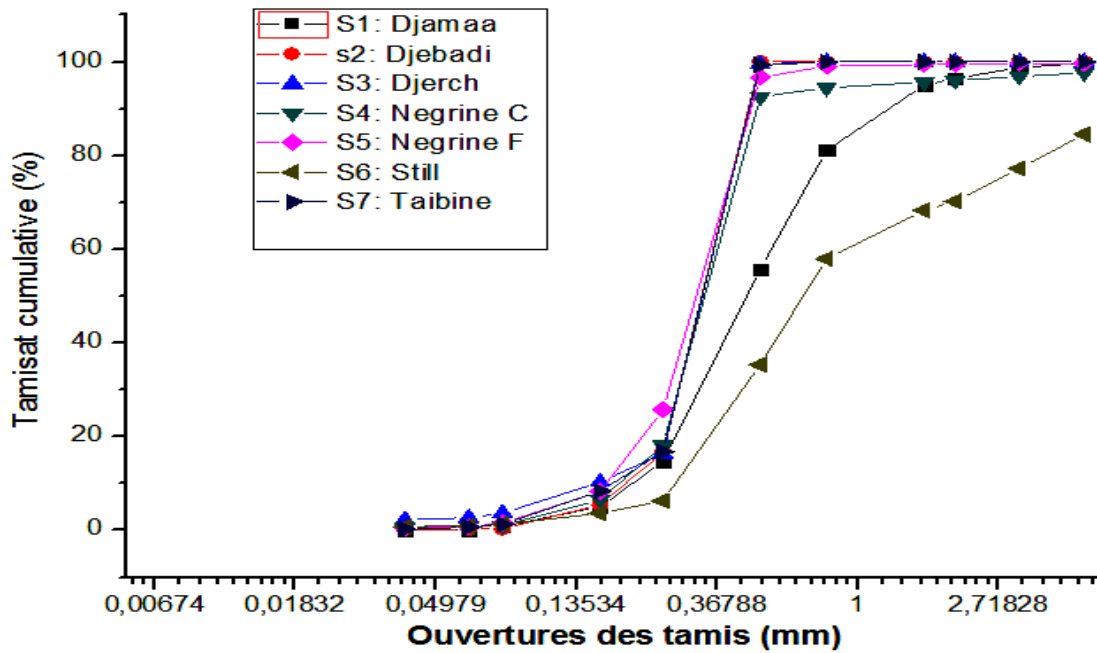


Fig III.1 : Courbes de distribution des fractions granulométriques sur une échelle semi logarithmique.

En comparant les résultats de la Fig.III.1 avec ceux de la littérature (Fig.III.2) [10], il ressort que la courbe granulométrique du sable S₁ est proche de celle du sable normal et celle du sable S₆ correspond au sable plutôt grossier. Par contre, les autres échantillons sont classés avec les sables à majorité de grains fins.

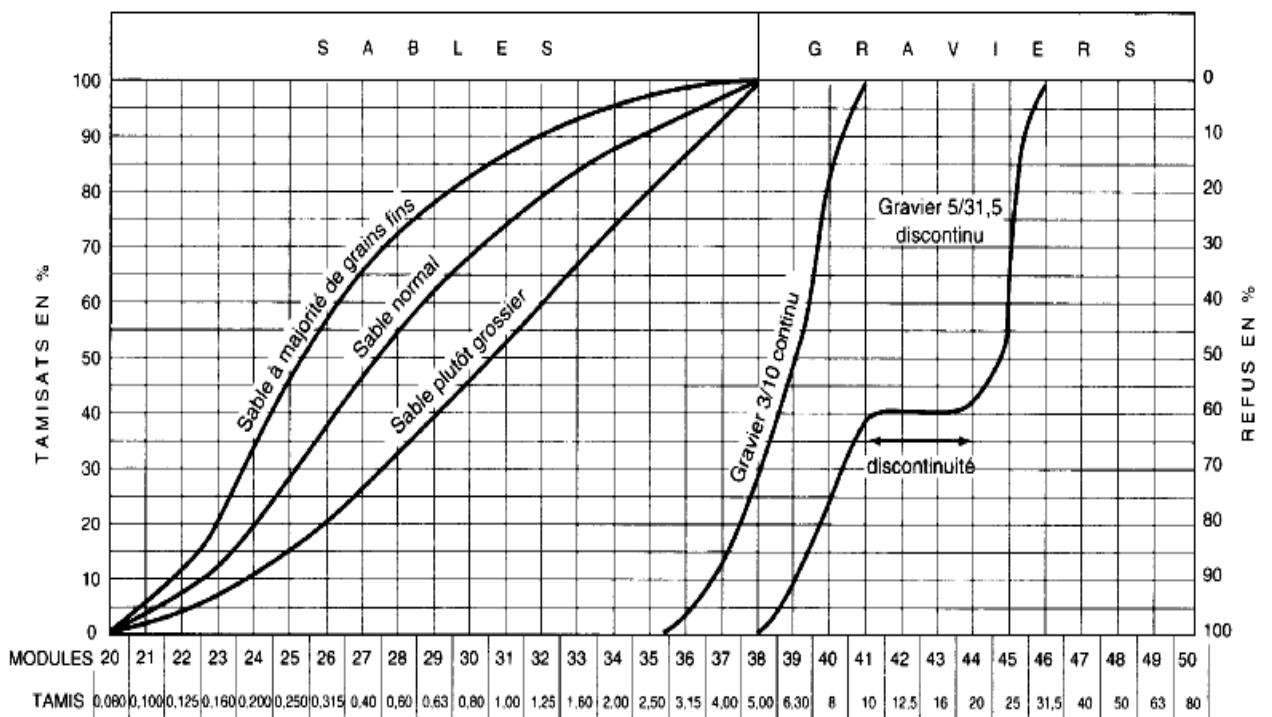


Fig III.2 : Les types des courbes granulométrique, [10].

III.1.3.1. Les facteurs d'uniformité de Hazen Cu et de courbure Cc :

Le tableau III.4 donne les qualificatifs du sable en fonction de ces facteurs.

Tableau III.4 : Qualificatif de la granularité en fonction des facteurs Cu et Cc, [30].

Division granulométrique Sable : 0.08 mm – 2 mm	Qualificatif	Cu	Cc
	Bien gradué	$Cu > 6$	et $1 < Cc < 3$
	Mal gradué	$Cu < 6$	ou $Cc < 1$ ou $Cc > 3$

Un sol bien gradué veut dire un sol qui a une compacité maximale comme le montre la figure III.3 :

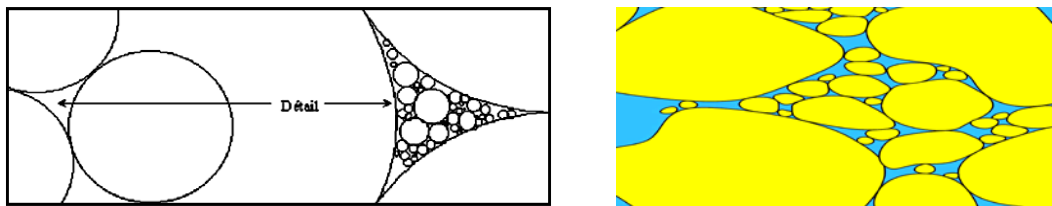


Fig III.3 : Exemple d'un sol bien gradué, [30].

Rappelons que pour une division granulométrique de sable entre 0,08 à 2 mm, les sables ayant des facteurs d'uniformité de Hazen ($Cu > 6$) et de courbure ($1 < Cc < 3$) sont classés bien gradués. Par contre ceux qui ont des facteurs d'uniformité de Hazen ($Cu < 6$) ou de courbure ($Cc < 1$ ou $Cc > 3$) sont classés mal gradués. D'après les résultats du tableau III.5, tous les échantillons de sable sont classés mal gradués. Cela prouve qu'il n'y a pas d'équilibre entre les différentes tailles des grains de sable et leurs quantités et par conséquent, il n'existe pas d'équilibre qui assure le remplissage maximal entre les jeux qui restent par le contact des gros grains.

Tableau III.5 : Valeurs des facteurs d'uniformité de Hazen (Cu) et de courbure (Cu).

S(i)	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	Cu	Cc
S ₁ : Djamaa	0.202	0.324	0.541	2.67	0.96
S ₂ : Djebadi	0.192	0.279	0.358	1.86	1.132
S ₃ : Djerch	0.155	0.281	0.362	2.33	1.407
S ₄ : Negrine C	0.181	0.277	0.368	2.033	1.152
S ₅ : Negrine F	0.169	0.261	0.348	2.059	1.158
S ₆ : Still	0.271	0.437	0.911	3.36	0.773
S ₇ : Taibine	0.173	0.281	0.355	2.052	1.285

III.1.3.2. Les indices de classement S_0 et d'asymétrie S_k :

Comme deuxième étape, nous allons procéder au classement de nos échantillons de sables en calculant les indices de classement S_0 qui permet de déterminer le degré de classement d'un sédiment et l'indice d'asymétrie S_k qui exprime la symétrie du mode de l'histogramme par rapport à la médiane.

L'indice S_0 (Tableau III.6) regroupe les milieux granulaires de point de vue homogénéités (ressemblance des grains entrent eux par leurs tailles, formes, natures...).

Tableau III.6 : Degré de classement d'un sédiment.

Valeur de l'indice S_0	Degré de classement
$S_0 < 0,5$	Extrêmement bien classé
$0,5 < S_0 < 1$	Très bien classé
$1 < S_0 < 2,5$	Bien classé
$2,5 < S_0 < 3$	Normalement classé
$3 < S_0 < 4$	Faiblement classé
$4 < S_0$	Très mal classé

Le tableau III.7 donne les modes d'asymétrie du graphe granulométrique par rapport à la médiane.

Tableau III.7 : les modes d'asymétrie du graphe granulométrique par rapport à la médiane.

Valeur de l'indice S_k	Mode de d'asymétrie
$S_k < 1$	Maximum vers les fines
$S_k = 1$	Symétrie est parfaite
$S_k > 1$	Maximum vers les grossiers

Ainsi, les résultats de nos calculs sont rassemblés dans le tableau III.8. En comparant les données des tableaux III.6 et III.7 concernant le degré de classement et d'asymétrie de sédiment en fonction des valeurs des indices S_0 et S_k , il ressort selon l'indice S_0 que tous les sables de notre étude sont bien classés à l'exception de l'échantillon S_6 qui est normalement classé.

Tableau III.8 : Valeurs des indices S_o et S_k des différents échantillons de sable.

$S(i)$	Q_1	Q_2	Q_3	S_o	S_k
S_1 : Djamaa	0.295	0.455	0.715	1.556	1.018
S_2 : Djebadi	0.266	0.339	0.401	1.227	0.928
S_3 : Djerch	0.265	0.329	0.406	1.237	0.994
S_4 : Negrine C	0.264	0.333	0.421	1.263	1.002
S_5 : Negrine F	0.243	0.309	0.407	1.294	1.036
S_6 : Still	0.388	0.675	2.707	2.641	2.305
S_7 : Taibine	0.267	0.329	0.405	1.231	0.999

D'après l'indice S_k , nous trouvons que les échantillons de sable S_2 et S_7 sont classés vers les fins et les autres vers les grossiers.

III.1.3.3. Module de finesse des sables :

Le module de finesse (MF) d'un granulat peut aussi donner un aperçu sur le classement des échantillons de sable. Selon la Norme Française NFP 18-540 [17], le module de finesse est égal au $(1/100)^{ème}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm. Les valeurs du module de finesse (MF) des différents échantillons de sable sont données dans le tableau III.9.

Tableau III.9 : Valeurs des modules de finesse (MF) des différents échantillons de sable.

$S(i)$	Refus cumulés en % des tamis d'ouverture (en mm)						MF
	0.16	0.315	0.63	1.25	2.5	5	
S_1 : Djamaa	94.72	71.65	31.34	9.91	2.3	0.11	2.10
S_2 : Djebadi	94.39	55.105	0	0	0	0	1.49
S_3 : Djerch	89.27	55.54	0.34	0	0	0	1.45
S_4 : Negrine C	93.18	56.82	6.45	4.79	3.48	2.16	1.66
S_5 : Negrine F	91.02	51.16	2.53	0.81	0.38	0.38	1.46
S_6 : Still	96.47	84.42	53.74	35.21	26.38	15.13	3.11
S_7 : Taibine	91.46	55.105	0.34	0	0	0	1.47

En général, le sable est classé selon la valeur du module de finesse MF. Il est classé comme suit :

- MF = 1.8 à 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- MF = 2.2 à 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- MF = 2.8 à 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

D'après ces résultats, tous les sables sont à majorité de grains fins sauf ceux des échantillons S_1 et S_6 . La valeur du module de finesse (MF) de 3,11 de l'échantillon S_3 le classe directement comme sable grossier. Par contre, la valeur du module de finesse de 2,10 de l'échantillon S_1 est très proche à 2,2 qui est celle de sable préférentiel. En tenant compte des différentes erreurs de mesures pendant nos expériences, nous pouvons classer cet échantillon dans cette catégorie.

