

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Civil



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du diplôme de master
de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

**Impact des sables éoliens sur les
caractéristiques physiques et mécaniques
des mortiers**

Présenté par :

M^r LOUNICI Younes

Devant le jury composé de :

Mr. KAHIL Amar

Professeur à l'UMMTO

Président.

Mr. BOUDLAL Omar

Maitre de conférences à l'UMMTO

Examineur.

Mr. KHELIL Nacim

Maitre de conférences à l'UMMTO

Encadrant.

Promotion : 2024/2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon encadrant, **Monsieur KHELIL Nacim**, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité constante tout au long de ce projet.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance aux membres du jury, **Mr KAHIL Amar** et **Mr BOUDLAL Omar**, pour leur présence, leur attention et les remarques constructives formulées lors de la soutenance. Ces observations ont enrichi ce travail et contribué à son évaluation.*

Je remercie également l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil pour la qualité de l'enseignement dispensé, la rigueur de l'encadrement et l'engagement manifesté tout au long de ma formation universitaire.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux responsables et au personnel du laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, en particulier **Mr. BOUHERRAOUA** et **Mme MEDJBAR**, pour la précieuse contribution apportée à la réalisation de la partie expérimentale de ce travail. Le soutien constant et l'expertise technique dont ils ont fait preuve ont grandement facilité mes démarches, et je leur en suis sincèrement reconnaissant.*

Mes remerciements s'adressent enfin à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire, que ce soit par un appui technique, un soutien moral ou une aide logistique.

Dédicace

Je dédie ce travail

*À celle qui a patiemment attendu les fruits de mon éducation et de mon dévouement, **ma mère.***

*À celui qui a transformé les nuits en jours pour me garantir les meilleures conditions de réussite, **mon père.***

À mes frères, pour votre soutien indéfectible et les moments de bonheur partagés. Vous avez toujours su me motiver et me faire sourire dans les épreuves. Merci d'avoir été mes compagnons tout au long de cette aventure.

*À mes amis, surtout **Karim**, qui m'ont accompagné dans les hauts comme dans les bas. Vos rires, votre solidarité et votre loyauté ont été ma force. Merci pour ces souvenirs inestimables.*

LOUNICI Younes

Liste des figures

Figure I-1 : Situation géographique des ergs de l'Algérie [2]	3
Figure I-2 : Illustration d'un sable.....	4
Figure I-3 : le sable roulé siliceux.....	6
Figure I-4 : Les sables de concassages.....	7
Figure I-5 : le sable de dune	7
Figure I-6 : La dune bordière.....	8
Figure I-7 : La dune du désert.....	9
Figure I-8 : Les formes de dunes [11].....	10
Figure I-9 : Courbes granulométriques de trois sables de dune de grand Sahara [13] [14] ...	11
Figure I-10 : Analyse granulométrique du sable de dune. [15]	12
Figure I-11 : Relation entre la résistance à la compression des bétons sans fibres et les rapports de remplacement du sable de dune [24].	19
Figure I-12 : Relation entre la résistance à la compression des bétons avec fibres et les taux de remplacement du sable de dune [24].	19
Figure I-13 : Relation entre la résistance à la traction par fendage des bétons sans fibres et les rapports de remplacement du sable de dune [24].	21
Figure I-14 : Relation entre la résistance à la traction f par fendage des bétons avec fibres et les rapports de remplacement du sable de dune [24]......	21
Figure I-15 : Résultats des essais de résistance à la compression [26]	25
Figure I-16 : Résultats des essais de résistance à la flexion [26].....	25
Figure I-17 : Résistance à la compression des mortiers durcis en conditions standard et en conditions d'autoclavage [28].....	27
Figure I-18 : Résistance des différents mélanges sous cure en autoclave et cure normale [29].	28
Figure I-19 : Affaissement des bétons en fonction du rapport sable de dune/grain fin [31]...30	30
Figure I-20 : Effet de la teneur en sable de dune sur la maniabilité du béton [31].....	31
Figure I-21 : Résultats du temps d'écoulement et de la masse volumique apparente du mortier frais [33].	32
Figure I-22 : Relation entre le pourcentage d'absorption d'eau et les taux de substitution en sable de dune sans fibres d'acier [24].....	33
Figure I-23 : Relation entre l'absorption et les taux de substitution en sable de dune avec fibres d'acier [24].	34
Les différentes caractéristique chimiques, minéralogiques, physiques, telles que fournies par la fiche technique des fabricants sont montrer dans la figure II-1.	36
Figure II-1 : Caractéristiques techniques du ciment utilisé.	37
Figure II-2 : Fumée de silice condensée utilisée.	38
Figure II-3 : chaux hydratée utilisée.	38
Figure II-4 : Sable de dune de Touggourt (a) et sable de dune de Bou-Sâada (b).....	39
Figure II-5 : Sable de carrière concassé	39
Figure II-6 : Tamiseuse électrique.	40
Figure II-7 : Courbes Granulométriques des différents sables.	42
Figure II-8 : Essai de la détermination de la masse volumique apparente.....	45
Figure II-9 : Essai de détermination de la masse volumique absolue.....	46

Figure II-10: Illustration de l'appareillage de mesure de l'E.S.	47
Figure II-11: Essai de l'Équivalent de Sable tel que mené au niveau du laboratoire béton-UMMTO.	49
Figure II-12: Principe de la confection des mortiers.	50
Figure II-13: Mesure de la vitesse ultrasonore.	55
Figure II-14: Éprouvettes cubiques utilisées pour l'absorption.....	57
Figure II-15: Test de résistance à la flexion.	57
Figure II-16: Principe de l'essai de flexion 3 points.....	58
Figure II-17 : Test de résistance à la compression.....	59
Figure III-1 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de Touggourt	60
Figure III-2 : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de Touggourt.	61
Figure III-3: Absorption d'eau des mortiers à base de sable de Touggourt.....	61
Figure III-4: Vitesse ultrasonore des mortiers à base de sable de Touggourt.....	62
Figure III-5 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de Bou-Sâada.....	63
Figure III-6 : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de Bou-Sâada.	63
Figure III-7: Absorption d'eau des mortiers à base de sable de Bou-Sâada.....	64
Figure III-8. Vitesse ultrasonore des mortiers à base de sable de Bou-Sâada.....	65
Figure III-9: Comparatif des résistances à la compression des mortiers à base de sable de Bou-Sâada et Touggourt	65
Figure III-10 : Comparatif des résistances à la traction des mortiers à base de sable Bou-Sâada et Touggourt.....	66
Figure III-11: Comparatif des taux d'absorption des mortiers à base de sable Bou-Sâada et Touggourt.....	67
Figure III-12 : Comparatif des vitesses ultrasonores des mortiers à base de sable Bou-Sâada et Touggourt.....	67
Figure III-13: Résistance à la compression des mortiers à base de sable Touggourt et de fumée de silice.....	68
Figure III-14: Courbe de résistance à la traction des mortiers à base de sable Touggourt et de fumée de silice.....	69
Figure III-15: Taux d'absorption des mortiers à base de sable de Touggourt et de fumée de silice.....	70
Figure III-16: Vitesses ultrasonores des mortiers à base de sable Touggourt et de fumée de silice.....	71
Figure III-17: Résistance à la compression des mortiers à base de sable Bou-Sâada et de fumée de silice.....	71
Figure III-18: Résistance à la traction des mortiers à base de sable de Bou-Sâada et de fumée de silice	72
Figure III-19 : Taux d'absorption des mortiers à base de sable Bou-Sâada et de fumée de silice.....	73
Figure III-20: Vitesse ultrasonore des mortiers à base de sable de Bou-Sâada et de fumée de silice.....	73
Figure III-21: Comparatif des résistances à la compression des mortiers à base de sable de Touggourt.....	74
Figure III-22: Comparatif des de résistances à la traction des mortiers à base de sable de Touggourt.....	75
Figure III-23: Comparatif des absorptions des mortiers des mortiers à base de sable de Touggourt.....	76

Figure III-24: Comparatif de l’ultrason des mortiers des mortiers à base de sable de Touggourt.....	77
Figure III-25: Comparatif des de résistances à la compression des mortiers à base de sable de Bou Sâada	78
Figure III-26: Comparatif des de résistances à la des mortiers à base de sable de Bou Sâada	79
Figure III-27 : Comparatif des absorptions des mortiers des mortiers à base de sable de Bou Sâada.....	79
Figure III-28 : Comparatif de l’ultrason des mortiers à base de sable de Bou Sâada	80

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs [15].....	12
Tableau I-2 : Caractéristiques du sable de dune [15].....	12
Tableau I-3 : caractéristiques physico-chimiques des sables dunaires de différentes région .	14
Tableau I-4 : les différentes propriétés physiques et granulométriques du sable	15
Tableau I-5 : Rapports de mélange par mètre cube avec ajout de fibres d'acier [24].....	18
Tableau I-6: Rapports de mélange par mètre cube sans fibres d'acier [24].....	19
Tableau I-7 : Les différentes compositions du béton [25].....	23
Tableau I-8 : Les résultats des essais mécaniques à 28j [25]	23
Tableau I-9 : Composition du mélange du mortier [26]	24
Tableau I-10 : Proportions de mélange des échantillons de mortier [28]	26
Tableau I-11 : Proportion de mélange du béton [29].....	27
Tableau I-12 : Dosages des mélanges de béton [31].....	29
Tableau II-1: Analyse granulométrique par tamisage du sable concassé (SC).	41
Tableau II-2: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune de Touggourt (SDT).	41
Tableau II-3: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune Bou-Sâada (SDB)...	42
Tableau II-4: Module de finesse du sable.	43
Tableau II-5: Résultats de module de finesse des sables.	44
Tableau II-6: masses volumiques apparentes des sables de dune et concassé	45
Tableau II-7: masses volumiques absolue des sables de dune et concassé.....	46
Tableau II-8: Les valeurs d'équivalent de sable indiquant la nature et qualité du sable.	48
Tableau II-9: Résultat de l'essai E.S.....	48
Tableau II-10: Masses volumiques apparentes et spécifiques et équivalent de sable utilisé. .	49
Tableau II-11: Formulation des éprouvettes prismatiques avec et sans FS	51
Tableau II-12: Formulation des éprouvettes prismatiques avec CH et FS.	52
Tableau II-13: Formulation des éprouvettes cubiques avec et sans FS.	52
Tableau II-14: Formulation des éprouvettes cubiques avec CH et FS.	53
Tableau II-15: Classification de la qualité des bétons selon la vitesse ultrasonore.....	56

Liste de notation et indice

SC : sable concassé

SD1 : sable Touggourt

SD2 : sable Bou Sâada

FS : Fumée de silice

CH : chaux hydratée

MT : mortier témoin

MFS : mortier à base de fumée de silice

M-CH-FS : mortier a base de fumée de silice et de chaux hydratée

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie, en raison de son vaste territoire saharien, est largement couverte par des formations sableuses d'origine éolienne, notamment les dunes. Ces sables éoliens, issus de la désagrégation et du transport des particules par le vent, représentent une ressource naturelle abondante, couvrant près de 60% de la superficie nationale, avec des épaisseurs de couches sableuses pouvant atteindre plusieurs mètres.

Les sables éoliens algériens se caractérisent par une granulométrie moyenne à fine, des grains souvent arrondis et dépolis, résultat des nombreux chocs subis lors de leur transport par le vent. Cette morphologie particulière confère à ces sables une qualité supérieure, particulièrement en termes de propreté et de pureté, avec notamment une forte teneur en silice, ce qui les rend intéressants pour diverses applications industrielles et de plus en plus dans le domaine de la construction.

Plusieurs études ont montré que les mortiers à base de sables concassés présentent des résistances à la compression et à la flexion plus élevées que ceux formulés avec des sables naturels éoliens. De plus, la porosité, l'absorption d'eau peuvent également être affectées par la nature du sable utilisé, influençant ainsi la durabilité et la performance globale des mortiers.

L'optimisation des formulations, notamment par l'ajout d'additifs tels que la fumée de silice ou la chaux hydratée, permet de compenser certains inconvénients liés aux sables éoliens, en améliorant la compacité et la résistance des mortiers. Ainsi, la valorisation des sables éoliens dans les mortiers représente une voie prometteuse pour valoriser durablement cette ressource naturelle sous-exploitée tout en répondant aux exigences aussi bien physiques que mécaniques des matériaux de construction.