↳ Remarque :

Les erreurs de calcul pour les facteurs d'uniformité de Hazen **Cu**, de courbure **Cc**, Les indices de classement **So**, d'asymétrie **Sk** et Le module de finesse **MF** ; sont estimés à 2 %.

Ces erreurs sont liée a l'état des tamis, et les pertes de masse des sables durant les différents étapes de tamisage.

III.1.4. Essai de granulométrie par laser :

Les résultats des essais granulométriques par laser sont montrés par les Fig.III.4 à III.6.

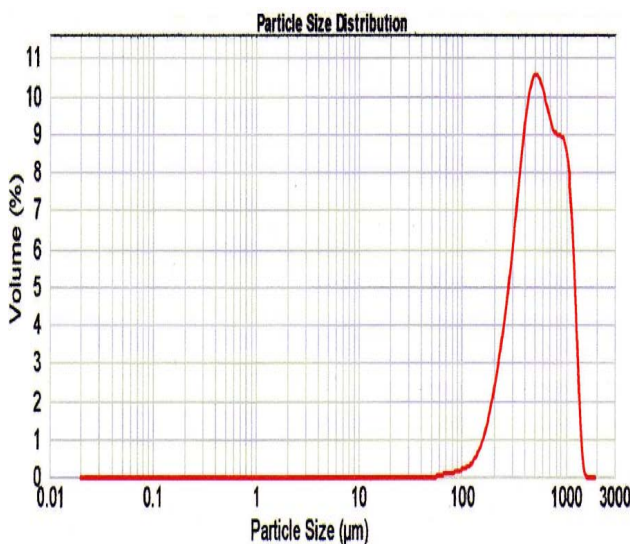


Fig III.4: Distribution granulométrique par laser de l'échantillon de sable S_1 .

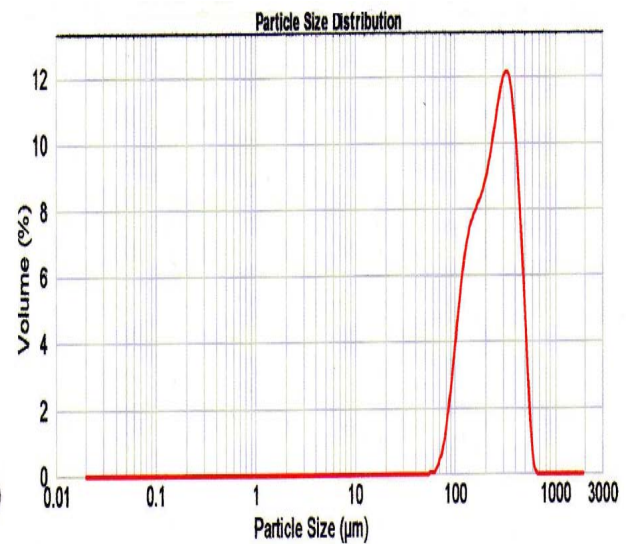


Fig III.5 : Distribution granulométrique par laser de l'échantillon de sable S_2 .

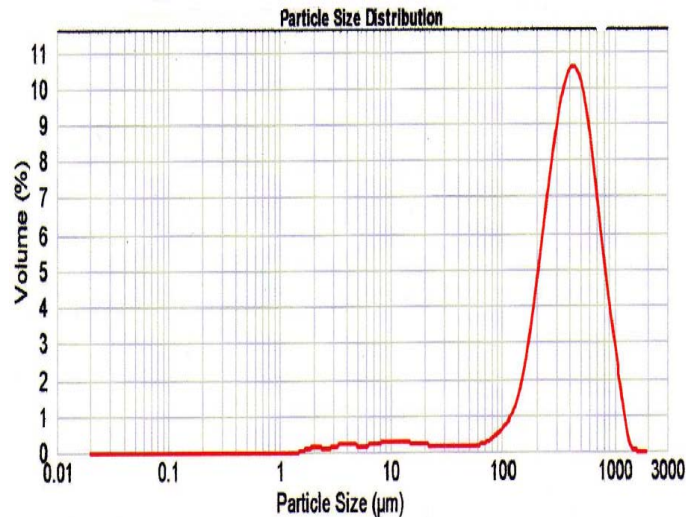


Fig III.6 : Distribution granulométrique par laser de l'échantillon de sable S₆.

Les trois échantillons de sable montrent un seul pic indiquant une concentration de masse et montrant ainsi que la majorité de la masse de sable est d'une même taille.

Tableau III.10 : Les résultats extraits des courbes granulométriques par laser.

	S₁	S₂	S₆
D (v ; 0,1) ; (µm)	261.793	118.175	165.789
D (v ; 0,5) ; (µm)	546.376	247.859	392.160
D (v ; 0,9) ; (µm)	1057.684	425.148	778.191
D (4 ; 3) ; (µm)	608.181	260.722	435.037
D (3 ; 2) ; (µm)	457.023	207.853	112.357
Span	1.457	1.238	1.562
Surface spécifique (m²/g)	0.013	0.028	0.053

Le tableau III.10 donne les tailles de particules à 10%, 50% et 90% des échantillons se trouvant en dessous de cette dimension ; les diamètres moyens et pondérés en surface ; les largeurs de la distribution et les surfaces spécifiques des trois sables S₁, S₂ et S₆.

Les diamètres moyens D (4 ; 3) et D (3 ; 2) donne directement un classement des tailles de l'ensemble des grains de chaque sable, tandis que la mesure de la largeur de la distribution (Span) nous informe sur la manière d'étalement de la courbe. Le graphe de distribution granulométrique présente un seul pic avec un sommet double (sable S₁ et S₂) qui donne des valeurs de Span inférieures à celle du sable S₆. Le sable S₆ enregistre la plus grande surface spécifique.

III.1.5. Essais d'équivalent de sable (ES) et de bleu de méthylène (VBS) :

Le tableau III.11 donne les résultats de l'essai de l'équivalent de sable (ES). Les valeurs de ces essais sont comprises entre 25,91 et 99,29 % montrant que les sables des échantillons S₄ et S₅ sont les moins propres. Par contre, les échantillons S₂, S₇ et S₁ sont les plus propres. Les valeurs de l'essai de ES donnent une idée sur le choix d'utilisation d'un ciment adéquat pour la préparation d'un béton. Une valeur de ES comprise entre 70 et 80 % d'un quelconque sable, permet l'utilisation d'un ciment de type portland.

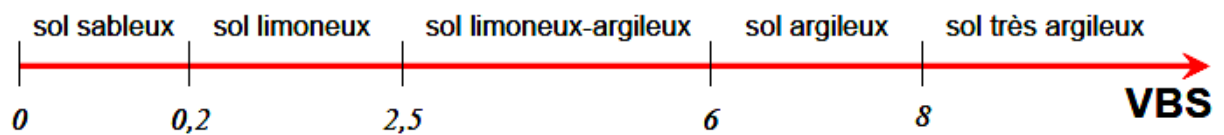
Tableau III.11 : Valeurs de l'équivalent de sable (ES) des échantillons de sable.

Echantillon de sable S _i	Essai 01		Essai 02		ES1 (%)	ES2 (%)	ES (%)
	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)			
S ₁ : Djamaa	3.75	3.5	3.7	3.45	93.33	93.24	93.28
S ₂ : Djebadi	3.6	3.6	3.55	3.5	100	98.59	99.29
S ₃ : Djerch	13.2	9.5	12.8	9	71.96	70.31	71.13
S ₄ : Negrine C	32.1	9.5	33	10	29.59	30.30	29.94
S ₅ : Negrine F	36	9.4	35	9	26.11	25.71	25.91
S ₆ : Still	5.4	3.65	5.35	3.55	67.59	66.35	66.97
S ₇ : Taibine	10.3	10	11	10.5	97.08	95.45	96.26

Le tableau III.12 montre les résultats de l'essai de valeur au bleu de méthylène (VBS) des échantillons de sable. Nous observons que d'après ces résultats, tous les échantillons de sable sont sableux sauf ceux S₄, S₅ et S₆ sont limoneux.

Tableau III.12 : Valeurs de l'essai au bleu de méthylène (VBS) des échantillons de sable.

S(i)	V _{bm} (ml)	B _i (g)	C _i	M ₀ (g)	VBS
S ₁ : Djamaa	10	0.1	0.9879	99.855	0.09
S ₂ : Djebadi	3	0.03	1	99.285	0.03
S ₃ : Djerch	6	0.06	1	97.783	0.06
S ₄ : Negrine C	61	0.61	0.9912	98.865	0.61
S ₅ : Negrine F	74	0.74	0.9916	96.587	0.75
S ₆ : Still	34	0.34	0.9879	99.078	0.33
S ₇ : Taibine	4	0.04	1	99.371	0.04



↳ **Remarques :**

- 1- Le rapport entre essais d'équivalent de sable ES et de bleu de méthylène VBS, c'est que l'essai d'équivalent de sable donne le degré de propreté ; tandis que l'essai de la valeur au bleu de méthylène permet de déterminer la nature des fines qui existe dans les sables de notre étude.
- 2- Les erreurs pour ces deux essais sont estimées à 1 %.

III.1.6. Taux de matière organique, de salinité, de carbonate et pH de chaque sable :

Ces essais donne des informations qualitative par rapport aux essais de ES et de VBS qui sont des essais qualitative. La connaissance de ces informations permet de prédire si les sables sont propre et utilisable comme des matériaux de construction. L'effet de ces matières dans le cas des taux élevés sur le béton se traduit essentiellement par une diminution des résistances et un allongement du temps de prise.

Les taux du sel, de carbonate et le pH des sables utilisés dans le béton doivent être limités à des valeurs précises en fonction des différents types de bétons réalisés, leur action étant particulièrement néfaste sur les armatures dont la corrosion provoque l'éclatement du béton, ceci indépendamment du fait que leur présence agit sur la vitesse de prise du ciment.

Tableau III.13 : Taux de matières organiques (MO), de sels, de carbonate et pH des échantillons de sable.

(Si)	% MO	% Sels	% CaCO ₃	pH
S1 : Djamaa	0,138	0,066	0,300	8,15
S2 : Djebadi	0,052	0,105	3,174	7,27
S3 : Djerch	0,034	0,114	7,391	7,60
S4 : Negrine C	0,009	0,053	0,087	7,62
S5 : Negrine F	0,017	0,111	1,348	5,98
S6 : Still	0,275	0,234	4,990	8,43
S7 : Taibine	0,533	0,011	0,650	7,99

Le tableau III.13 regroupe les taux de matières organiques (MO), de sels, de carbonate et pH des différents échantillons de sable. Notons la présence de faible taux de MO dans les sables S₂, S₃, S₄ et S₅ et un taux un peu élevé de MO pour le sable S₇. Les sables présentant un faible pourcentage en sels sont S₁, S₄ et S₇ et un pourcentage un peu élevé sont S₂, S₅ et S₆. Nous signalons aussi que les échantillons S₂, S₃ et S₆ présentent un taux élevé en carbonate de calcium et spécialement le sable S₃ avec un taux de 7,391 %.

En ce qui concerne le pH, nous enregistrons un pH acide de l'échantillon S₅ ayant une valeur de 5,98 et un pH basique pour les échantillons S₁ et S₆. Pour une éventuelle utilisation de ces sables dans le béton, ils doivent subir un lavage afin d'éliminer les matières organiques, les sels et les carbonates. Après des lavages, le pH est aussi ajusté vers les valeurs neutres.

III.1.7. Caractérisation par diffraction des rayons X :

Tous les échantillons de sable ont été caractérisés par diffraction des rayons X. Les Fig.III.7 à III.9 montrent les spectres de ces sables de l'erg Oriental.

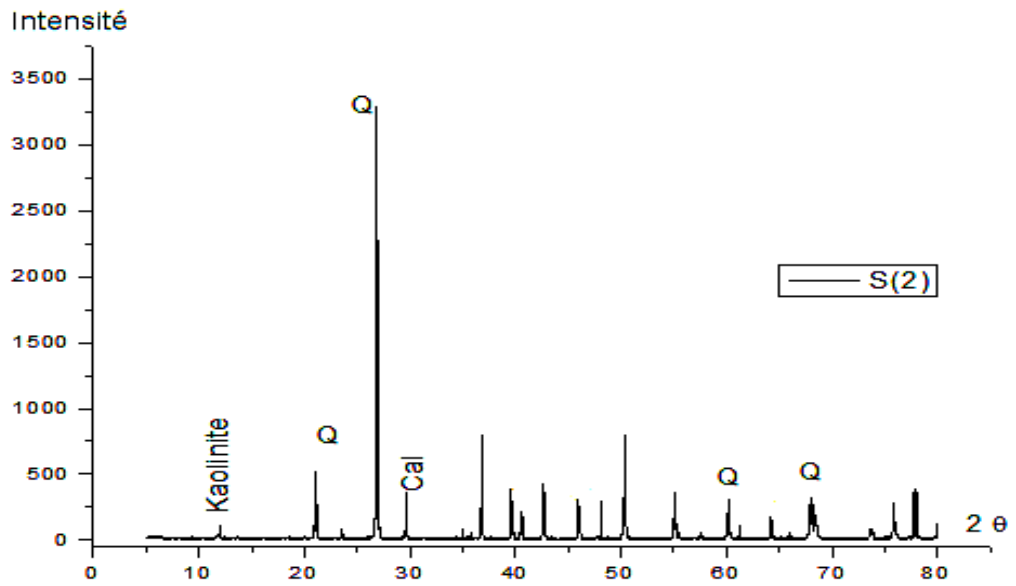
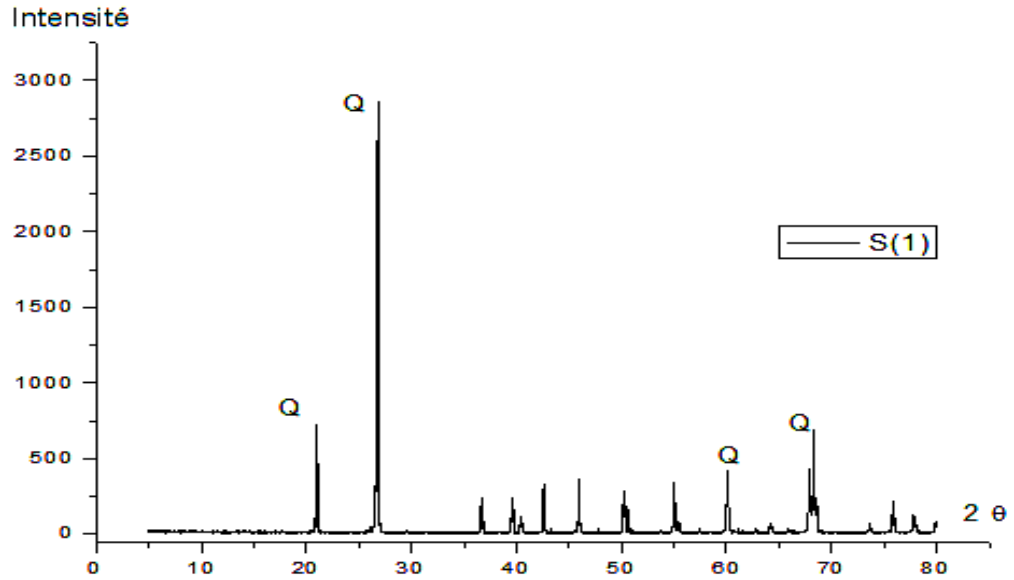


Fig III.7 : Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de sable S_1 et S_2 .

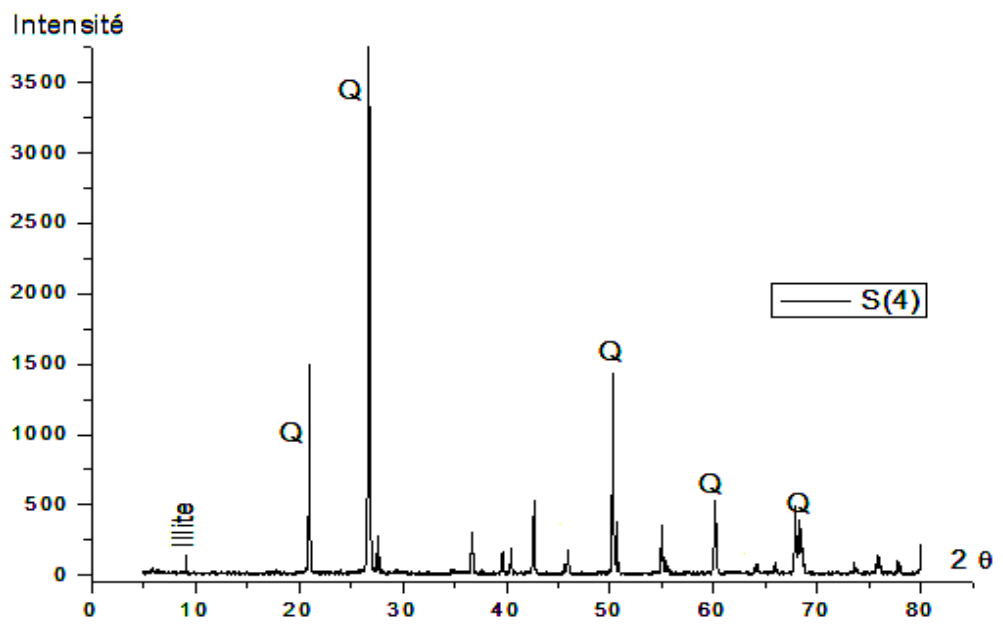
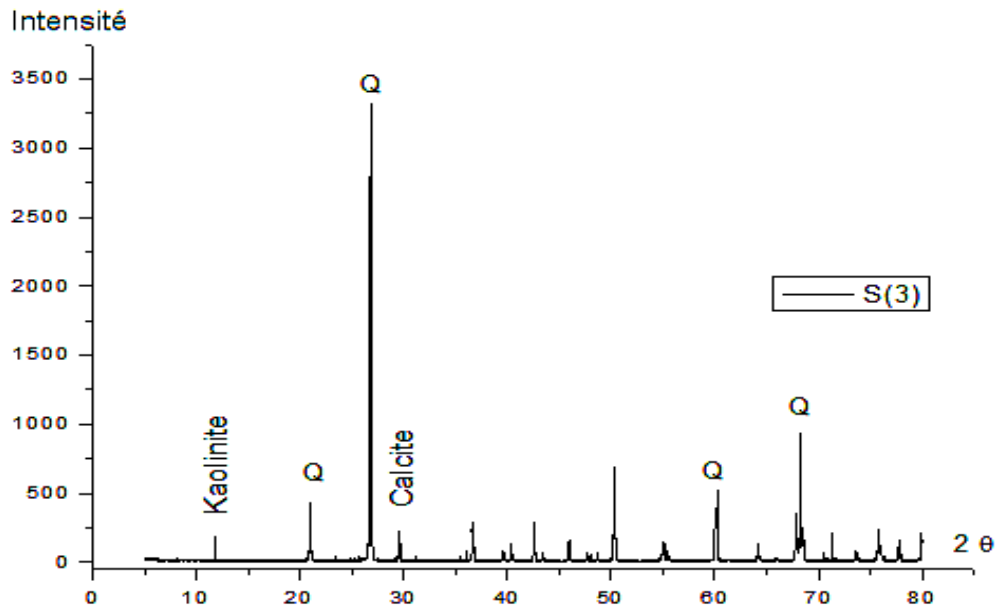


Fig III.8 : Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de sable S_3 et S_4 .

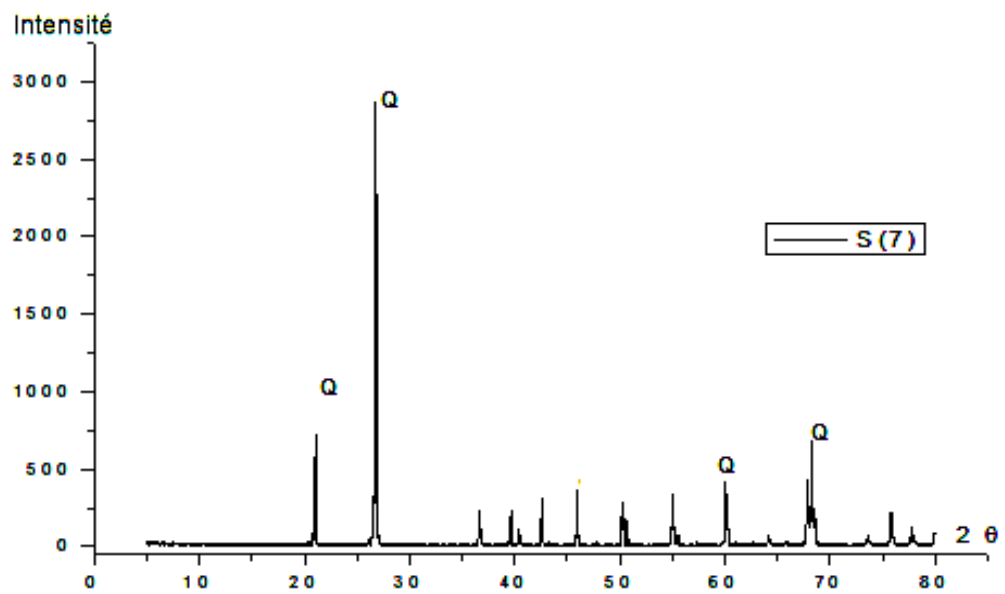
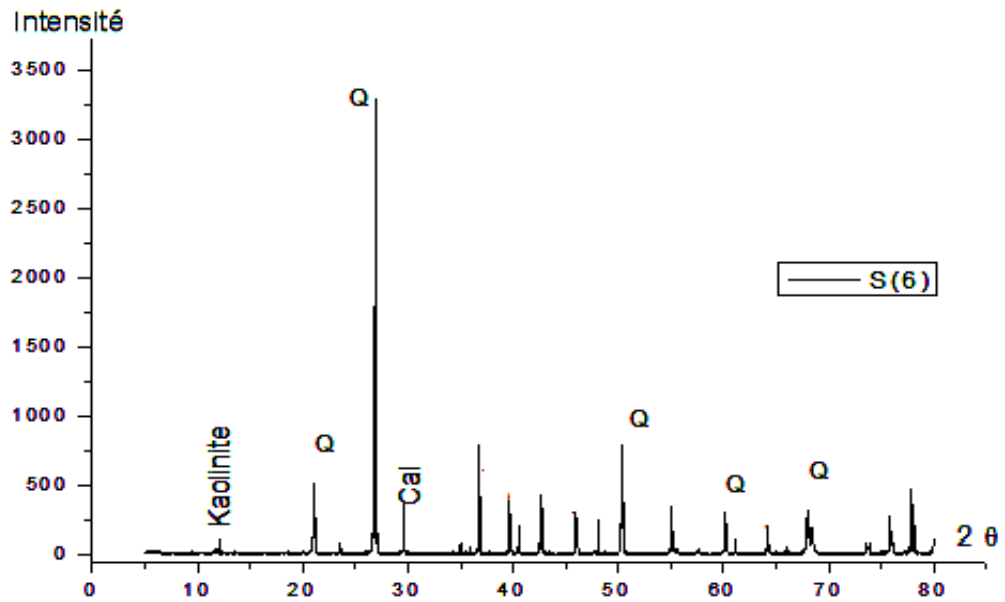
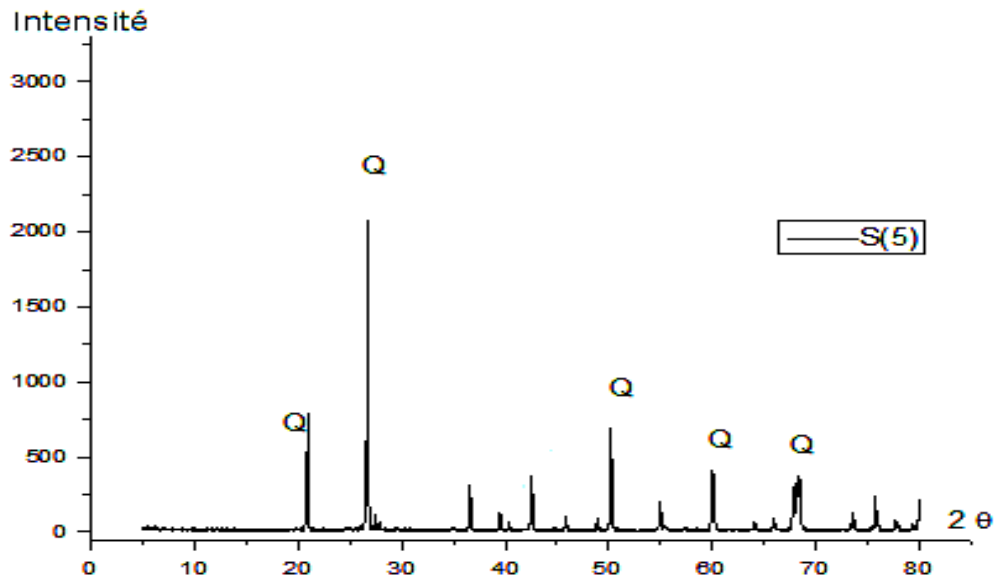


Fig III.9 : Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de sable S_5 , S_6 et S_7 .