L'objectif du présent travail est d'étudier l'effet de l'incorporation de sables de dunes d'origines différentes dans des formulations de mortiers, afin de déterminer dans quelle mesure ces sables éoliens peuvent être valorisés dans les mortiers classiques (mortiers normalisés). Par ailleurs, dans le cas où leur utilisation limiterait les performances mécaniques, nous chercherons à évaluer si l'ajout d'additions à action pouzzolanique telles que la fumée de silice et la chaux hydratée peut compenser ces effets et améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers.

Ce présent mémoire se divise en trois chapitres :

Dans le chapitre 1, nous nous sommes intéressés à la description et à la valorisation du sable de dune, en tant que matériau local abondant, dans la fabrication des matériaux cimentaires. Ce type de sable présente une granulométrie particulière qui influence significativement les propriétés du béton et du mortier, tant à l'état frais (ouvrabilité, maniabilité) qu'à l'état durci (résistance mécanique et durabilité). Son utilisation constituerait donc une alternative économique et environnementale, notamment dans les régions sahariennes où les ressources classiques en granulats (sable alluvionnaire et de concassé de carrière) sont limitées.

Dans le chapitre 2, il est question de la présentation détaillée des matériaux employés dans le cadre de ce travail de recherche en laboratoire, notamment le ciment, les sables (de dune et concassé), l'eau de gâchage ainsi que les différentes additions minérales et adjuvants. Les caractéristiques physiques de ces matériaux ont été déterminées conformément aux normes en vigueur. Par ailleurs, la méthodologie expérimentale adoptée, elle aussi normalisée, est décrite en précisant les formulations de mortier testées et les conditions de mise en œuvre des essais.

Dans le chapitre 3, nous exposerons les résultats issus des différents essais réalisés sur les mortiers élaborés à base de sable de dune à différents dosages, seul ou en mélange avec du sable concassé. Les performances obtenues, notamment en termes de résistance à la compression, d'absorption d'eau (porosité) et de maniabilité, sont analysées afin d'évaluer l'influence du sable de dune, notamment le module de finesse du granulaire, sur le comportement global du mortier. Cette analyse vise à déterminer la faisabilité technique de son utilisation dans les matériaux de construction et à identifier les conditions optimales de formulation permettant son usage.

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1 Introduction

Les sables de dune sahariens ont été l'objet de nombreuses campagnes de reconnaissance et d'identification scientifique depuis plusieurs décennies. Dès les années 1950, des investigations menées dans le Sahara algérien ont révélé l'existence de zones minéralogiques homogènes [1]. Effectivement, dans ces vastes étendues désertiques, les sables présentaient des caractéristiques minéralogiques et granulaires quasi similaires.

Récemment, une mission similaire dans certaines régions du sud algérien, entreprise dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, a confirmé cette similarité des caractéristiques des sables de dune. Le sable de dune peut être considéré comme une source quasi inépuisable de matériau. L'utilisation et l'exploitation futures de ce type de sable constituent désormais une préoccupation majeure pour les chercheurs et intéressent divers domaines tels que la microélectronique, le génie civil et le génie mécanique. Ses applications et son exploitation sont étroitement liées à sa teneur en silice ainsi qu'à la taille, la forme et la nature de ses grains.

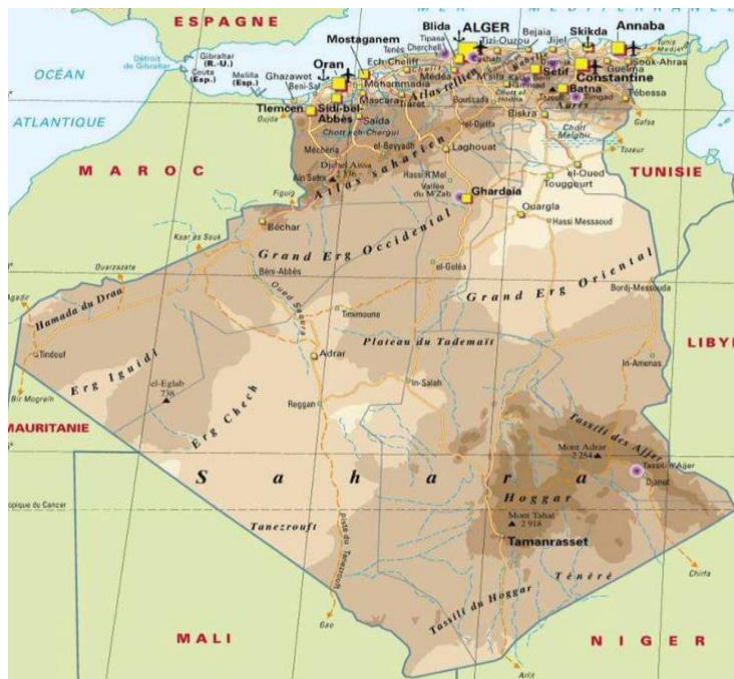


Figure I-1 : Situation géographique des ergs de l'Algérie [2]

Dans le présent chapitre, nous nous sommes intéressés à la description et à la valorisation de ce type de sable, c'est-à-dire le sable de dune, dans la fabrication des matériaux

cimentaires, car il influence à la fois les propriétés du béton à l'états frais et à l'états durci (résistance mécanique et durabilité) compte tenu de sa granulométrie notamment.

I.2 Définition du sable

Le sable est une matière solide granulaire constituée de petites particules minérales provenant de la désagrégation de roches d'origine minérale ou organique. La taille des grains de sable est comprise généralement entre 0,063 mm et 2 mm selon la classification granulométrique. Ces particules peuvent être composées principalement de quartz, mais aussi de feldspath, mica, grenat, et d'autres minéraux [3].



Figure I-2 : Illustration d'un sable

I.2.1 Origine des sables

Les sables ont pour origine soit d'une décomposition chimique, soit d'une fragmentation mécanique des roches, suivie d'un transport qui détermine leurs propriétés physico-chimiques. [3]

Les sables disponibles résultent, en effet, d'un processus souvent complexe combinant érosion et sédimentation. Ce processus inclut, à divers degrés, la décomposition in situ des roches suivie d'un transport principalement fluvial, parfois éolien. Les mécanismes qui transforment la roche massive en sable sont suffisamment sévères pour éliminer la majorité des minéraux, ne laissant subsister que les plus résistants. Ainsi, la majeure partie des formations sableuses est constituée de quartz, dont la proportion augmente à mesure que la taille des grains diminue. En particulier, la fraction granulométrique comprise entre 0,2 mm et 0,5 mm est généralement composée à plus de 75 % de quartz.

Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent [3]

- Grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau).
- Grains ronds et mats (déplacement par le vent).
- Grains non usés.

I.2.2 Classification des sables

Les sables peuvent se classer selon plusieurs paramètres notamment :

I.2.2.1 Granulométrie

Elle permet de séparer les sables en trois catégories

Sable fin : plus de 75 % des particules ont une taille comprise entre 80 μm et 0,5 mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des matériaux granulaires plus grossiers.

Sables moyens : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50 des éléments supérieurs à 80 μm sont compris entre 0,2 et 2mm.

Sables grossiers : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves [4].

I.2.2.2 Les types des sables Selon la nature

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

Naturel : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roches massives (roches éruptives, calcaires, métamorphique), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

Artificiel : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant par exemple des transformations thermiques : sous-produits industriels, granulats réfractaires.

Recyclé : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées [5].

I.2.2.3 Les types des sables selon leurs provenances

Selon leurs provenances, les sables peuvent être classés comme suit :

- **Sable de rivière** : Il est extrait par dragage des lits des cours d'eau. Ce sable doit être dur et propre pour être utilisé dans les bétons.
- **Sable de mer** : Il provient des côtes marines. Pour être utilisé dans les bétons, il ne doit pas être trop fin et doit être lavé pour éliminer le sel.
- **Sable de carrière** : Ce sable contient souvent de l'argile qui enrobe les grains, ce qui empêche leur adhérence avec les liants. Il est donc déconseillé pour le béton, sauf s'il est soigneusement prélavé.
- **Sable de dune** : Le sable de dune est un type de sable éolien, très fin. On le trouve surtout dans le sud du pays, en zone présaharienne. Ce sable provient des dunes continentales, qui sont de grandes accumulations de sable fin dans certaines parties du Sahara [6].

I.2.3 Les familles de sables

On distingue trois types de familles de sables, couramment utilisées dans le secteur du bâtiment en Algérie.

Les sables roulés siliceux (0/3) : caractérisés par leur forme arrondie, résultent d'un processus naturel d'érosion. Ces sables sont généralement extraits par dragage dans les oueds. Bien que leur utilisation ait été courante et recommandée pendant de nombreuses années, les réserves disponibles sont désormais proches de l'épuisement ou soumises à des réglementations environnementales strictes concernant le dragage des oueds. En conséquence, ce matériau est devenu moins attractif économiquement [7].



Figure I-3 : le sable roulé siliceux

Les sables de concassage calcaires ou silico-calcaires : sont le résultat d'un processus industriel rigoureusement contrôlé, impliquant le concassage, le lavage et le criblage de roches calcaires ou silico-calcaires extraites de carrières. Cependant, le coût élevé de production associé à ce processus réduit leur attractivité économique [7]



Figure I-4 : Les sables de concassages

Le sable de dune : est une variété de sable extrêmement fin, souvent associée aux régions présahariennes du sud du pays. Bien que distinct des sables marins, il partage certaines similitudes avec eux en termes de finesse. Les sables de dune se trouvent principalement dans les dunes continentales, qui sont des accumulations massives de sables fins dans certaines régions spécifiques du Sahara. Ces dunes sont formées par l'accumulation de sables transportés par le vent [7].



Figure I-5 : le sable de dune

I.3 Les dunes de sables

I.3.1 Qu'est-ce qu'une dune ?

Une dune est un relief ou un modèle géomorphologique principalement constitué de sable. Elle se caractérise par un profil transversal dissymétrique, avec une pente douce du côté sous le vent et une pente plus abrupte du côté opposé, souvent orienté vers la terre. On distingue deux types de dunes au sens géographique du terme [8] :

- **La dune bordière** : est une dune qui délimite le haut d'une plage, formant un bourrelet sableux d'une hauteur variable, généralement comprise entre un et plusieurs mètres. Sa base correspond à la limite de la haute mer et peut être vulnérable aux dommages causés par les tempêtes. En arrière de ce premier cordon, on observe souvent le développement d'un champ de dunes présentant diverses formes morphologiques, telles que des dunes alignées, paraboliques ou en râteau. Ces dunes peuvent être plus ou moins stabilisées par la végétation, selon les conditions environnementales locales [9].



Figure I-6: La dune bordière

- **La dune du désert** : Une dune du désert est une accumulation de sable formée par l'action du vent dans les régions arides. Elle se caractérise par une élévation de sable mobile, souvent en forme de crête ou de monticule, qui évolue selon la direction et la force des vents. Ces formations jouent un rôle important dans le paysage désertique et sont un indicateur des dynamiques éoliennes et des conditions climatiques locales [8].



Figure I-7 : La dune du désert.

I.3.2 Reliefs géologiques des dunes de sable

Au sens des reliefs géologiques, les dunes se distinguent par :

- **Les avant-dunes**, qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. Celle-ci est à distinguer de ce que l'on appelle une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou une avant-dune active ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières psammophiles [10].
- **Les falaises dunaires** ne sont pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux [10].
- **Les dunes perchées**, qui apparaissent au sommet d'une falaise vive alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire [10].

I.3.3 Morphologie des dunes de sable

Au sens de la morphologie ou de la forme, on distingue :

- **Dunes en demi-lune ou barkhanes** : Ces dunes sont les plus courantes sur Terre. Elles se présentent sous forme de croissant et sont généralement plus larges que longues. Elles se forment dans des zones où l'apport de sable est faible et sous des vents

unidirectionnels. Les barkhanes sont donc, par définition des dunes mobiles qui se déplacent dans le sens du vent.

- **Dunes paraboliques :** Ces dunes ont une forme en U et sont typiques des déserts côtiers. La plus longue dune parabolique connue mesure environ 12 kilomètres [8]. Elles se forment lorsque la végétation commence à apparaître aux extrémités d'une formation sableuse, arrêtant la progression de ces zones, tandis que la partie centrale continue à avancer. Ce type de dune se développe lorsque le vent souffle principalement dans une seule direction dominante.
- **Siouf ou SIF (dunes en forme de sabre) :** Les siouf sont des ondulations longitudinales qui s'amincissent vers une extrémité. Ils représentent une forme spécifique de dunes qui se distinguent par leur morphologie allongée.