Nous remarquons que pour tous les échantillons la phase quartzreuse est la plus dominante et représente plus de 98 %. Notons aussi la présence des phases telles que la calcite et la kaolinite dans les échantillons S₂, S₃ et S₆, l'illite dans l'échantillon S₄. Ces phases sont très minimes dans ces sables de l'erg oriental étudié.

III.1.8. Observation par microscopie électronique à balayage :

De même, tous les échantillons ont été observés par microscopie électronique à balayage comme le montre les Fig.III.10 à Fig.III.11. Ces observations ont été suivies par des analyses qualitatives par EDS.

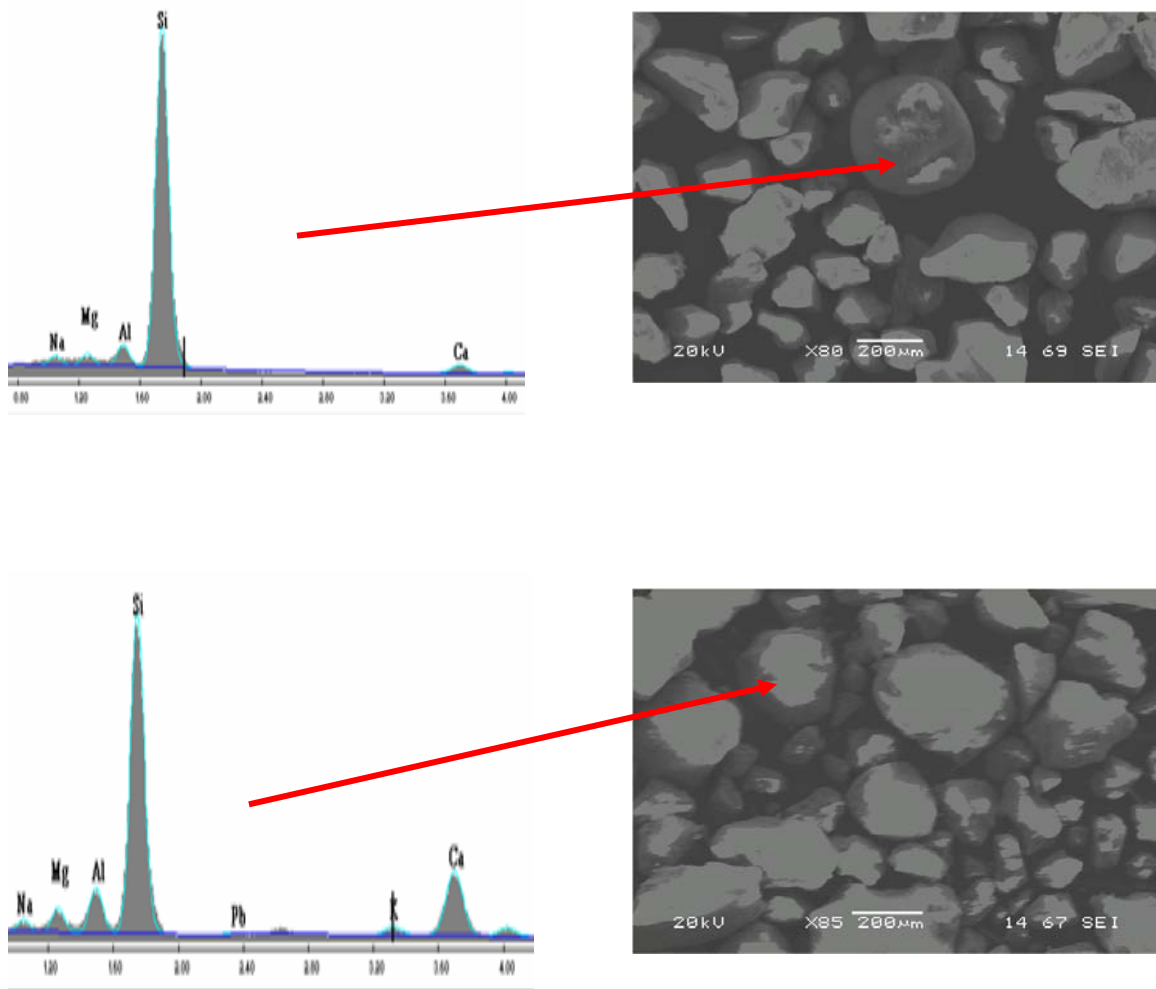


Fig III.10 : Micrographies des échantillons de sable S₁ et S₂ obtenues par MEB et analyse par EDS.

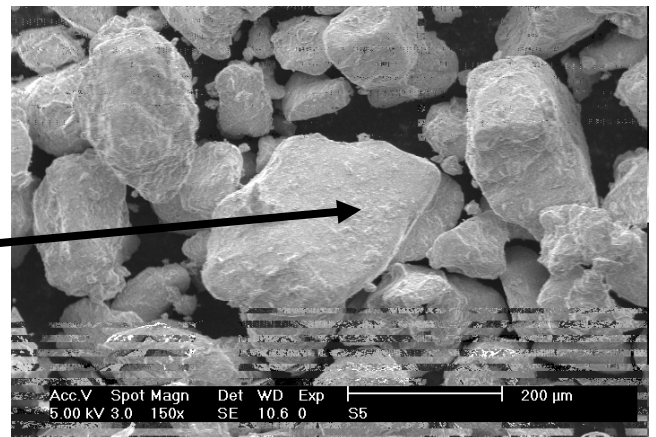
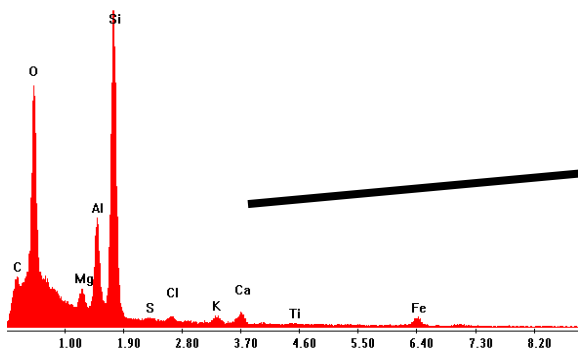
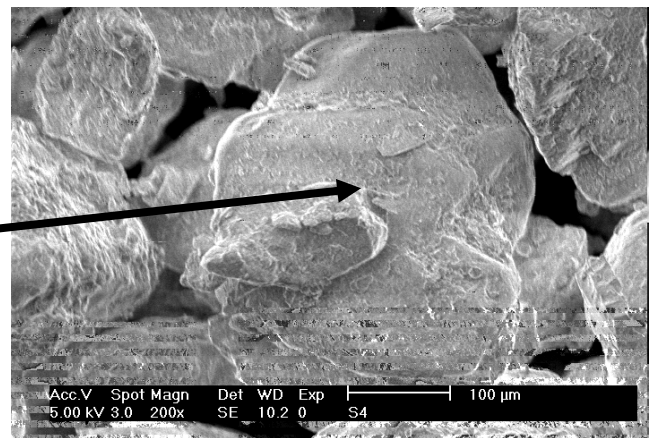
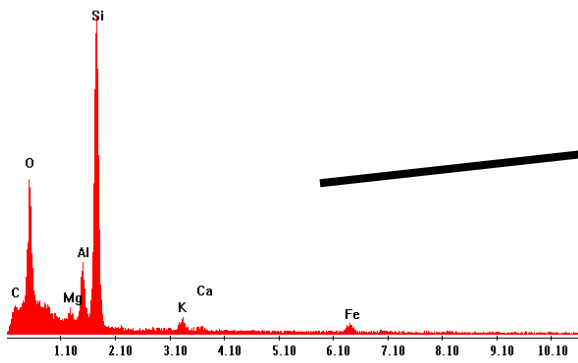
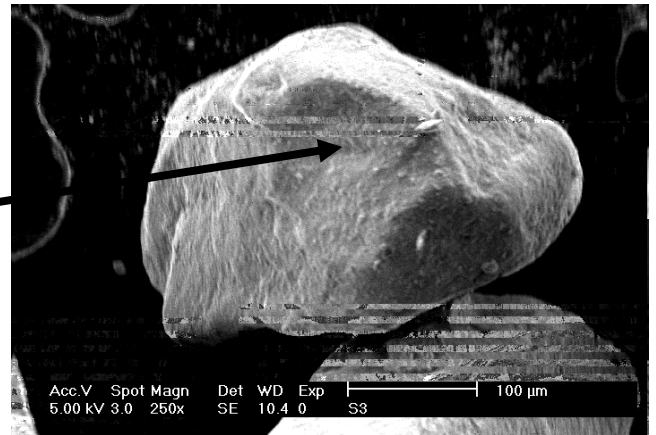
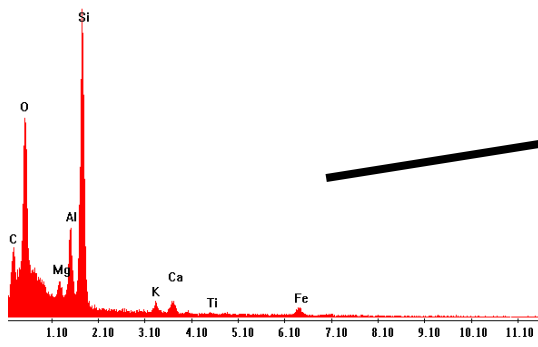


Fig III.11 : Micrographies des échantillons de sable S₃, S₄ et S₅ obtenues par MEB et analyse par EDS.