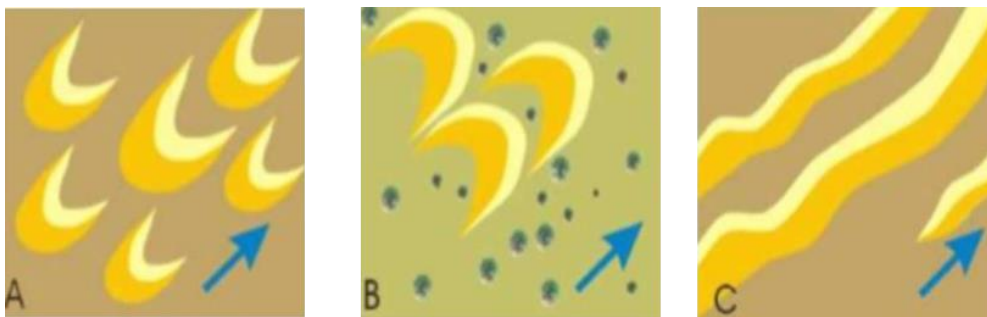


Figure I-8: Les formes de dunes [11]

A : barkhanes ; B : dunes paraboliques ; C : dunes longitudinales, (la flèche bleue indique la direction du vent dominant)

I.4 Le sables de dune

I.4.1 Définition

Les sables des dunes mouvantes sont constitués de particules siliceuses de taille relativement uniforme et de dimensions réduites. Ces sables s'accablent sous forme de dunes de hauteur variable, résultant de processus éoliens complexes. Selon Fooket Higginbotham dans son travail publié en 1968 [8], le Sahara est caractérisé par une répartition géographique particulière, avec environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant composé de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara couvre environ un tiers du continent africain, cela met en évidence le rôle important que pourrait jouer ce sable, de par son abondance, dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux pour les projets de construction [12].

I.4.2 Caractérisation du sable de dune

I.4.2.1 Granulométrie de sable de dune

Le diamètre des plus gros grains des sables de dunes du Sahara est d'environ 0,5 mm, avec une taille maximale près de la roche mère qui diminue progressivement à mesure que l'on s'en éloigne. Les grains deviennent également de plus en plus arrondis. Les particules les plus fines mesurent environ 0,04 mm, Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60}/D_{10}$) est proche de 1,8, ce qui indique une granulométrie serrée (inférieure à 2), tandis que le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / [D_{10} \times D_{60}]$) est d'environ 10, signe d'un mauvais classement granulométrique. Ainsi, ce sable est très fin et mal gradué. La Figure I.8 présente trois courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans trois régions sahariennes différentes : en Tunisie, en Mauritanie [13] et en Algérie [14]. De cette courbe il peut être aisément observé, la grande finesse des trois sables, ainsi que la faiblesse de leur diamètre maximal, s'élevant ici à environ 0,6mm.

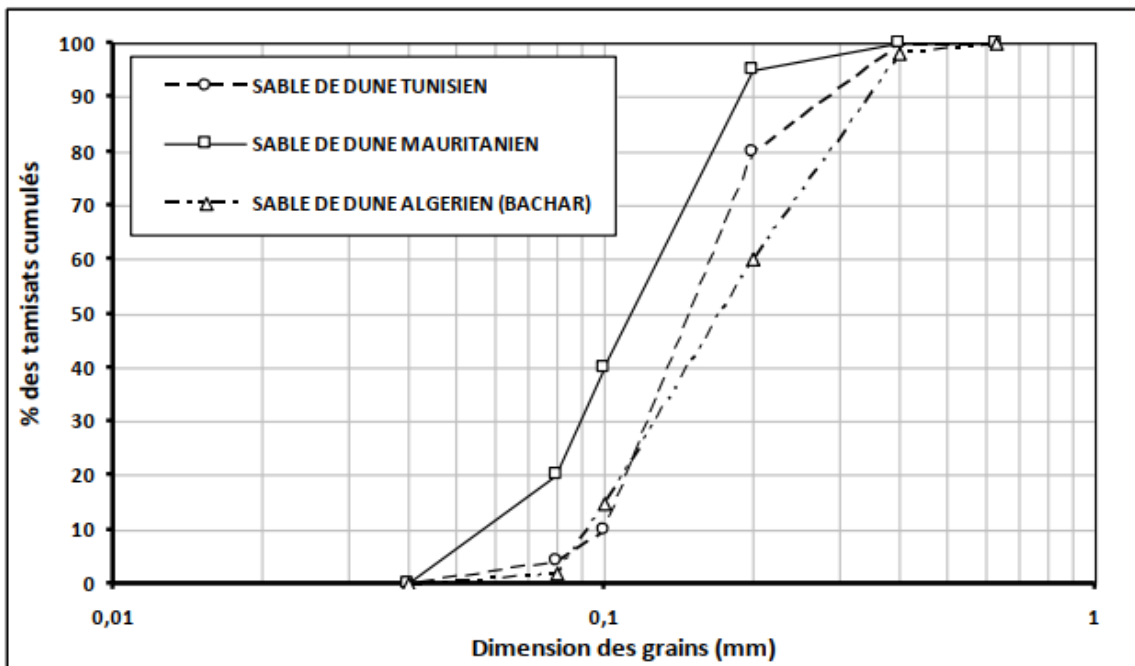


Figure I-9 : Courbes granulométriques de trois sables de dune de grand Sahara [13] [14]

Une autre analyse granulométrique est représentée sur la figure [15] . A travers cette courbe, il a été noté que le plus gros diamètre de ce type sable est de l'ordre de 0.75 mm, tandis que celui des éléments les plus fins est de l'ordre de 0.03 mm, confirmant l'importante finesse des sables de dunes.

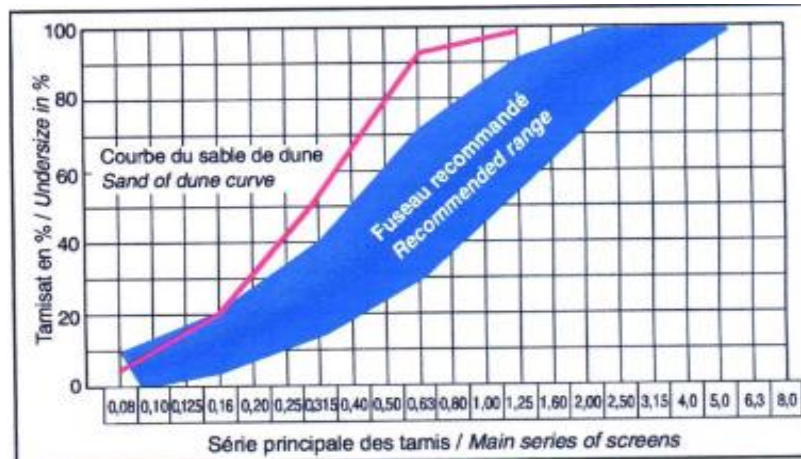


Figure I-10 : Analyse granulométrique du sable de dune. [15]

I.4.2.2 Composition chimique du sable de dune

La composition du sable de dune est très simple : effectivement, les particules de sables sont souvent constituées à plus de 95% de Silice (Quartz α), qui représente la phase constitutive principale, s'ensuit de 1 à 2% de Calcaire, Fer ou Alumine et puis enfin, des traces de différents oxydes. La répartition en oxydes de la masse du sable est donnée à titre d'exemple dans le Tableau I-1 [15]

Tableau I-1 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs [15].

Éléments	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	PAF
%	90.46	1.38	1.92	1.63	0.39	0.2	0.00	0.22	2.56

I.4.2.3 Caractéristiques physiques

Une série d'essais a été effectuée (selon la norme AFNOR) afin de déterminer les caractéristiques physiques du sable de dune [15], qui sont illustrés au Tableau I-2

Tableau I-2 : Caractéristiques du sable de dune [15]

Propriétés	Valeur	Observation
Couleur	Les grains sont teintés de rouge.	Une mince pellicule Ferri-argileuse entoure les grains.
Classe	0/5	Le sable est tamisé in situ
Module de finesse	0.84	Sable fin
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1630	-
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2600	-
Equivalent de sable ES (%)	80.37	Sable propre
Degré d'absorption (%)	1.78	-
Porosité (%)	42	-

Le tableau I-2 précédent dessine les grandes lignes caractérisant les grains de sables de dune. A partir de celui-ci, il peut être relevé le très faible module de finesse (0,84) caractéristique de la grande finesse de ce type de sable, mais aussi la grande propreté de dernier ($ES > 80\%$). Enfin, il est aussi remarqué la faible porosité intra-granulaire de ce type de sable, qui est estimé dans l'exemple illustratif au faible taux de 1,78%.

I.4.3 Comportement mécanique de sable de dune

En termes de caractéristiques mécaniques, des tests de compactage suivis d'essais de cisaillement direct ont été effectués sur des sables de dune par quelques auteurs tels que **OULD SID A. C., HAVARD H. et VALIN C** [16]. Les résultats principaux qu'ils ont obtenus indiquent que :

- L'influence de la teneur en eau sur le compactage de ce type de sable est négligeable lorsque cette teneur est faible, comprise entre 0 et 6 %.
- La cohésion présente une valeur très faible, avoisinant les 5 kPa.
- L'angle de frottement interne se situe entre 30 et 35°, en fonction de la densité du sable.

I.5 Etude comparative des sables dunaires de quelques régions du sud algérien

La forte disponibilité du sable de dune en Algérie a incité, comme nous l'avons relaté précédemment, les ingénieurs et chercheurs à s'intéresser à ses propriétés physico-chimiques en vue de sa valorisation et de son intégration dans le secteur de la construction. Dans cette optique, plusieurs organismes ont mené des études portant sur la composition granulométrique, minéralogique, chimique, ainsi que sur d'autres caractéristiques dans de multiples gisements [17]. Une étude à grande échelle a été menée sur les sables dunaires provenant de plusieurs régions du sud algérien. Le tableau I-3 présente les principales caractéristiques physico-chimiques des différents sables prélevés pour études, notamment ceux des régions de Hassi Bahbah, Ouargla, El Golea, Djelfa, Ghardaïa, M'sila et Boussaâda.

Tableau I-3 : caractéristiques physico-chimiques des sables dunaires de différentes régions

Propriété		LAGHOUAT *	H.BAHBAH **	OURAGLA **	EL GOLEA **	DJELFA ***	GHARDAIA ***	M'sila	Biskra	BOUSSAADA	OUARGLA
Granulométrie		Continue 1.63% de fines	Continue 3% de fines	-	-	Continue 3% de fines	Continue 3% de fines	Continue 5mes	Continue 5% de fines	-	-
Classe (0/d) (mm)		0/0.63	0/0.425	0/0.425	0/0.50	0/0.63	0/0.425	0/0.75	0/0.63	0/0.5	0/0.5
Module de finesse		1.09	1.13	0.93	1.47	1.11	1.10	1.57	1.22	1.21	0.99
Densité apparente (kg/m ³)		1492	1459	1644	1774	1540	1520	1630	1285	1498	1346
Densité absolue (kg/m ³)		2615	2549	2627	2570	2655	2764	2630	2580	2584	2614
Porosité (%)		41	42	42	34	42	45	40	40	41	42
Compacité (%)		59	58	58	66	58	55	60	60	59	58
coefficient d'absorption%		0.086	-	0.086	-	-	-	-	-	-	0.066
valeur de Bleu		0.05	-	0.03	-	-	-	0.1	-	-	-
Propreté	Es à vue	94	92	94	93	94	88	80	89	78	99,6
	Es à piston	86	81	84	88	89	80	74	71	86	99,2
Eléments Nocifs (%)	Matières organiques	néant	néant	Néant	néant	1.44	néant	néant	néant	néant	néant
	Sulfates et sulfures	-	néant	Néant	néant	0.55	0.69	néant	néant	néant	néant
	chlorures	-	-	-	-	0.00035	0.00053	-	-	-	-

Les valeurs relevées (en résumé) se situent dans le tableau suivant.

Tableau I-4 : les différentes propriétés physiques et granulométriques du sable

Propriété	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Unité
Classe granulométrique (0/d)	0/0,42	0/0,75	Mm
Module de finesse	0,9	1,57	-
Masse volumique apparente	1285	1774	Kg/m ³
Masse volumique absolue	2549	2655	Kg/m ³
Porosité intergranulaire	34	45	%
Compacité	55	66	%

Les conclusions qu'on peut tirer à partir de cette étude est que :

Tous ces sables présentent une granulométrie fine, avec des grains dont la taille ne dépasse pas 1 mm. Ils se distinguent par une grande propreté, avec une teneur en éléments nocifs généralement négligeable, à l'exception du sable de Djelfa qui affiche un taux relativement élevé de matières organiques. Le module de finesse reste globalement faible, bien qu'il soit légèrement plus élevé pour le sable d'El-Goléa.

La compacité des sables étudiés est globalement faible, à l'exception de celui d'El-Goléa, dont la valeur atteint 66 %, ce qui peut être considéré comme acceptable. Cette compacité est même comparable à celle des sables utilisés dans les bétons classiques, selon les ordres de grandeur établis par G. Dreux [18].

En conclusion, les sables du sud algérien présentent, dans l'ensemble, des caractéristiques physico-chimiques similaires, à l'exception notable de celui de la région d'El-Goléa. Cette homogénéité permet d'envisager une généralisation des résultats de cette étude à l'ensemble des régions concernées.

I.6 Le sable et ses usages

Le sable a de multiples usages. Il est utilisé pour faire du béton et comme matière première du verre. Il peut être aussi utilisé pour filtrer les liquides. Du fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de lest ou pour protéger (sac de sable contre les éclats d'explosion et les balles), il est aussi utilisé comme abrasif dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques. Le sable est également un élément important de l'industrie touristique, lorsqu'il est présent sur les plages et les dunes où il représente un élément indispensable à la protection de la côte [19].

Les sables sont un élément crucial du processus sédimentaire et représentent une ressource économique majeure. Ils sont utilisés dans divers secteurs, notamment comme remblais, granulats pour béton, et matériaux de construction. Les sables siliceux, sont essentiels pour l'industrie du verre, la fabrication de moules et de noyaux de fonderie, ainsi que pour la production de céramiques et de mortiers spéciaux.

Le sable sert également de milieu naturel pour l'accumulation de minéraux lourds alluvionnaires, connus sous le nom de placers. Ces concentrations minéralisées sableuses contiennent des minéraux précieux tels que l'or, les diamants, la cassitérite, la magnétite et l'ilménite. Les placers d'ilménite, ou « sables noirs », sont économiquement importants pour la fabrication des pigments de peinture blanche et comme source de titane-métal.

En outre, les sables peuvent agir comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Cependant, leur exploitation, souvent anarchique, doit être réglementée pour prévenir la perturbation des équilibres naturels fragiles, tels que l'érosion des plages et la destruction des nappes phréatiques [19].

I.6.1 Le sable dans le secteur de la construction

Le sable est un matériau naturel essentiel dans le domaine de la construction, utilisé principalement pour la fabrication du béton, du mortier et des enduits. Composé le plus souvent de silice, il provient de sources variées comme les rivières, les carrières ou les déserts, et sa granulométrie influence son utilisation : le sable fin est privilégié pour les finitions, tandis que le sable grossier est adapté aux ouvrages plus lourds. Mélangé à du ciment et du gravier, il permet d'obtenir du béton, utilisé pour les fondations, murs, routes et ponts. Il entre aussi dans la composition du mortier, indispensable pour lier les briques et blocs. Par ailleurs, le sable est

employé comme matériau de remblai pour stabiliser le sol et aplanir les surfaces avant construction. Sa polyvalence, sa disponibilité et ses propriétés mécaniques en font un composant incontournable sur tous les chantiers [20].

I.6.2 Le sable de dune dans le domaine de la construction

L'Algérie est un pays à forte consommation de granulats, avec une demande qui augmente chaque année. Cependant, ces réserves de granulats naturels sont souvent épuisées dans certaines régions, et d'autres régions ne disposent plus de ces matériaux. Parallèlement, le pays, notamment le sud algérien, abrite d'importants gisements de sables naturels fins notamment les sables de dunes autrement appelés sables éoliens.

En effet, cette situation de manque et de tension sur la matière première, a rendu nécessaire la réflexion sur l'élaboration de nouveaux types de bétons, tels que les bétons de sable ou encore des mortiers innovants. Le sable de dune, en particulier, pourrait ainsi remplacer le sable alluvionnaire dans squelette granulaire d'un béton, à condition que sa formulation soit soigneusement étudiée [21]. Il peut aussi être intégré dans la formulation de mortiers [22]. Historiquement, le sable de dune a été utilisé dans les travaux de remblais, de fondations et routiers, cependant, de nos jours de plus en plus de travaux montrent son intérêt dans la confection des matériaux cimentaires, et son potentiel pour une utilisation plus large dans la construction.

L'intérêt de l'utilisation de ce type de sable se situe à deux niveaux : aussi bien technique qu'économique.

➤ Intérêt économique

- Les avantages économiques sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité quasi-inépuisable.
- Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement [23]

➤ Intérêt technique

- Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance.
- Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base [23].

I.7 Sable de dune dans les matériaux cimentaires (mortier, bétons)

I.7.1 Effet sur la résistance à la compression et à la traction

De plus en plus de travaux dans la littérature relatent l'effet bénéfique de l'usage du sable de dune dans les matériaux cimentaires. Ainsi, **Abbas Oda DAWOOD** et **Ahmed Mjbel JABER** [24] ont mené une étude sur un béton constitué d'un mélange de sable de dune et de sable naturel, de gravier concassé, d'eau avec un additif plastifiant, ainsi que de fibres d'acier courtes et longues. Les Tableaux I-3 et I-4 montrent les proportions pour 1 m³ des bétons avec fibres d'acier et sans fibres d'acier (témoins) qu'ils ont évalués.

Tableau I-5 : Rapports de mélange par mètre cube avec ajout de fibres d'acier [24].

Dune sand [%]	Description of max		Cement [kg/m ³]	Steel fiber (long) [kg/m ³]	Steel fiber (short) [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	Super plasticizer [kg/m ³]	Coarse aggregate [kg/m ³]	Fine aggregate [kg/m ³]	Dune sand [kg/m ³]	W/C
	Mix	Description of steel fiber									
0 %	M7	Mono (50 mm)	482.93	78.5	0	198	0.5 %	1024	650.07	0	0.41
	M8	Mono (13 mm)	482.93	0	78.5	198	0.5 %	1024	650.07	0	0.41
	M9	0.65 long + 0.35 short	482.93	51.025	27.475	198	0.5 %	1024	650.07	0	0.41
20 %	M10	Mono (50 mm)	482.93	78.5	0	198	0.5 %	1024	520.06	130.01	0.41
	M11	Mono (13 mm)	482.93	0	78.5	198	0.5 %	1024	520.06	130.01	0.41
	M12	0.65 long + 0.35 short	482.93	51.025	27.475	198	0.5 %	1024	520.06	130.01	0.41
40 %	M13	Mono (50 mm)	482.93	78.5	0	198	0.5 %	1024	390.04	260.03	0.41
	M14	Mono (13 mm)	482.93	0	78.5	198	0.5 %	1024	390.04	260.03	0.41
	M15	0.65 long + 0.35 short	482.93	51.025	27.475	198	0.5 %	1024	390.04	260.03	0.41
60 %	M16	Mono (50 mm)	482.93	78.5	0	198	0.5 %	1024	260.03	390.04	0.41
	M17	Mono (13 mm)	482.93	0	78.5	198	0.5 %	1024	260.03	390.04	0.41
	M18	0.65 long + 0.35 short	482.93	51.025	27.475	198	0.5 %	1024	260.03	390.04	0.41
80 %	M19	Mono (50 mm)	482.93	78.5	0	198	0.5 %	1024	130.01	520.06	0.41
	M20	Mono (13 mm)	482.93	0	78.5	198	0.5 %	1024	130.01	520.06	0.41
	M21	0.65 long + 0.35 short	482.93	51.025	27.475	198	0.5 %	1024	130.01	520.06	0.41
100 %	M22	Mono (50 mm)	482.93	78.5	0	198	0.5 %	1024	0	650.07	0.41
	M23	Mono (13 mm)	482.93	0	78.5	198	0.5 %	1024	0	650.07	0.41
	M24	0.65 long + 0.35 short	482.93	51.025	27.475	198	0.5 %	1024	0	650.07	0.41

Tableau I-6: Rapports de mélange par mètre cube sans fibres d'acier [24].

Mix	Dune sand replacement level [%]	Cement [kg/m ³]	Water [kg/m ³]	Super plasticizer [kg/m ³]	Coarse aggregate [kg/m ³]	Fine aggregate [kg/m ³]	Dune sand [kg/m ³]	Water to cement ratio W/C
M1	0 %	482.93	198	0.5 %	1024	650.07	0	0.41
M2	20 %	482.93	198	0.5 %	1024	520.06	130.01	0.41
M3	40 %	482.93	198	0.5 %	1024	390.04	260.03	0.41
M4	60 %	482.93	198	0.5 %	1024	260.03	390.04	0.41
M5	80 %	482.93	198	0.5 %	1024	130.01	520.06	0.41
M6	100 %	482.93	198	0.5 %	1024	0	650.07	0.41

Les bétons confectionnés à partir de ces formulations ont aboutis aux résultats montrés en figure I-11 à figure II-14. Ils correspondent aux résistances à la compression et à la traction par fendage obtenues à 7 jours et 28 jours.

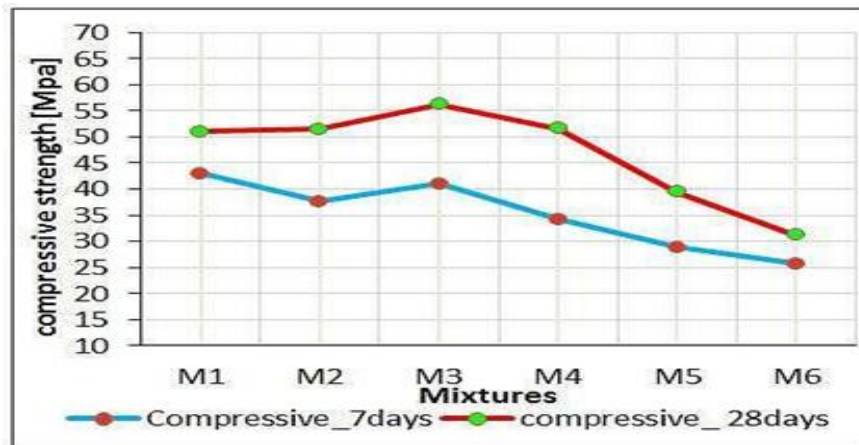


Figure I-11 : Relation entre la résistance à la compression des bétons sans fibres et les rapports de remplacement du sable de dune [24].

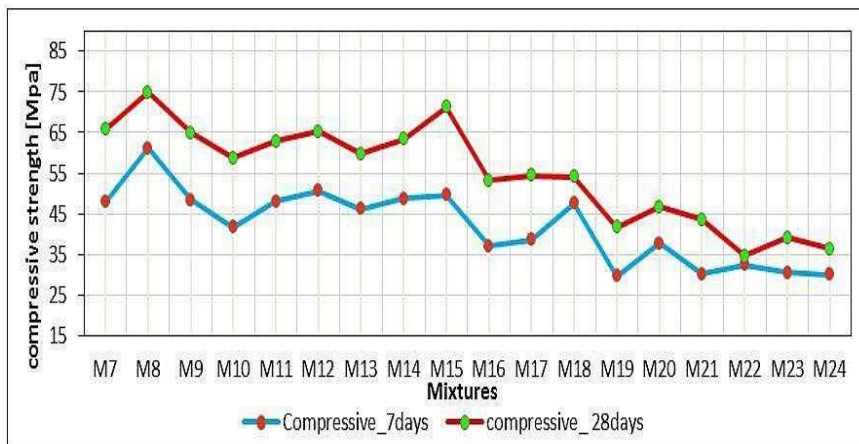


Figure I-12 : Relation entre la résistance à la compression des bétons avec fibres et les taux de remplacement du sable de dune [24].

À 7 jours, l'échantillon témoin sans sable de dune (0 % D.S) a atteint une résistance maximale à la compression de 43,05 MPa. Plus le mélange de sable de dune augmente, plus la résistance à la compression baisse. Aux premiers taux de remplacement testés (20% et 40%), la chute est relativement faible, puis l'intensité de la baisse augmente jusqu'à devenir très importante lorsqu'un remplacement total du sable par du sable de dune (100 %) est effectué. En effet, ce dernier a entraîné une chute élevée de la résistance, diminuant de 40,06 % par rapport au témoin.