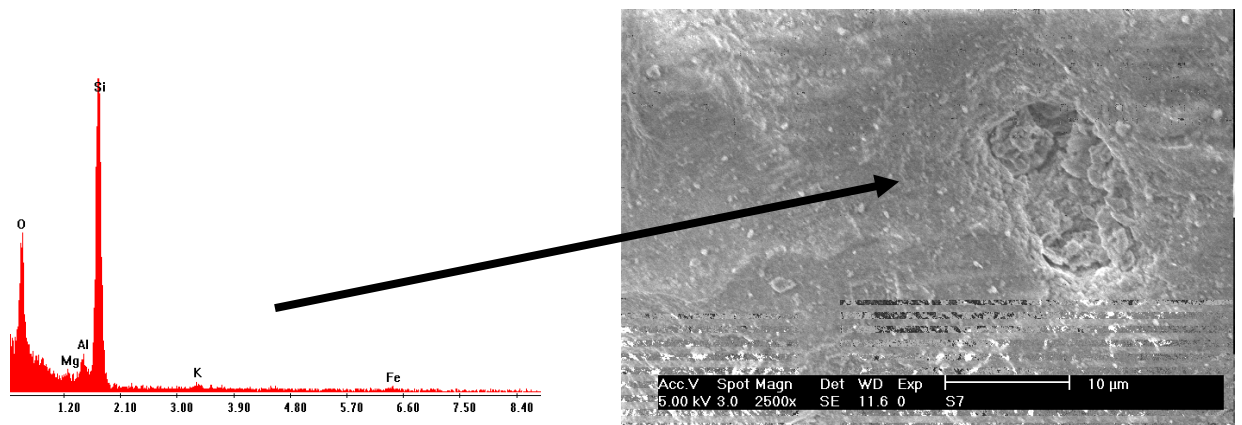
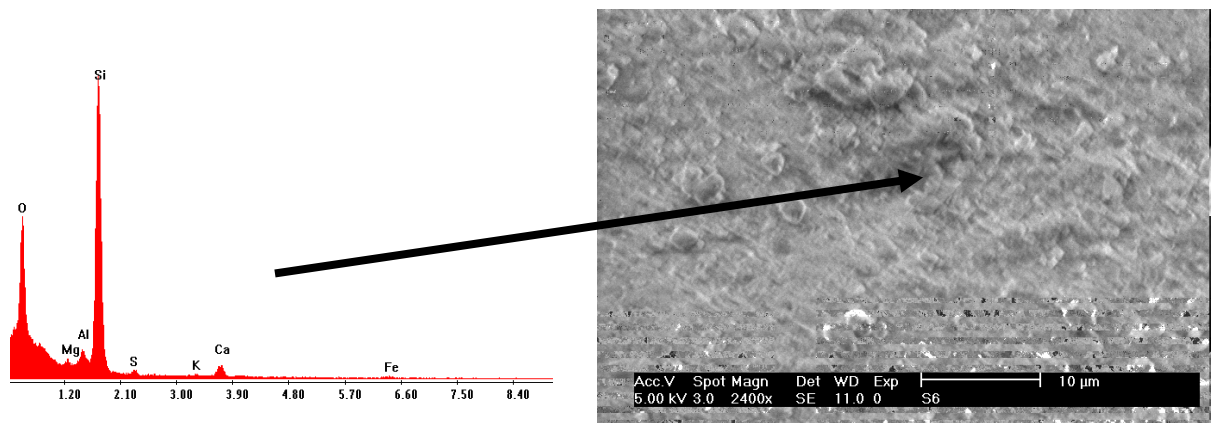


Fig III.12 : Micrographies des échantillons de sable S₆ et S₇ obtenues par MEB et analyse par EDS.

Les résultats de l'analyse par EDS confirment la présence des éléments présents dans les échantillons de sable et spécifiquement le silicium avec un pourcentage massique très important. Nous notons aussi la présence des éléments tels que Mg, Al, K, Ca et Fe dans tous les échantillons. Par contre, dans l'échantillon S₇ l'élément calcium est complètement inexistant. Dans l'échantillon S₆ apparaît l'élément soufre, S, et dans l'échantillon S₅ apparaît en plus de l'élément S celui de chlore, Cl et même du titane, Ti.

III.2. Valorisation du sable de l'erg oriental comme matériaux de construction :

III.2.1. Préparation des éprouvettes et choix de sable :

Rappelons que nous avons préparé deux familles d'éprouvettes d'essai cylindriques de béton comme mentionné déjà dans la partie expérimentale. La première famille préparée à partir des échantillons de sable brut ($E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6$ et E_7) et la deuxième préparée à partir de sable après correction (E_{21}, E_{22}, E_{26} et $E_2 + E_6$).

Nous avons essayé de ramener la distribution granulométrique des échantillons de sable naturel (Fig.III.1) à la distribution idéale des sables de béton, en éliminant ou en ajoutant une quantité de sable d'une classe granulométrique dont laquelle on trouve soit un manque ou un excès par rapport à la quantité qui doit exister dans la même classe de distribution granulométrique idéale. La Fig.III.13 montre le placement des sables de notre étude par rapport aux fuseaux admissibles des sables de béton.

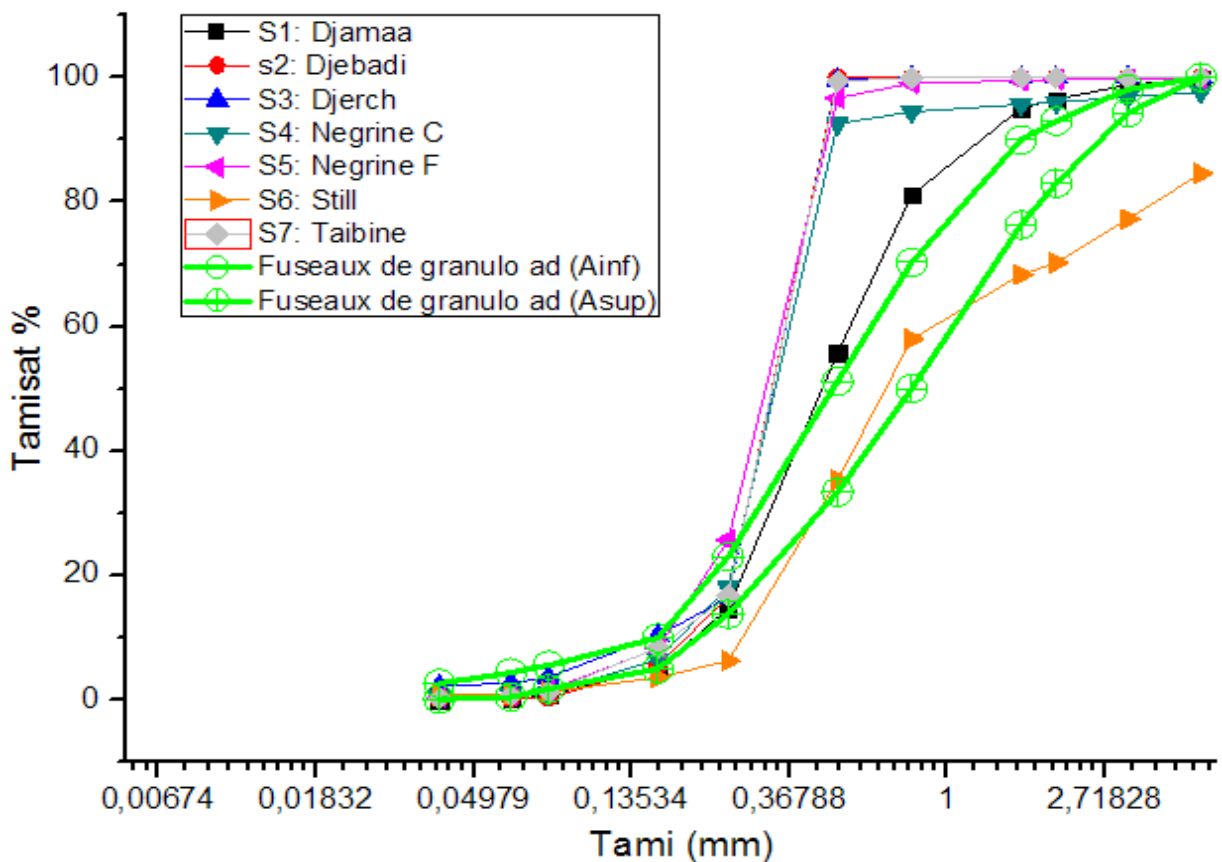


Fig III.13 : Placement des sables de notre étude par rapport aux fuseaux admissibles des sables de béton.

Dans la préparation des éprouvettes nous avons utilisé un gravier naturel (Fig III.14). Ce gravier a une masse volumique de 1339.51 kg/m^3 et un taux de vide de 49.4 %.

La distribution granulométrique de ce gravier est illustrée par la figure III.14.



Fig III.14 : Gravier utilisé dans l'étude.

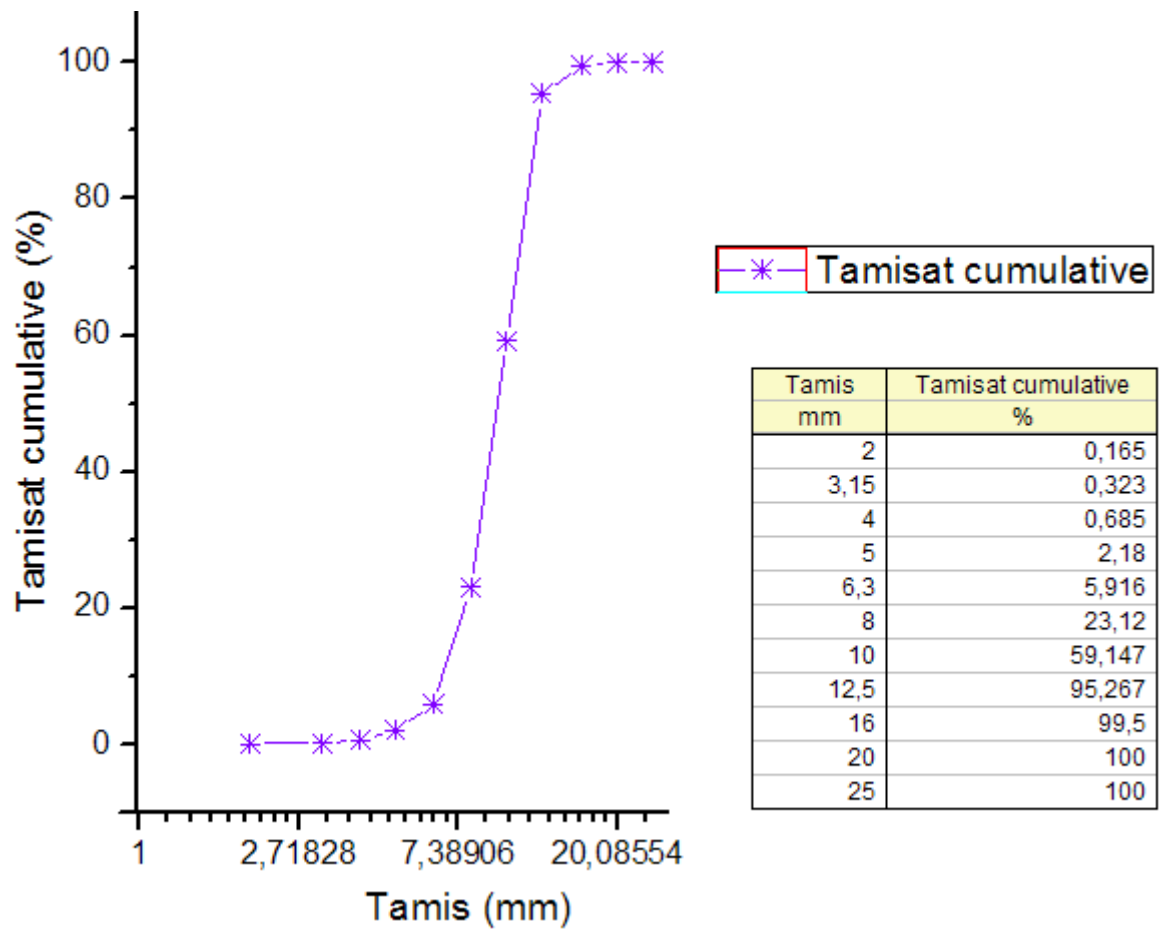


Fig III.15 : Distribution granulométrique du gravier utilisé.

Comme nous le montre ces résultats la taille des gros grains est de 16 mm. Ces caractéristiques de gravier utilisé permettent au sable et à la pâte d'occuper ces vides et de donner un béton avec un minimum de porosité.

III.2.2. Contrôle non destructif :

III.2.2.1. Essai sclérométriques :

Les résistances moyennes à la surface (R_{ms_i}) des différentes éprouvettes de béton sont regroupées dans le tableau III.14. Nous remarquons que pour la première famille d'éprouvettes (E_2 , E_3 , E_6 et E_7) les résistances moyennes à la surface sont identiques et proches à celle de l'échantillon E_1 .

Les valeurs respectives obtenues de (R_{ms_i}) de 33 et 30 MPa des échantillons E_4 et E_5 sont inférieures à celles des autres. Cela est dû probablement à l'existence des grains fins (argiles) présents dans les sables S_4 et S_5 avec des taux élevés. Cela concorde avec les résultats de l'équivalent de sable, ES, et les essais de valeur de bleu de méthylène, VBS.

Tableau III.14 : Résultats de l'essai sclérométriques.

Eprouvette (E_i)	R_{ms_i} (MPa)*
E_1	41
E_2	39
E_3	39
E_4	33
E_5	30
E_6	39
E_7	39
E_{21}	24
E_{22}	29
E_{26}	29
E_2+E_6	31

* R_{ms_i} = **R**ésistance **M**oyenne à la **S**urface de l'éprouvette (E_i).

Nous remarquons que pour la deuxième famille d'éprouvettes (E_{22} et E_{26}) les résistances moyennes à la surface sont aussi identiques et proches à celle de l'échantillon ($E_2 + E_6$). Quant à l'échantillon E_{21} , nous enregistrons la valeur de la résistance moyenne à la surface la plus faible qui est de l'ordre de 24 MPa.