Pour le béton fibré, la résistance à la compression a augmenté selon le type et la quantité de fibres. Ainsi, le mélange sans sable de dune mais avec 1 % de fibres longues a atteint la résistance la plus élevée (61,1 MPa) enregistrée, soit 41,9 % de plus que le témoin. Le béton hybride avec 20 % de sable de dune et 1 % de fibres hybrides a obtenu 50,7 MPa, soit 34,8 % de plus que le même mélange sans fibres. Le mélange hybride avec 40 % de sable de dune et 1 % de fibres hybrides a aussi montré une amélioration de 20,7 % par rapport au mélange sans fibres.

Enfin, en remplaçant complètement le sable par du sable de dune dans les bétons à fibres hybrides, la résistance à 7 jours a diminué de 0,3 % à 40,6 % selon la proportion de sable de dune (0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %), mais reste toujours 16,6 % supérieure à celle du mélange 100 % SD sans fibres.

À 28 jours, le mélange avec 40 % de sable de dune sans fibres a atteint la résistance à la compression la plus élevée évaluée à 56,3 MPa, soit 10,3 % de plus que le mélange témoin. Le mélange avec 60 % de sable de dune sans fibres a également montré une légère augmentation de 1,13 % par rapport au témoin. Au-delà de ces proportions, l'augmentation de la quantité de sable de dune dans le béton engendre une baisse de résistance, comme cela fut le cas aussi à l'échéance de 7 jours.

Dans le cas des bétons fibrés, il y a une amélioration systématique du comportement à la traction avec la présence de fibres, le mélange de fibres (hybridation) présentant la plupart du temps les meilleures résistances. Par exemple, le mélange de béton hybride contenant 40 % de sable de dune et 1 % de fibres hybrides a atteint une résistance de 71,3 MPa, dépassant de 26,6 % la résistance du mélange non fibré. Cette amélioration est due à l'effet synergique des fibres hybrides : les fibres courtes agissent au stade de microfissuration tandis que les fibres longues interviennent au stade de microfissuration. De plus, la finesse du sable de dune permet

un meilleur remplissage entre les granulats, rendant le béton plus cohésif, à ce taux particulièrement.

Toutefois, il est intéressant de noter que, la résistance diminue pour les mélanges avec des teneurs plus élevées en sable de dune (60 %, 80 %, 100 %), même en présence de fibres. Pour un remplacement total du sable par du sable de dune (100 % SD), la résistance du mélange hybride de fibres est de 36,4 MPa, soit 16,6 % supérieure au mélange sans fibres, mais inférieure à certains mélanges avec fibres simples.

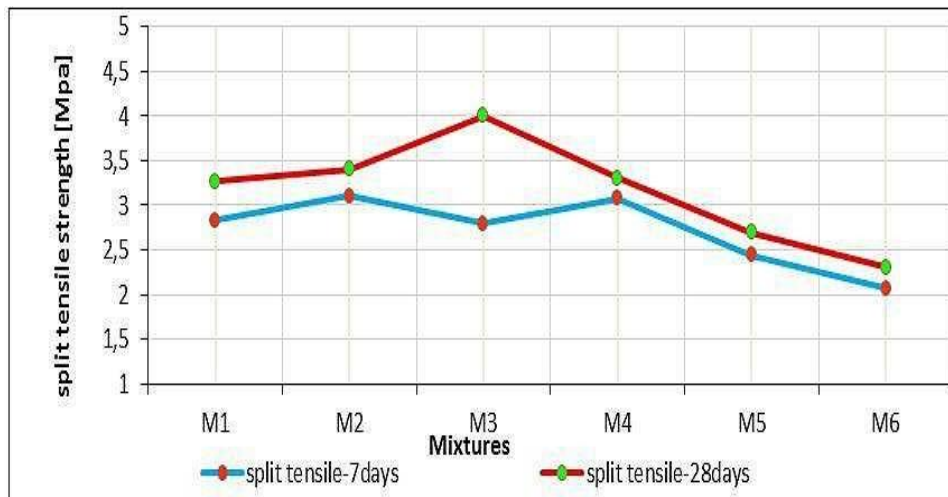


Figure I-13 : Relation entre la résistance à la traction par fendage des bétons sans fibres et les rapports de remplacement du sable de dune [24].

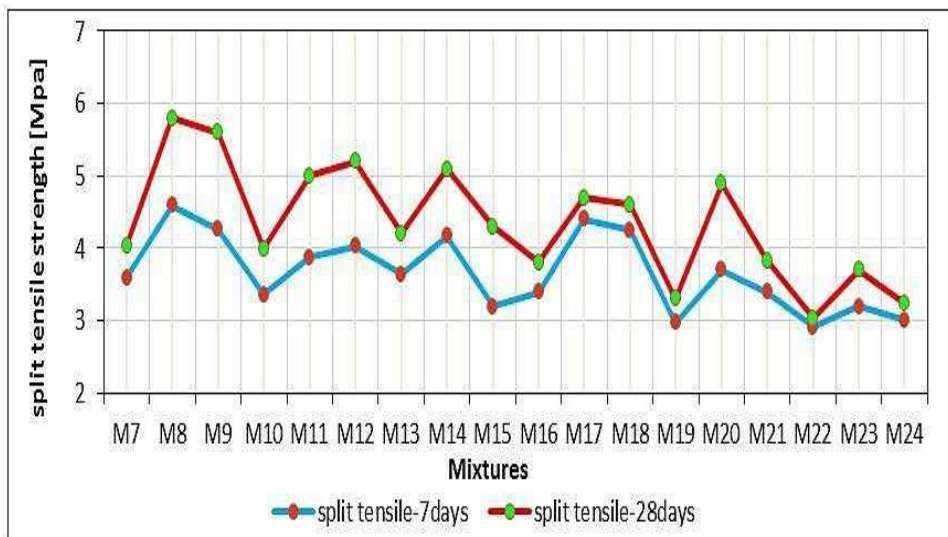


Figure I-14 : Relation entre la résistance à la traction f_t par fendage des bétons avec fibres et les rapports de remplacement du sable de dune [24].

Les figure I-13 et figure I-14, montrent les résistances à la tractions obtenues sur des mélanges de bétons à base de sable de dune, fibrés et non fibrés.

À 7 jours, l'échantillon avec 60 % de sable de dune sans fibres a atteint la résistance à la traction par fendage la plus élevée à 3,08 MPa, soit 8,83 % de plus que le témoin. En revanche, un remplacement total du sable par du sable de dune (100 % D.S sans fibres) a entraîné une baisse de 26,8 % de cette résistance par rapport au témoin (Figure I-13).

Pour le béton fibré, la résistance à la traction a augmenté selon le type de fibres. Le mélange sans sable de dune avec 1 % de fibres longues (S.F.L) a obtenu la meilleure résistance à la traction, 4,59 MPa, soit 62,1 % de plus que le témoin. Le mélange avec 60 % de sable de dune et 1 % de fibres longues a également montré une amélioration notable, avec 4,4 MPa, soit 42,8 % de plus que le même mélange sans fibres.

Lors du remplacement complet du sable par du sable de dune dans les bétons à fibres d'acier hybrides, la résistance à la traction par fendage à 7 jours diminue de 5,9 % à 29,3 % selon la proportion de sable de dune (0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %), mais reste néanmoins 45,4 % supérieure à celle du mélange 100 % D.S sans fibres (Figure I-14).

À 28 jours, le mélange de béton avec 0 % de sable de dune et 1 % de fibres longues (S.F.L) a atteint la résistance à la traction la plus élevée de 5,8 MPa, soit 77,3 % de plus que le témoin, et dépasse également les mélanges avec fibres courtes (S.F.S) et fibres hybrides (H.S.F) de 34,5 % et 3,5 % respectivement. Le béton hybride avec 20 % de sable de dune et 1 % de fibres hybrides a atteint 5,2 MPa, soit des gains de 52,9 %, 30 % et 4 % par rapport aux mélanges sans fibres, avec fibres courtes et fibres longues.

Les auteurs, concluent que les fibres hybrides améliorent la résistance à la traction en combinant l'action des fibres courtes (0,35 %) qui limitent les fissures initiales, et des fibres longues (0,65 %) qui assurent la durabilité. Par ailleurs, la finesse du sable de dune contribue à de bonnes performances mécaniques en impactant la compacité globale du béton mais aussi en améliorant la cohésion entre les granulats.

Une autre étude menée par **AYACHI** en 2011 [25] a confirmé que les résistances à la traction et à la compression du béton varient de manière linéaire avec le pourcentage de sable de dune, montrant une amélioration jusqu'à un taux optimal, puis une diminution au-delà. Cette étude a consisté en l'évaluation de mélanges de bétons de sable de dune (Tableau I-6) avec

différents modes de conservation (à sec, immergé pendant 14jrs et immergé pendant 28jrs) [25], les résultats sont présentés ci-dessous (Tableau I-7)

Tableau I-7 : Les différentes compositions *du* béton [25]

Composition du béton	SD (Kg)	SA (Kg)	Ciment(Kg)	E/C
100% SD	1382.6	/	460.87	0.6
30%SD+70%SA	416.6	927.05	462.88	0.58
40%SD+60%SA	555.46	833.19	462.88	0.58

Tableau I-8 : Les résultats des essais mécaniques à 28j [25]

Composition du béton	Traction			Compression		
	1 ^{er} mode	2 ^{eme} mode	3 ^{eme} mode	1 ^{er} mode	2 ^{eme} mode	3 ^{eme} mode
C1 100% SD	2.51	04.40	3.50	10.51	18.70	14.06
C2 30%SD+70%SA	3.52	06.54	5.21	11.2	23.02	22.75
C3 40%SD+60%SA	3.77	06.72	6.58	11.73	30.06	23.37

D'après les résultats des propriétés mécaniques (compression et traction) du béton de sable obtenus pour l'ensemble des mixtures, la composition 3 affiche une nette amélioration, par rapport à la première et la deuxième composition à 28jours, est cela dans tous les modes de conservation, cependant il faut signaler aussi, que les échantillons conservé dans l'eau pendant une durée de 14 jours (2^{eme} mode), ont donné les meilleurs résultats dans toutes les compositions suivi de ceux conservé dans l'eau pendant 28 jours (3^{eme} mode).

De là on peut dire que les échantillons conservés dans un milieu humide (dans l'eau), ont affichés une amélioration de la résistance à la compression et à la traction par rapport à ceux conservé dans un milieu sec (air libre). Ceci est dû, de manière bien connue au phénomène d'évaporation qui est limitée dans un environnement humide, ce qui permet au processus d'hydratation de se poursuivre sans interruption, contrairement au milieu sec où l'évaporation se fait d'une manière rapide, sans laisser le temps pour le durcissement du ciment.

Aussi une différence dans les résultats est notée selon le mode considéré, avec le mélange contenant 40% de sable de dune montrant les meilleures résistances. Cela montre bien, comme constaté précédemment, la présence d'une proportion optimale de sable de dune permettant de réduire la porosité du mélange granulaire constituant le béton, de telle manière qu'au final, la résistance mécanique ultime obtenue est la meilleure [25].

Abderrahmane Ghriebe et Yacine Abadou [26] ont réalisé de leur côté, une étude sur utilisation de fibres PET (polyéthylène téréphtalate) recyclées dans les mortiers à base de sable de dune, les compositions du mélange du mortier étudié sont présentées dans le tableau I-8, où les mortiers ont été élaborés selon les prescriptions de la norme NF EN 196-1 [27]. Afin de préserver une bonne maniabilité ainsi qu'un comportement mécanique satisfaisant, la teneur en fibres recyclées de PET a été limitée à 2,5 %.

Les éprouvettes prismatiques ont été confectionnées avec 450 g de ciment, 1350 g de sable de dune, et une proportion de fibres PET variant de 0 à 2,5 %, tout en maintenant un rapport eau/ciment constant de 0,70. Après le malaxage, les mortiers frais ont été coulés dans des moules, vibrés, puis conservés pendant 24 heures en atmosphère contrôlée avant d'être démoulés et immergés dans l'eau jusqu'aux essais mécaniques. Cette méthodologie vise à analyser l'influence des fibres PET recyclées sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers.