Il est à remarquer qu'il y a une nette différence entre les valeurs des (R_{ms_i}) des deux familles d'éprouvettes. L'écart est dans un certains cas de 10 MPa, ce qui suppose que durant les mesures des résistances des erreurs ont été commises. En effet, nous avons déjà signalé que nous utilisons un scléromètre manuel et qu'à chaque mesure nous réarrangeons l'appareil pour assurer un bon rebondissement de la masselotte. Il se peut donc que nous avons cumulé des erreurs et les valeurs que nous avons obtenues sont plus ou moins justes.

En plus, l'essai sclérométriques des deux familles d'éprouvettes n'a pas été réalisé dans les mêmes temps (temps entre le démoulage et l'essai). En effet, les essais ont été réalisés après 5 et 2 mois des premières et deuxièmes familles d'éprouvettes respectivement.

III.2.2.2. Contrôle par les ondes ultrasonores :

Les vitesses moyennes de propagation du son (V_{ms_i}) dans les différentes éprouvettes de béton et leurs résistances moyennes (R_{m_i}) sont regroupées dans le tableau III.15.

Tableau III.15 : Résultats de l'essai de l'ultrason.

Eprouvette (E_i)	V_{ms_i} (m/s)*	R_{m_i} (MPa)**
E_1	4407	35.2
E_2	4280	32.5
E_3	4249	31
E_4	3848	17.5
E_5	3588	15.2
E_6	4548	36.7
E_7	4223	30.1
E_{21}	4447	31.8
E_{22}	4369	29.2
E_{26}	4385	29.4
$E_2 + E_6$	4452	32.1

* V_{ms_i} : Vitesse Moyenne de propagation du Son dans l'éprouvette E_i (m/s).

** R_{m_i} : Résistance Moyenne de l'éprouvette E_i (MPa).

En comparant les résultats des Fig. II.12 et Fig. II.13 du chapitre II à ceux du tableau III.15, nous pouvons déduire que les vitesses de propagations des ondes ultrasonores des échantillons d'éprouvettes ($E_1, E_2, E_3, E_6, E_7, E_{21}, E_{22}, E_{26}$ et $E_2 + E_6$) se situent entre 4200 et 4500 m/s ce qui permet de conclure que leurs propriétés mécaniques seront acceptables. Par contre, les vitesses de propagation des ondes ultrasonores des éprouvettes E_4 et E_5 sont les plus faibles indiquant ainsi que leurs propriétés mécaniques seront aussi les plus faibles.

III.2.3. Essai destructive (essai de compression ou d'écrasement) :

Rappelons que les différents essais d'écrasement des éprouvettes de béton permettent de mesurer la résistance R ou f_c . Les résultats de ces essais sont illustrés par les Fig.III.16 à Fig.III.18.

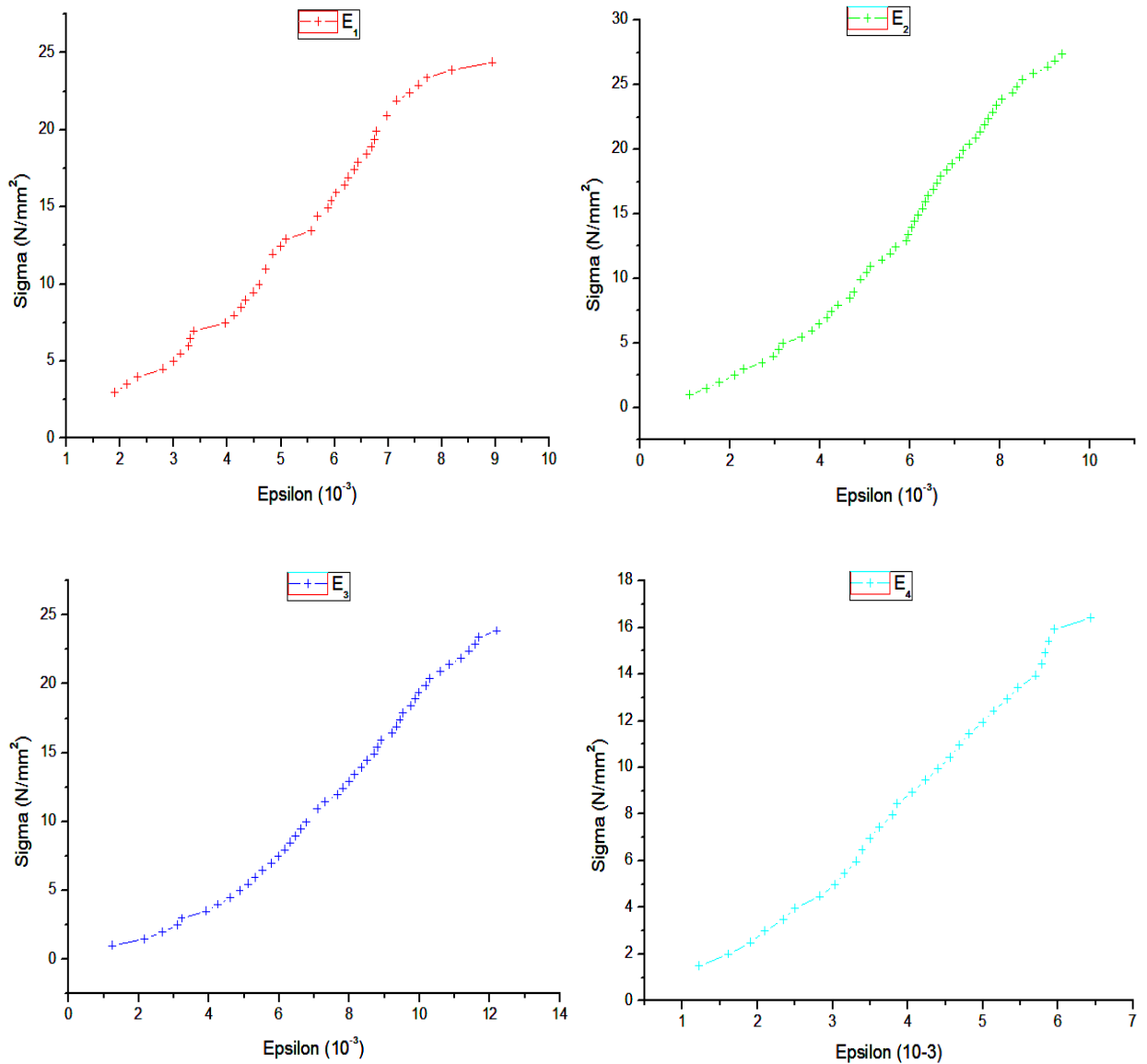


Fig III.16 : Courbe contrainte déformation pour les échantillons (E_1, E_2, E_3, E_4) en compression.

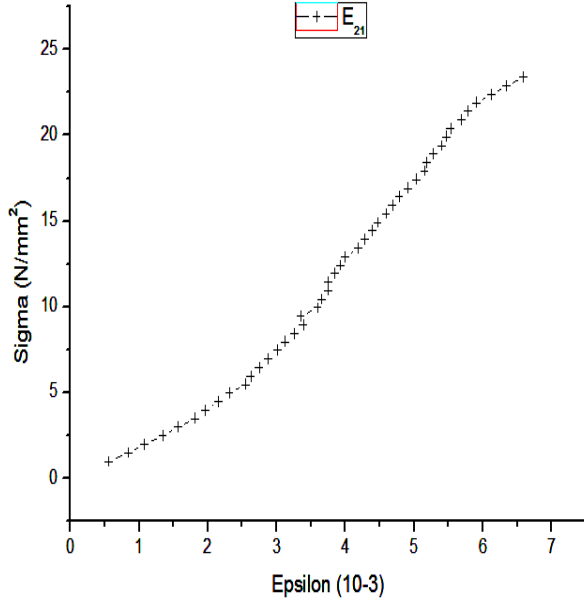
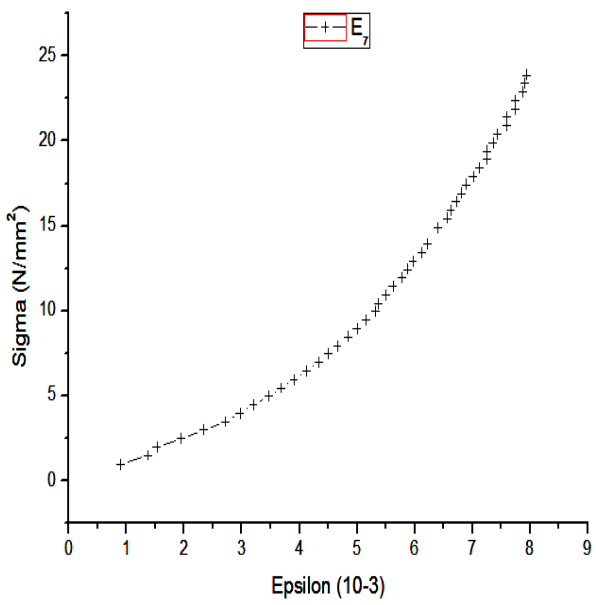
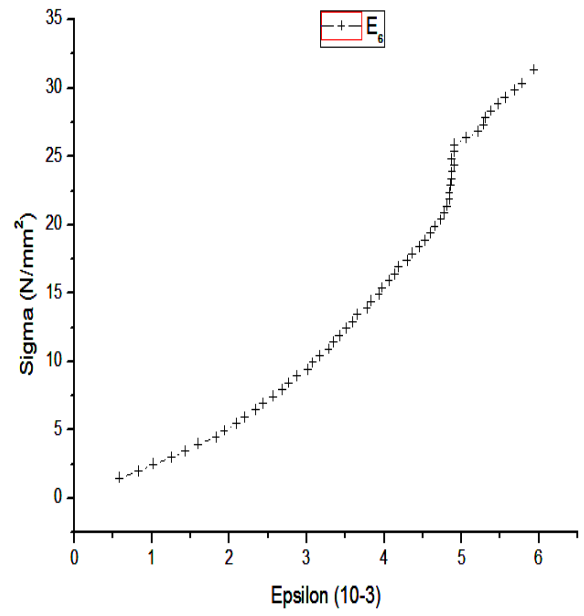
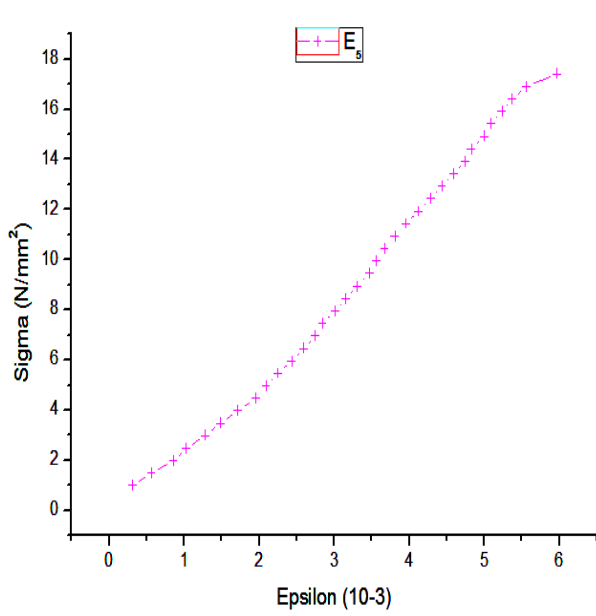


Fig III.17 : Courbe contrainte déformation pour les échantillons (E_5 , E_6 , E_7 , E_{21}) en compression.