Tableau I-9 : Composition du mélange du mortier [26]

Mixtures	Composition	Ciment (g)	DS (g)	AS (g)	F (%)	F (g)	w/c
MA (control mix)	100% AS	450	-	1350	0	0	0.7
MD	100% DS	450	1350.0	-	0	0	0.7
MF-0.5	84.5% DS + 0.5% F	450	1343.3	-	0.5	6.7	0.7
MF-1.0	84% DS + 1% F	450	1336.5	-	1.0	13.5	0.7
MF-1.5	83.5% DS + 1.5% F	450	1329.8	-	1.5	20.2	0.7
MF-2.0	83% DS + 2% F	450	1323.0	-	2.0	27.0	0.7
MF-2.5	82.5% DS + 2.5% F	450	1316.3	-	2.5	33.7	0.7

- DS : sable de dune
- AS : sable alluvial (sable de rivière)
- F : fibres (fibres recyclées de PET)

Des tests de résistance ont été effectués en compression et en traction, avec les résultats présentés dans les graphiques des Figure I-15 et Figure I-16.

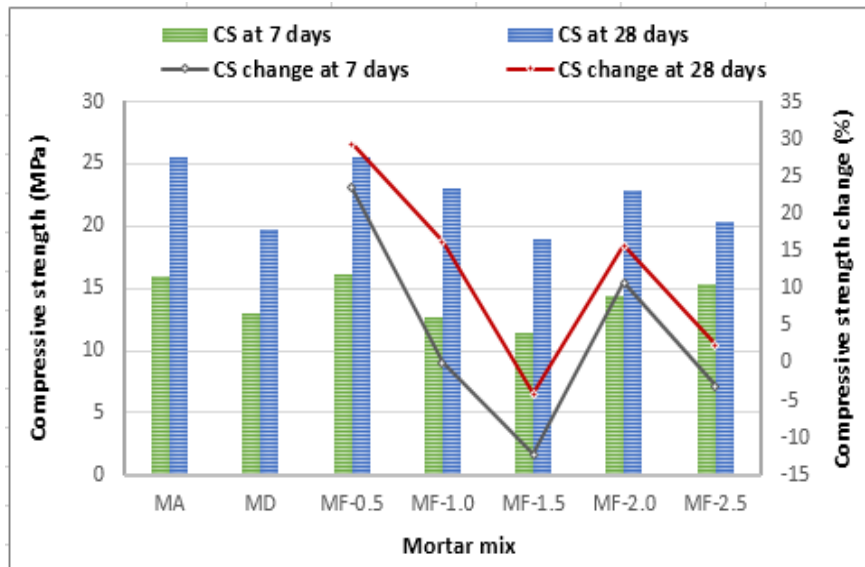


Figure I-15 : Résultats des essais de résistance à la compression [26]

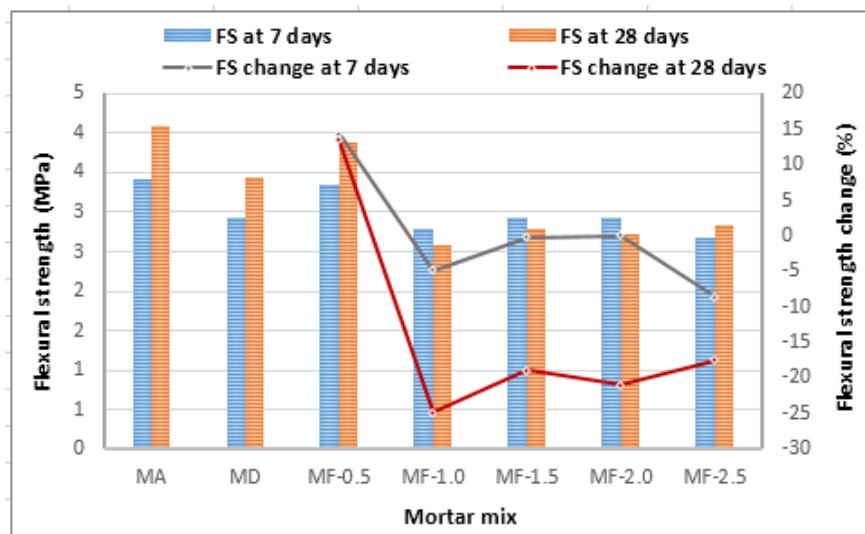


Figure I-16 : Résultats des essais de résistance à la flexion [26]

Les mortiers renforcés avec des fibres recyclées de PET ont montré une amélioration notable de la résistance à la compression, avec des valeurs allant de 11,4 à 16 MPa à 7 jours et de 19 à 25,6 MPa à 28 jours. La meilleure performance a été obtenue avec 0,5 % de fibres, entraînant une augmentation de la résistance de 17,7 % à 7 jours et de 29,3 % à 28 jours par rapport au mortier non renforcé, dépassant même celle du mortier à base de sable alluvial [26].

Concernant la résistance à la flexion, les mortiers renforcés avec 0,5 % de fibres PET ont également présenté une amélioration, avec des gains de 14,4 % à 7 jours et 13,4 % à 28 jours. Au-delà de ce taux, la résistance à la flexion a diminué, ce qui est attribué à une augmentation de la porosité liée à l'incorporation excessive de fibres [26]. Ces résultats ont pour intérêt double qui est, qu'ils confirment d'une part, l'effet généralement admis qui est que la présence de sable de dune génère la plupart du temps une baisse de résistance, et d'autre part, qu'au moyen de l'ajout de fibres, il est possible de freiner la chute de résistance voire réussir à augmenter cette dernière significativement. Cette étude a néanmoins pour handicap de ne pas montrer l'effet que pourrait avoir la variation du taux de sable de dune dans le mélange sur ces résistances mécaniques, étant que les mélanges testés contiennent tous quasiment les mêmes taux de sable de dune (environ 84%).

Abdulrahman Alhozaimy [28] a réalisé, pour sa part, une étude sur l'utilisation de sable fin de dune broyé comme matériau de cimentation supplémentaire autrement dit comme une addition minérale. Le sable de dune (DS) utilisé, provenant d'Arabie Saoudite, a été mécaniquement broyé pour obtenir une finesse comparable à celle du ciment (95 % passant une maille de 45 μ m). Un sable standard avec une granulométrie maximale de 2,36 mm a servi de granulat fin. Différents mélanges de mortier ont été préparés en remplaçant partiellement le ciment par du DS broyé à des taux de 10, 20, 30 et 40 %.

Tableau I-10 : Proportions de mélange des échantillons de mortier [28]

Material	Mortar mixtures				
	CTRL	DS10	DS20	DS30	DS40
Cement	500	450	400	350	300
DS	–	50	100	150	200
Fine aggregate	1500	1500	1500	1500	1500
w/(c + DS)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

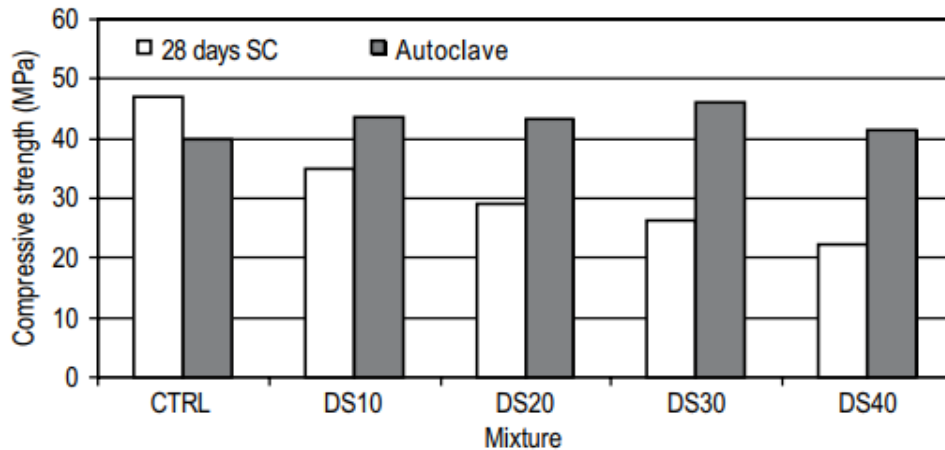


Figure I-17 : Résistance à la compression des mortiers durcis en conditions standard et en conditions d'autoclavage [28]

La figure I-17 montre que la résistance à la compression des mortiers diminue avec l'augmentation du remplacement du ciment par du sable de dune broyé (DS) lorsqu'ils sont durcis en conditions standard, en raison d'une moindre teneur en ciment, d'un rapport eau/ciment plus élevé et du rôle de remplissage du DS, sans réaction pouzzolanique. En revanche, sous durcissement en autoclave, tous les mélanges contenant du DS présentent une résistance supérieure au mélange témoin, grâce à la réaction entre le quartz du DS (SiO_2) et l'hydroxyde de calcium du ciment ou Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formant une matrice cimentaire secondaire. La meilleure résistance (46 MPa) est obtenue avec un remplacement de 30 % du ciment par du DS.

Une autre étude menée par **Abdulrahman Alhozaimyn** [29] a porté cette fois sur les propriétés du béton à haute résistance utilisant des sables blancs et de dunes soumis à une cure normale et cure en autoclave. Ces sables ont été prélevés à Riyad, en Arabie Saoudite. Le sable blanc et le sable de dune contenant respectivement 94 % et 88,8 % de SiO_2 .

Tableau I-11 : Proportion de mélange du béton [29].

Material	CTRL	WS	DS
Cement (kg/m^3)	500	350	350
White sand (kg/m^3)	0	150	0
Dune sand (kg/m^3)	0	0	150
Fine aggregate (kg/m^3)	650	650	650
Course aggregate (kg/m^3)	1165	1165	1165
Water (kg/m^3)	150	150	150
Superplasticizer (l)	6	6	6

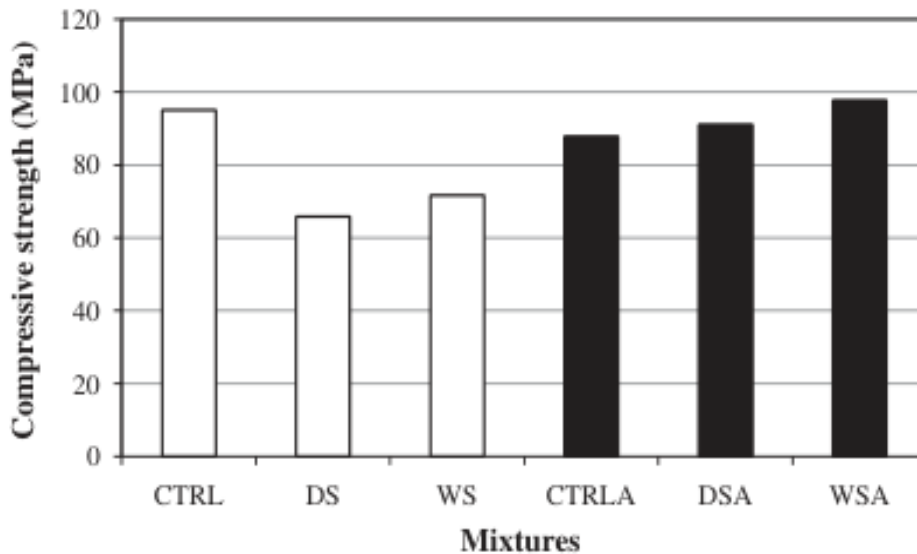


Figure I-18 : Résistance des différents mélanges sous cure en autoclave et cure normale [29].

La Figure I-18 présente les résultats de la résistance à la compression des bétons soumis à différentes méthodes de cure. Les abréviations CTRL, WS et DS correspondent respectivement au mélange témoin, au mélange avec sable blanc et au mélange avec sable de dune, tous soumis à une cure normale. CTRLA, WSA et DSA désignent les mêmes mélanges mais soumis à une cure en autoclave.

Sous cure normale, l'ajout partiel de sable blanc ou de sable de dune en remplacement du ciment entraîne une baisse notable de la résistance à la compression, car ces sables jouent principalement le rôle de charges inertes. En revanche, la cure en autoclave améliore considérablement la résistance des bétons contenant ces sables, avec une augmentation de 38,3 % pour le sable de dune et 36,3 % pour le sable blanc. Cette amélioration est due là aussi, comme ils l'expliquent, à une réaction pouzzolanique entre les sables finement broyés et le Ca(OH)_2 , formant des hydrates secondaires améliorant la résistance.

Cependant, la cure en autoclave diminue d'environ 8 % la résistance du mélange témoin comparé à la cure normale, probablement en raison d'une hydratation irrégulière et de la formation d' $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$, un composé lié à une résistance moindre [29].

I.7.2 Effet sur les caractéristiques à l'état frais du béton et mortier

➤ Affaissement

L'affaissement est une mesure de la consistance du béton frais, caractérisant sa plasticité et sa maniabilité lors de la mise en œuvre. Il est déterminé par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, qui consiste à mesurer la différence de hauteur entre un cône rempli de béton frais et le béton après retrait du cône [30].

Une étude de **Sangjun Park** [31] a porté sur les caractéristiques à l'état frais du béton contenant du sable de dune. Elle a évalué l'effet du rapport sable de dune / sable (grain fin) total (DS/FA) sur les caractéristiques du béton frais, en particulier l'affaissement, tout en maintenant une valeur cible de 180 ± 25 mm. Les différents dosages utilisés sont présentés dans le Tableau I-11.

Tableau I-12 : Dosages des mélanges de béton [31].

Mixture ID ¹	Slump (mm)	W/C	S/a ²	Unit weight (kg)					AD ⁸ (cw%)
				W ³	C ⁴	CS ⁵	DS ⁶	CA ⁷	
W170-DS10	180 ± 25	0.4	0.60	170	425	951	106	729	0.8
W170-DS20			0.50	170	425	705	176	911	0.8
W170-DS40			0.45	170	425	476	317	1002	0.7
W170-DS60			0.40	170	425	282	423	1094	0.8
W160-DS10			0.65	160	400	1058	118	655	1.0
W160-DS20			0.55	160	400	796	199	842	1.0
W160-DS40			0.45	160	400	488	326	1029	1.0
W160-DS60			0.42	160	400	304	456	1085	1.1
W150-DS20			0.60	150	375	891	223	768	1.2
W150-DS40			0.48	150	375	534	356	998	1.5
W150-DS60			0.43	150	375	319	479	1094	1.3

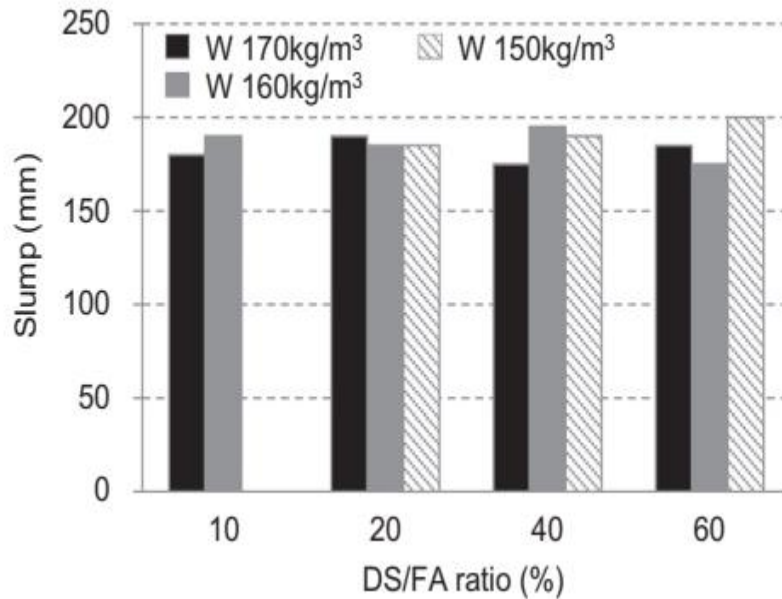


Figure I-19 : Affaissement des bétons en fonction du rapport sable de dune/grain fin [31]

Les résultats des expériences sont présentés dans la figure I-19. Dans par exemple, les mélanges W170 (contenant 170kg d'eau/m³), le mélange DS10 a montré le rapport affaissement/adjuvant (slump/AD) le plus bas, avec 225 mm/% (180mm/0,8%). Ce rapport augmente avec l'augmentation du rapport sable de dune/sable (DS/FA) jusqu'à 40 %. Effectivement, le mélange DS40 a enregistré le rapport affaissement/adjuvant (slump/AD) le plus élevé, avec 250 mm/%. Ce rapport maximal représente une augmentation de 11 % par rapport à la valeur minimale. Il a ainsi démontré l'amélioration de l'affaissement du béton dû fait de la présence de sable de dune pour un même dosage d'adjuvant.

Une autre étude, menée par **El-Sayed Sedek Abu Seif** [32], s'est également intéressée à cet effet. Cette étude a porté sur l'exploitation du sable de dune provenant de l'oasis de Kharga en Égypte, comme matériau pour la fabrication du béton. Des mélanges ont été réalisés en remplaçant partiellement le sable naturel par du sable de dune, selon différents taux de substitution augmentant par paliers de 10 %. Les résultats obtenus illustrent l'impact de ces variations sur les propriétés du béton, comme le montre la figure I-20.

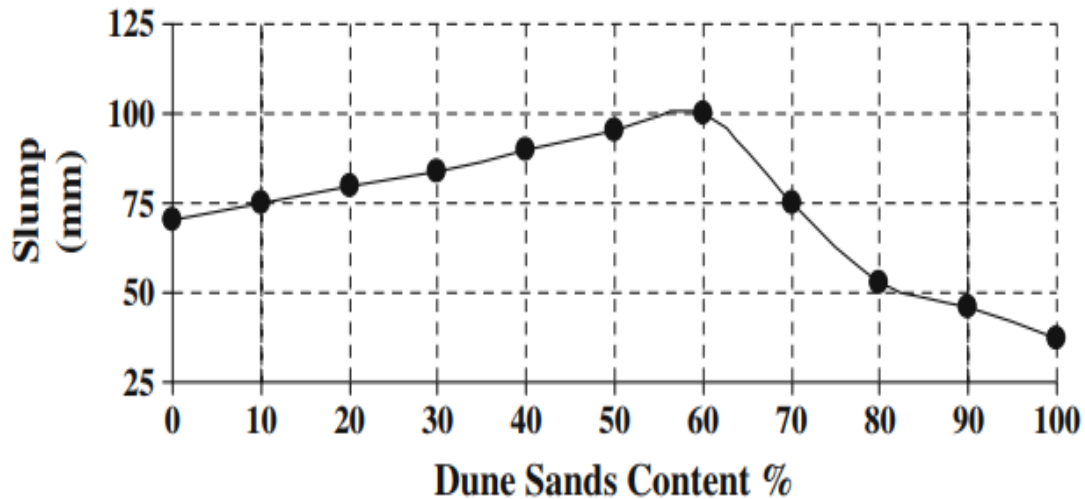


Figure I-20 : Effet de la teneur en sable de dune sur la maniabilité du béton [31]

Ce test d'affaissement permet d'estimer la teneur en eau du béton frais, ce qui est directement lié à sa résistance une fois durci. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la teneur en sable de dune, l'affaissement augmente dans un premier temps. Cela peut s'expliquer par la forme arrondie et régulière des grains de sable de dune, faisant glisser les autres grains de sable ordinaire dont la morphologie -plutôt angulaire- réduit leur mobilité naturelle sous leur propre poids. Toutefois, au-delà de 60 % de sable de dune, l'affaissement soudainement baisse, ce qui serait lié à la trop importante surface spécifique des grains fins de sable de dune, qui ont tendance à adsorber et mobiliser de fortes quantités d'eau, qui autrement aurait servi à fluidifier le béton.

La maniabilité des bétons contenant ce type de sable varie de faible à moyenne, ce qui les rend adaptés soit à des ouvrages armés standards sans vibration, soit à des structures fortement armées nécessitant une vibration. Cependant un taux limite de sable de dune à ne pas dépasser est prescrit afin d'obtenir une fluidité du béton correcte [32].

Une autre étude expérimentale menée par **Abderrahmane Ghrieb et Yacine Abadou** [33], a traité des propriétés physiques et mécaniques d'un mortier à base de sable de dune renforcé par des fibres de PET recyclé, mettant l'accent sur l'étude de l'écoulement de ces mortiers à l'état frais.

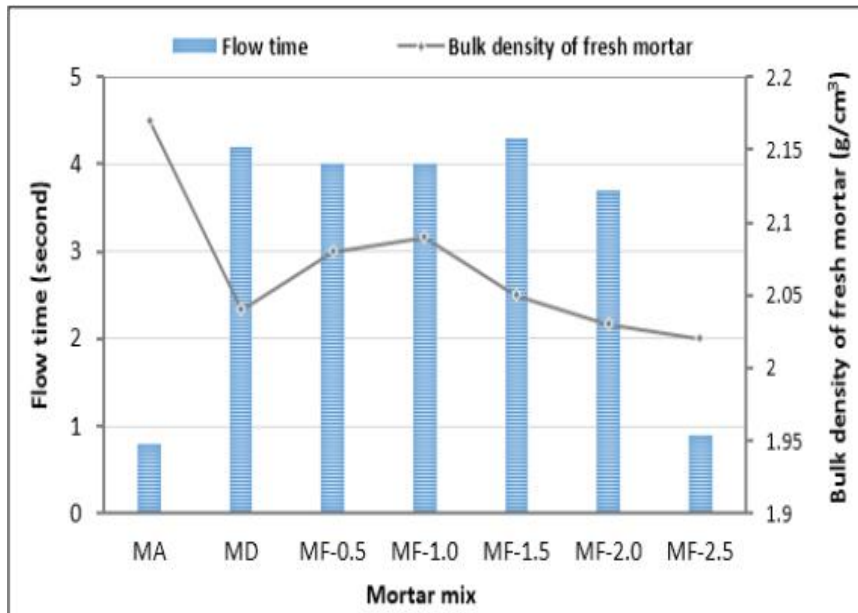


Figure I-21 : Résultats du temps d'écoulement et de la masse volumique apparente du mortier frais [33].

Les résultats relatifs à l'écoulement du mortier présentés dans la figure I-21, montrent que des taux de renforcement en fibres recyclées de 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 % n'ont pas d'effet significatif sur la maniabilité des mélanges, en d'autres termes les avantages liés à la présence de sable de dune sont maintenues même à de forts taux de fibres dans le mortier. En revanche, un taux de 2,5 % de fibres, provoque une réduction notable du temps d'écoulement, dû à l'enchevêtrement excessif des fibres entre elles, qui annihile l'effet lubrifiant des particules fines du sable de dunes.

➤ Absorption

L'absorption d'eau par les granulats est définie comme la capacité des granulats à absorber de l'eau dans leurs pores. Elle est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon de granulats secs après immersion dans l'eau pendant 24 heures, suivi d'un séchage superficiel pour atteindre l'état saturé à surface sèche (SSD). Le coefficient d'absorption est le rapport, exprimé en pourcentage, entre l'augmentation de masse due à l'eau absorbée et la masse sèche initiale de l'échantillon [30]. De la même manière, l'absorption des éprouvettes de mortier ou béton, repose sur le même principe de différence de masse, à cela près qu'ici, la grandeur mesurée, est la porosité intergranulaire accessible à l'eau, en d'autres termes, la mesure d'absorption quantifie la porosité à l'état durci du matériau cimentaire qui subsiste dans le matériau après que les réactions d'hydratation du ciment se soient produites.

Dans cette optique, un essai d'absorption a été réalisé par **Abbas Oda DAWOOD** et **Ahmed Mjbel JABER** [24] sur des éprouvettes cubiques de béton contenant du sable de dune en substitution d'un sable classique (sans fibres d'acier), à 28 jours (figure I-22).