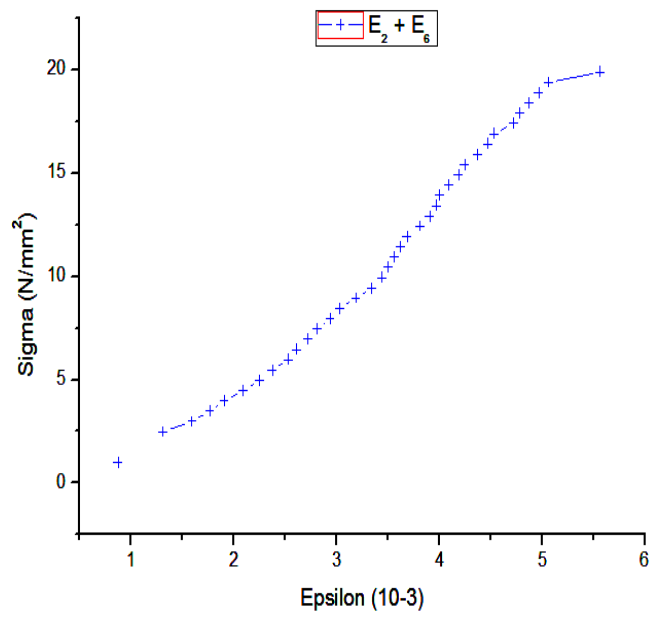
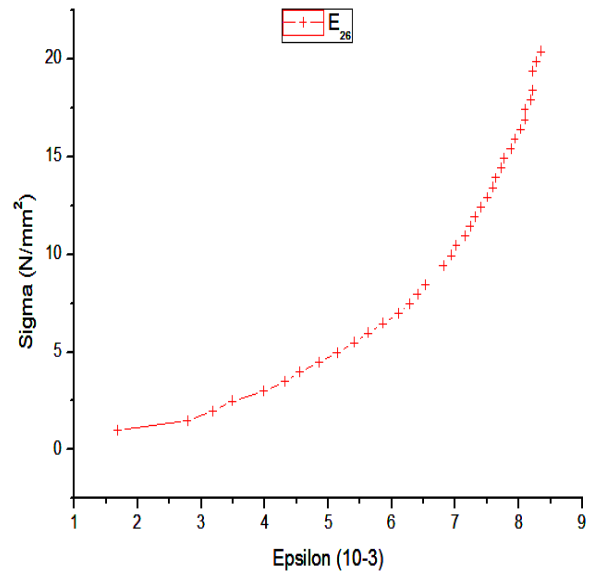
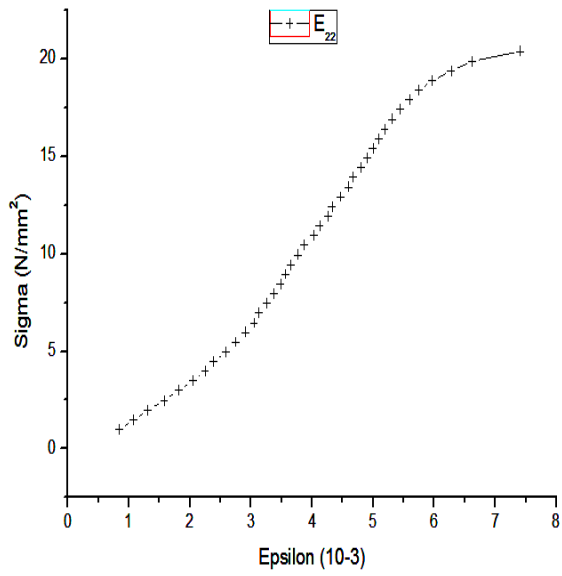


Fig III.18 : Courbe contrainte déformation pour les échantillons (E_{22} , E_{26} , $E_2 + E_6$) en compression.

Toutes les courbes contrainte déformation pour les échantillons de béton étudiés s'élèvent pour atteindre finalement un maximum au moment où la densité de fissures est si élevée qu'elles se rassemblent pour provoquer un effondrement généralisé du matériau. La fissuration commence à environ la moitié de la contrainte maximale. Généralement en compression, une seule fissure de grande dimension n'est pas fatale (alors qu'elle le serait en traction). Les fissures inclinées par rapport à la direction de compression, se propagent de manière stable (elles nécessitent un accroissement progressif de la charge pour se propager plus loin). Elles s'incurvent alors pour partir dans des directions parallèles à l'axe de compression comme le montre la Fig.III.19.

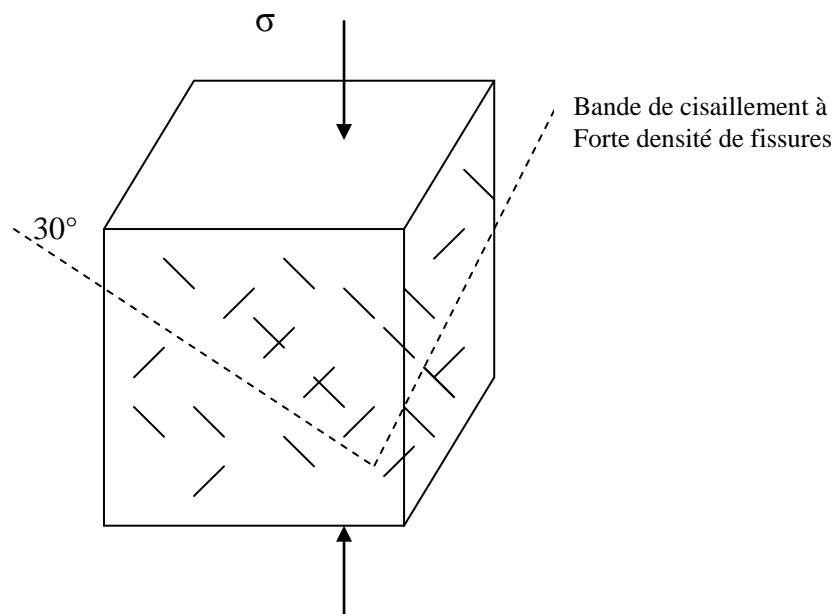


Fig III.19 : Ecrasement en compression d'un bloc de béton, [18].

Le tableau III.16 regroupe ainsi les valeurs des résistances à la compression et les modules d'élasticité des éprouvettes de béton. Sachant que le cas du béton est complexe et qu'en première approximation, les calculs de dimensionnement peuvent être basés sur une résistance moyenne de 30 MPa et un module de Weibull de 12, pourvu que le mélange et la coulée soient correctement faits.

Tableau III.16: Valeurs des résistances à la compression et les modules d'élasticité des éprouvettes de béton.

Eprouvette (E_i)	Résistance à la compression (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
E₁	24.371	3870
E₂	27.354	3950
E₃	23.873	2707
E₄	16.413	3204
E₅	17.047	3448
E₆	31.333	5790
E₇	23.873	4307
E₂₁	23.376	4966
E₂₂	20.392	4558
E₂₆	20.392	5164
E₂+E₆	19.894	4763

En comparant nos résultats par rapport aux conditions idéales de résistance mécanique du béton, nous remarquons les performances de l'échantillon E₆ qui enregistre une valeur de résistance de 31.333 MPa suivi de celui de l'échantillon E₂ avec une valeur de 27.354 MPa. Compte tenu des erreurs de manipulation et les conditions de travail difficiles, nous pouvons considéré que les valeurs de résistance à la compression 24.371, 23.873, 23.873 et 23.376 MPa des échantillons E₁, E₃, E₇ et E₂₁ respectivement sont acceptables. Par contre, pour les valeurs de résistances inférieures ou égales à 20 MPa ne seront pas acceptables dans ces conditions de travail.

↳ Remarque :

Bien que les appareillages sont étalonnées (la presse et le comparateur), mais l'utilisation du carton au lieu des disques en caoutchoucs pour assuré la distribution uniforme des efforts sur les éprouvettes de béton ; et le faite que la presse est manuelle accumule les erreurs qu'on les estimera à 5 %.

Conclusion

Générale

Conclusion générale :

D'après les résultats obtenus dans ce mémoire, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

La technique de granulométrie a permis de classer nos échantillons de sable de l'erg oriental. Tous les sables de notre étude sont bien classés à l'exception de l'échantillon S_6 qui est normalement classé. Selon l'indice Sk , les échantillons de sable S_2 et S_7 sont classés vers les fines et les autres vers les grossiers. Selon la valeur du module de finesse (MF) de 2,10 de l'échantillon S_1 est très proche de 2,2 qui est celle de sable préférentiel, et de 3.11 qui est un peut élever pour S_6 par rapport 2.8 (la limite sup du sable préférentiel).

L'essai de l'équivalent de sable (ES) a permis l'identification des sables S_4 et S_5 les moins propres (25,91%) et les plus propres (99,29 %) des échantillons S_2 , S_7 et S_1 et qui permettent l'utilisation d'un ciment de type portland.

L'essai de valeur au bleu de méthylène (VBS) des échantillons de sable a permis le classement de tous les échantillons dans la catégorie sableux sauf ceux S_4 , S_5 et S_6 dans les limoneux.

La technique de diffraction des rayons X a permis l'identification de la phase quartzuse qui est la plus dominante et représentant plus de 98 % dans tous les échantillons de sable.

Les résultats de l'analyse par EDS confirment la présence des éléments présents dans les échantillons de sable et spécifiquement le silicium avec un pourcentage massique très important et autres tels que Mg, Al, K, Ca et Fe dans tous les échantillons.

La valorisation du sable de l'erg oriental comme matériaux de construction s'est avérée intéressante pour les échantillons S_1 et S_6 , et que sable S_2 aussi peut être utilisé après correction avec d'autre granulats.

Les essais de sclérométrie sur les échantillons de béton à base de différents sables ont permis la détermination des résistances moyennes à la surface (R_{ms_i}). La famille d'éprouvettes (E_2 , E_3 , E_6 et E_7) ont des résistances moyennes identiques et proches de celle de l'échantillon E_1 .

Les essais des ultrasons ont permis de déterminer les vitesses moyennes de propagation du son (V_{ms_i}) dans les différentes éprouvettes de béton et leurs résistances moyennes (R_{m_i}). Il ressort que les vitesses de propagations des ondes ultrasonores des échantillons (E_1 , E_2 , E_3 , E_6 , E_7 , E_{21} , E_{22} , E_{26} et $E_{2+ E_6}$) se situent entre 4200 et 4500 m/s, permettant ainsi des propriétés mécaniques très acceptables.

Les tests de compression ont permis de déterminer les valeurs des résistances à la compression et les modules d'élasticité des éprouvettes de béton. Par rapport aux conditions idéales de résistance mécanique du béton, les performances des échantillons E_6 et E_2 sont à signaler suivis de ceux E_1 , E_3 , E_7 et E_{21} .

En perspective, nous souhaiterons qu'il y'aurait une continuation à l'étude de différents sites de l'erg oriental du sud Algérien et l'amélioration des résultats obtenus par l'utilisation d'autres moyens de caractérisation, et de valorisée ses sables pour des autres applications.

ANNEXE : Fiche techniques des sables étudiées

	S₁	S₂	S₃	S₄	S₅	S₆	S₇
w (%)	2.04	2.01	2.05	2.07	2.02	2.04	2.01
c (%)	76.2	66	75.8	75.9	71.7	77	69.8
n (%)	23.8	34	24.2	24.1	28.3	23	30.2
ρ (kg/m³)	1575.3	1605.2	15.11.8	1512.1	1544.2	1770.1	1574.8
Cu	2.67	1.86	2.33	2.033	2.059	3.36	2.052
Cc	0.96	1.132	1.407	1.152	1.158	0.773	1.285
S₀	1.556	1.227	1.237	1.263	1.294	2.641	1.231
Sk	1.018	0.928	0.994	1.002	1.036	2.305	0.999
Mf	2.10	1.49	1.45	1.66	1.46	3.11	1.47
Span	1.457	1.238	---	---	---	1.562	---
SS (m²/g)	0.013	0.028	---	---	---	0.053	---
ES (%)	93.28	99.29	71.13	29.94	25.91	66.97	96.26
VBS	0.09	0.03	0.06	0.61	0.75	0.33	0.04
TMO (%)	0.138	0.052	0.034	0.009	0.017	0.275	0.533
Sels (%)	0.066	0.105	0.114	0.053	0.111	0.234	0.011
CaCO₃ (%)	0.300	3.174	7.391	0.087	1.348	4.990	0.650
pH	8.15	7.27	7.60	7.62	5.98	8.43	7.99
Rmsi (MPa)	41	39	39	33	30	39	39
Vmsi (m/s)	4407	4280	4249	3848	3588	4548	4223
Rmi (MPa)	35.2	35.2	31	17.5	15.2	36.7	30.1
fc₂₈ (MPa)	24.37	27.35	23.87	16.41	17.047	31.33	23.876
E (MPa)	3870	3950	2707	3204	3448	5790	4307

Références

Bibliographiques

- [1]. A. TAFRAOUI, 2007. Caractérisation et valorisation du sable de l'erg occidental Algérien dans le BUHP et l'outillage, thèse de doctorat. USTHB ; 2007.
- [2]. A. TAFRAOUI, 2009. Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie) par TAFRAOUI Ahmed, thèse de doctorat. Toulouse ; 2009.
- [3]. C. Blanchard. Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués, thèse de doctorat. INSA Lyon, 2000.
- [4]. C. Plumelle. Identification et classification des sols Géotechnique, 2002.
- [5]. CYR et LERAU, Géotechnique et mécanique des sols par Martin CYR et Jacques LERAU, INSA Toulouse, département de Génie Civil, Ingénierie de la Construction : 2006.
- [6]. DELGOVE et HOCHART, Granulométrie laser : application aux sucres et produits de sucrerie par R. DELGOVE, J.M. HOCHART, 8th Symposium-Reims : 2001.
- [7]. F. Marot. Caractérisation et traitement des sédiments de dragage contenant des pollutions métalliques. Paris : BRGM, 1998.
- [8]. F.Z. AZZOUZ. Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen, thèse magistère. Génie civil ; 2006.
- [9]. M. PAREZ et All. Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation, Normalisation Française ; [NF P 94-057 1992] : Mai 1992.
- [10]. G. DREUX et J. FESTA, Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième édition 1998, troisième tirage 2007, édition EYROLLES, Paris.
- [11]. G. INCORVAIA. Etude des facteurs potentiellement limitant de la répartition des fennecs, fennecus zerda, dans le sud Tunisien. Thèse de doctorat ; UNWERSITE CLATJDE-BERNARD - LYON I (Médecine - Pharmacie), 2005.

- [12]. J. BEAUCHAMP. Les argiles par Jacques BEAUCHAMP ;
http://www.normalesup.org/~clanglois/Sciences_Terre/Argiles/Argiles2.html
- [13]. J. DEFERNE. Presque tout sur le Quartz, juillet 2007.
- [14]. J.P. MAGNAN, Description, identification et classification des sols, Technique de l'ingénieur ; C 208.
- [15]. K. PYE and H. TSOAR, 2009. Aeolian Sand and Sand Dunes by Kenneth PYE and Haim TSOAR Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [16]. M. DERRUAU. Les formes du relief terrestre (Notions de géomorphologie),
Edition Masson, Paris, 1986.
- [17]. M. COSTE et All. Le module de finesse d'un sable de béton, Normalisation française ; [NF P 18-540] : Octobre 1993.
- [18]. M.F. ASHBY et R.R.H. JONES, Matériaux, microstructure et mise en œuvre,
Ed. DUNOD, Paris : 1991.
- [19]. M. KRETZ et All. Essai pour béton durci ; Résistance à la compression des
éprouvettes, Normalisation Européenne ; [NF EN 12390-3] : Février 2003.
- [20]. M. MAINGUET et F. ELBAZ, 1986. Deciphering wind directions from dune
orientations in space images of deserts and semiarid lands by Monique M.
MAINGUET and Farouk ELBAZ. Nairobi, Kenya. 1986
- [21]. M.N. OUDJIT et O. ZORKANE. Travaux pratique de béton, faculté de génie
civil département de matériaux et structure, 2010.
- [22]. M. PAREZ et All. Analyse granulométrique des sols, Méthode par
sédimentation, Normalisation Française ; [NF P 94-057 1992] : Mai 1992.

- [23]. M. PARRIAUD et all. Analyse granulométrique par tamisage, Normalisation Française ; [P 18-560 1990] : Septembre 1990.
- [24]. M. PARRIAUD et all. Équivalent de sable, Normalisation Française ; [P 18-598 1991] : Octobre 1991.
- [25]. PASCAL. P. Nouveau traité de chimie minéral, Revue de Métallurgie, Tome 8F2, 1994.
- [26]. PETTII JOHNE F.J et all. Sand and sand stone, springer-verlag New york, Paper back, 1987.
- [27]. R. L. FOLK, W. C. WARD A study of significant of grain size parameters, J. Sediment. brazos River bar, Petrol; 1957.
- [28]. S. KRIBI. Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage, thèse de doctorat. INSA Lyon, 2005.
- [29]. V. PHOUMMAVONG. Cours en ligne : Matériaux de Construction par Vimane PHOUMMAVONG. Université Nationale du Laos ; 2003.
- [30]. WEYDERT P. Étude sédimentologique d'une coupe de la partie médiane du grand récif de Tuléar (SW Madagascar), Téthys 1, 1971.

Liste des figures :		
Fig I.1	Organigramme non exhaustif des matériaux granulaires en mécanique des sols	10
Fig I.2	Silicium pure	12
Fig I.3	Diagramme d'équilibre de SiO ₂ en fonction de la température et de la pression	15
Fig I.4	Tétraèdre de silicium et d'oxygène [SiO ₄] ⁻	16
Fig I.5	Photographies au Microscope Électronique à Balayage de quelques types d'argiles	16
Fig I.6	Distributions des Ergs dans la grande Sahara d'Afrique	18
Fig I.7	Position de l'Erg Orientale selon Google Map	19
Fig I.8	Modèle conceptuel d'un erg de migration, montrant l'ordre sédimentaire stratigraphique de l'Erg	19
Fig I.9	Les Barkhanes	21
Fig I.10	Les dunes paraboliques	21
Fig I.11	Fuseaux proposés pour la granularité des sables à béton	27
Fig I.12	Variation de la résistance en compression en 28 jours en fonction de G/S et pour 3 plasticités différentes Béton 350 kg de ciment/m ³ , granularité continue D = 25 mm	29
Fig I.13	Les modes de ruptures des éprouvettes cylindriques de béton en compression	33
Fig II.1	Les tamis et les refus sur les différents tamis	36
Fig II.2	Dispositif expérimentale pour l'essai de ES	41
Fig II.3	L'essai d'équivalent de sable	43
Fig II.4	Essai au bleu de méthylène sur papier filtre	44
Fig II.5	Sac de ciment utilisé pour la préparation de béton dans notre étude	47
Fig II.6	Les couleurs des échantillons des sables sélectionnés à étudier	48
Fig II.7	Méthode d'échantillonnage sur quelques sites de prélèvement	49
Fig II.8	Les sites de prélèvement selon Google Map	50
Fig II.9	Les étapes de préparations des éprouvettes d'essais de compression	51
Fig II.10	Appareil de scléromètre avec ces différentes parties	53
Fig II.11	Variation de la résistance en fonction de la valeur de rebondissement	53
Fig II.12	Relation entre la vitesse du son (m/s) et la résistance en compression f _c (MPa)	54
Fig II.13	Abaque permettant d'évaluer la résistance d'un béton en combinant l'indice sclérométriques et la vitesse du son	54
Fig II.14	Appareil de contrôle ultrasonore et ses différentes parties	56
Fig II.15	Essai de compression d'une éprouvette d'un échantillon de béton à partir de sable de l'erg	57
Fig III.1	Courbes de distribution des fractions granulométriques sur une échelle semi logarithmique	61

Fig III.2	Les types des courbes granulométrique	61
Fig III.3	Exemple d'un sol bien gradué	62
Fig III.4	Distribution granulométrique par laser de l'échantillon de sable S ₁	65
Fig III.5	Distribution granulométrique par laser de l'échantillon de sable S ₂	65
Fig III.6	Distribution granulométrique par laser de l'échantillon de sable S ₆	66
Fig III.7	Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de sable S ₁ et S ₂	70
Fig III.8	Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de sable S ₃ et S ₄	71
Fig III.9	Spectres de diffraction des rayons X des échantillons de sable S ₅ , S ₆ et S ₇	72
Fig III.10	Micrographies des échantillons de sable S ₁ et S ₂ obtenues par MEB et analyse par EDS	73
Fig III.11	Micrographies des échantillons de sable S ₃ , S ₄ et S ₅ obtenues par MEB et analyse par EDS	74
Fig III.12	Micrographies des échantillons de sable S ₆ et S ₇ obtenues par MEB et analyse par EDS	75
Fig III.13	Placement des sables de notre étude par rapport aux fuseaux admissibles des sables de béton	76
Fig III.14	Gravier utilisé dans l'étude	77
Fig III.15	Distribution granulométrique du gravier utilisé	77
Fig III.16	Courbe contrainte déformation pour les échantillons (E ₁ , E ₂ , E ₃ , E ₄) en compression	80
Fig III.17	Courbe contrainte déformation pour les échantillons (E ₅ , E ₆ , E ₇ , E ₂₁) en compression	81
Fig III.18	Courbe contrainte déformation pour les échantillons (E ₂₂ , E ₂₆ , E ₂ + E ₆) en compression	82
Fig III.19	Ecrasement en compression d'un bloc de béton	83

Liste des tableaux :		
Tableau I.1	Dénomination d'un sol selon la granularité	11
Tableau I.2	Polymorphisme de la silice	15
Tableau I.3	Désignations et classement des sols selon le teneur en carbonates de calcium	17
Tableau I.4	Les principales qualités des bétons en fonction de leur G/S et de leur granularité continue ou discontinue	28
Tableau I.5	Désignation des bétons selon la résistance à la compression	32
Tableau I.6	Notation des bétons selon l'ouvrabilité	32
Tableau II.1	Evolution de la résistance minimale garantie des bétons avec le ciment portland CPJ-CEM II/A 32.5	47
Tableau III.1	Les teneurs en eau des différents échantillons de sable	59
Tableau III.2	Taux de porosité, compacité et la masse volumique des différents échantillons de sable	59
Tableau III.3	Distribution granulométrique des sables	60
Tableau III.4	Qualificatif de la granularité en fonction des facteurs Cu et Cc	62
Tableau III.5	Valeurs des facteurs d'uniformité de Hazen (Cu) et de courbure (Cu)	62
Tableau III.6	Degré de classement d'un sédiment	63
Tableau III.7	les modes d'asymétrie du graphe granulométrique par rapport à la médiane	63
Tableau III.8	Valeurs des indices So et Sk des différents échantillons de sable	64
Tableau III.9	Valeurs des modules de finesse (MF) des différents échantillons de sable	64
Tableau III.10	Les résultats extraits des courbes granulométriques par laser	66
Tableau III.11	Valeurs de l'équivalent de sable (ES) des échantillons de sable	67
Tableau III.12	Valeurs de l'essai de valeur au bleu de méthylène (VBS) des échantillons de sable	67
Tableau III.13	Taux de matières organiques (MO), de sels, de carbonate et pH des échantillons de sable	68
Tableau III.14	Résultats de l'essai sclérométriques	78
Tableau III.15	Résultats de l'essai de l'ultrason	79
Tableau III.16	Valeurs des résistances à la compression et les modules d'élasticité des éprouvettes de béton	84

ملخص البحث :

يتعلق الأمر بدراسة الخصائص الفيزيائية و الكيميائية لرمال العرق الشرقي الجزائري الكبير. لذلك قمنا بتحليل سرعة عينات مستعملين عدة تقنيات منها أشعة اكس ومجهر المسح الالكتروني و التحليل الحبيبي بالليزر و بالغرلة. استعملنا أيضا و طريقتي حساب مكافئ الرمل و قيمة ازرق المثيلين كما استعملنا كذلك تقنية تحليل طيف طاقة التشتت. عينات الرمل السريعة المستعملة أخذت من سرعة نواحي مختلفة من العرق الشرقي الجزائري الكبير. النتائج المحصلة بينت أن عينات الرمل المأخوذة لها عدة خصائص ومميزات مختلفة. كل ذلك يمكن لبعضها ان يستخدم في الخرسانة و قد قمنا بتجارب منها الهدامة و غير الهدامة لنرى مدى فعاليتها كمادة بناء.

Résumé :

Il s'agit de la caractérisation physico-chimique du sable de l'erg oriental algérien par différentes techniques d'analyse à, la DRX, le MEB, la granulométrie à laser et par tamisage, les méthodes d'équivalent de sable (ES) et la valeur au bleu de méthylène (VBS) et la spectroscopie d'énergie dispersive (EDS). Sept échantillons de sable de différents sites de l'erg ont été utilisés. Les résultats obtenus montrés que les échantillons de sable ont différentes compositions chimiques et comportements. Tous ce la a permis d'utiliser quelques uns pour fabriquer des bétons et on effectuée des essais destructive et non destructive pour valoriser ces sables comme matériaux de constricton.

Abstract :

Algerian sand issued of the erg oriental was characterized by some physico-chemical techniques as DRX, MEB and EDS. The particle size distribution was determined by grain seizer laser and sieving method. The sand equivalent (ES) and blue methylene value (VBS) methodes were also used in this study. Seven sandle of sand have different chemical compositions and behaviours. All this allowed it to use some to manufacture concretes and one carried out tests destructive and nondestructive to develop these sands like materials of constricton.