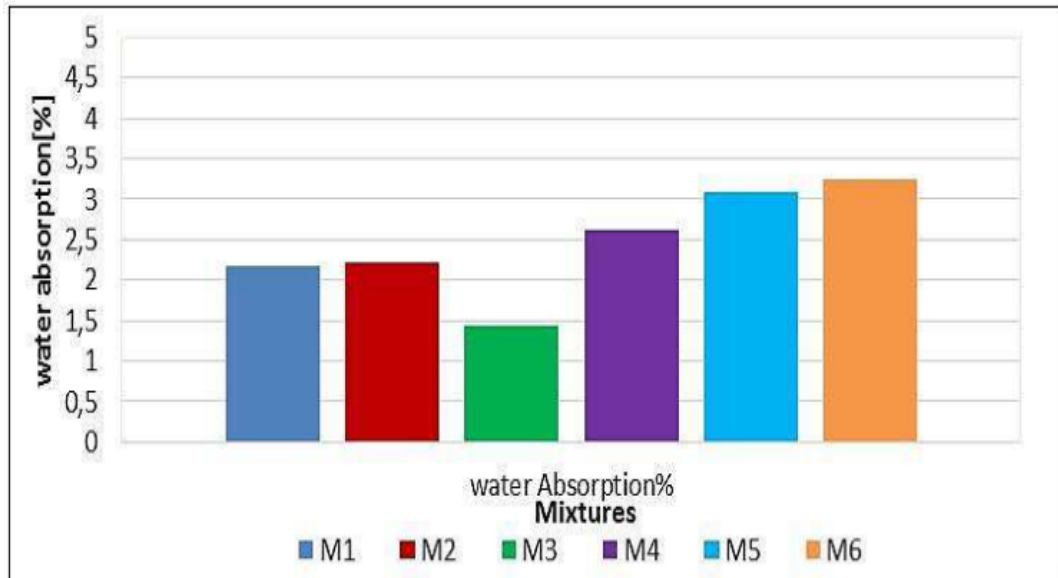


Figure I-22 : Relation entre le pourcentage d'absorption d'eau et les taux de substitution en sable de dune sans fibres d'acier [24].

Les résultats montrent que le mélange M3 contenant 40 % de sable de dune présente le taux d'absorption d'eau le plus faible (1,44 %), soit une réduction de 33,6 % par rapport au mélange de référence, ce qui est considéré comme un béton de bonne qualité (faible absorption).

Cependant, lorsque la teneur en sable de dune augmente à 60 %, 80 % et 100 %, le taux d'absorption d'eau augmente nettement. Pour les formulations contenant 80 % et 100 % de sable de dune, l'absorption est supérieure de 41,9 % et 49,3 % respectivement, ce qui correspond à un béton de qualité moyenne.

Cette augmentation du taux d'absorption est attribuée à la finesse des grains du sable de dune, qui favorise une plus grande adsorption de l'eau de gâchage conséquence d'un accroissement de la surface spécifique des granulats fins. Cela conduit à la formation de vides ou de pores à l'intérieur du mortier, responsables de l'augmentation de l'absorption.

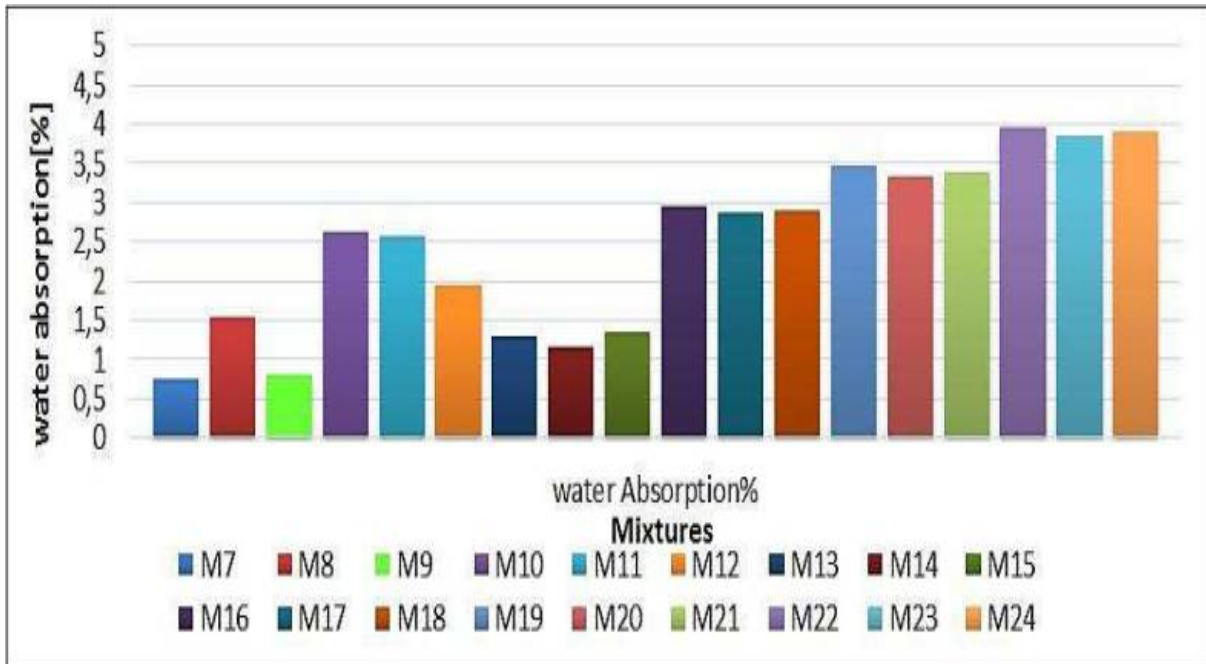


Figure I-23 : Relation entre l'absorption et les taux de substitution en sable de dune avec fibres d'acier [24].

Les résultats du béton renforcé de fibres, montrés en figure I-23, indiquent que le mélange hybride M9 (0 % sable de dune + 1 % fibres d'acier hybrides) présente le taux d'absorption d'eau le plus faible, comparé aux autres bétons hybrides contenant du sable de dune. Ce taux est également inférieur de 47 % à celui du mélange M8 (0 % sable de dune + 1 % fibres d'acier longues), ce qui classe ce béton comme étant de bonne qualité.

Soient les mélanges M15, M18, M21 et M24, ayant respectivement une teneur en sable de dune de 40 %, 60 %, 80 % et 100 %. Lorsque ce dernier augmente, les bétons hybrides renforcés par fibres d'acier montrent des taux d'absorption supérieurs à ceux contenant la même proportion de sable de dune mais renforcés uniquement par des fibres longues, et similaires à ceux avec fibres courtes. Par exemple, avec 100 % de sable de dune, le béton hybride renforcé atteint un taux d'absorption supérieur de 20,3 % à celui sans fibres, et 1,29 % supérieur à celui avec fibres longues, mais 1,76 % inférieur à celui avec fibres courtes.

Ces résultats montrent que l'absorption augmente avec la teneur en sable de dune, en raison de sa grande surface spécifique. Toutefois, l'ajout de fibres d'acier selon certaines configurations permettent de limiter cette augmentation, comme observé dans les mélanges avec 40 % ou 0 % de sable de dune [24].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude bibliographique portée sur la caractérisation et la valorisation du sable de dune en tant que composant des matériaux cimentaires. Ce type de sable, par sa granulométrie particulière, exerce une influence significative sur les propriétés des bétons et des mortiers, tant à l'état frais qu'à l'état durci. En effet, il impacte directement la résistance mécanique ainsi que la durabilité des matériaux, deux critères essentiels pour garantir la performance et la durée de vie des ouvrages. Les conclusions auxquelles ont fait aboutir cette étude bibliographique soulignent l'importance de considérer la nature et la granulométrie des sables utilisés dans la formulation des mélanges cimentaires afin d'optimiser leurs performances. À cet effet, au chapitre suivant, seront décrites des études portant sur des mortiers à base de sables de dunes d'origines différentes et en conséquence de granulométries différentes. Ces sables seront intégrés dans les formulations de mortiers en substitution d'un sable ordinaire de telle sorte que différentes valeurs de modules de finesse, fixés par avance soient obtenues. Des mélanges incluant des additions minérales actives ou inertes seront aussi étudiés dans le but d'investiguer leur potentiel améliorateur de résistance mécanique ou plutôt dans le cas des mortiers de sable de dune, réducteur de baisse de résistance.

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

II.1 Introduction

Les mortiers formulés à partir de sable de dune et de sable concassé représentent des matériaux de construction innovants, dont l'utilisation requiert une connaissance approfondie de leurs différentes propriétés. Ce chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques des matériaux employés dans le cadre de ce projet de recherche, ainsi qu'à la description des divers essais expérimentaux réalisés. Afin d'analyser les propriétés physiques et mécaniques de ces mortiers, une série d'essais a été menée au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri. Cette démarche vise à évaluer le comportement de ces matériaux et leur aptitude à répondre aux exigences des applications en construction.

II.2 Matériaux utilisés

Durant le travail de recherche, un certain nombre de matériaux ont été utilisé :

- Ciment CEM II/B-L 42.5 N fabriqué par Lafarge.
- Sable de dune provenant de Touggourt
- Sable de dune provenant de Bou-Sâada
- Fumée de silice
- Chaux hydratée
- Eau de gâchage
- Ciment

II.2.1 Ciment

Le ciment sélectionné pour la formulation du mortier étudié est un ciment CEM II/B-L 42,5 N, produit par Lafarge sous l'appellation commerciale Mâtine. Ce liant hydraulique répond aux exigences de la norme algérienne NA 442-2013 [34] et présente une masse volumique absolue de 3100 kg/m³.

Les différentes caractéristique chimiques, minéralogiques, physiques, telles que fournies par la fiche technique des fabricants sont montrer dans la figure II-1.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

Valeur	
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

Valeur	
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

• Propriétés physiques

Valeur	
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

• Temps de prise à 20° (NA 230)

Valeur	
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Résistance à la compression

Valeur	
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

- 1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.
- 2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.

Conditionnement: /

LAFARGE ALGÉRIE
 Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
 les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
 tél: + 213 (0) 21 98 54 54
 Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
 www.lafargealgerie.com
 dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
 Tél: 021 98 55 55

Figure II-2: Caractéristiques techniques du ciment utilisé.

II.2.2 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la formulation des mortiers au sein du laboratoire de béton de l'Université Mouloud Mammeri provient du réseau d'alimentation en eau potable de la ville de Tizi-Ouzou. Cette eau est considérée comme propre à la consommation humaine, et adéquate comme eau de gâchage pour mortier.

II.2.3 Fumée de silice

La fumée de silice employée dans le cadre de cette étude présente une coloration grise et une structure de type condensé. Elle provient d'une cimenterie Lafarge située dans le sud de l'Algérie.

Cette fumée de silice présente une teneur en oxyde de silice (SiO₂) supérieure à 95%. Sa masse volumique est de 2300 kg/m³.



Figure II-3: Fumée de silice condensée utilisée.

II.2.4 Chaux hydratée

La chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utilisée dans cette étude, disponible dans le commerce, a pour avantage, hormis son prix abordable, la capacité d'améliorer la résistance mécanique des mortiers [21] .en favorisant la réaction pouzzolanique par réaction avec la fumée de silice ajoutée. Cette chaux hydratée se caractérise par une masse volumique de $\rho = 600 - 900 \text{ Kg/m}^3$.



Figure II-4: chaux hydratée utilisée.

II.2.5 Sable

Dans cette étude nous avons utilisé 3 types de sable, deux sables de dune, le premier originaire de la région de Touggourt (Figure.II.4. a) et le second originaire de la région Bou-Sâada (Figure. II.4.b) et enfin un sable de carrière concassé originaire de la région de Tizi-Ouzou (Figure. II.5).



Figure II-5: Sable de dune de Touggourt (a) et sable de dune de Bou-Sâada (b).



Figure II-6: Sable de carrière concassé

II.3 Caractéristiques physiques des sables

II.3.1 Granulométrie

L'analyse granulométrique est une méthode normalisée ayant pour objectif de quantifier la distribution dimensionnelle des particules constitutives d'un matériau granulaire, tels que les sables, graviers ou granulats. Cette caractérisation est primordiale pour appréhender les propriétés physico-mécaniques et optimiser les performances techniques des matériaux de construction.

La méthode d'analyse granulométrique décrite ci-après, repose sur les recommandations des normes NA-2607 [35] et repose sur le passage d'un échantillon représentatif à travers une série de tamis calibrés (mailles décroissantes), suivie de la pesée des refus à chaque étape. Cette procédure permet de calculer les pourcentages cumulés de particules retenues (refus) et passantes (tamisâts), générant une courbe granulométrique caractéristique du matériau.

L'opération de tamisage s'effectue à l'aide d'une tamiseuse électrique, constituée d'un cadre rigide équipé d'un anneau inférieur sur lequel est empilée une série de tamis normalisés (ouvertures décroissantes de haut en bas). Ce montage permet une séparation granulométrique standardisée des particules sous l'effet de vibrations contrôlées.

Après l'empilement des tamis, l'ensemble est fixé rigidement au cadre de la tamiseuse via une couronne supérieure, mécanisme de serrage équipé de deux jeux de ressorts et de vis de blocage. Ce dispositif garantit une stabilité mécanique optimale pendant les vibrations, évitant tout déplacement des tamis qui pourrait fausser les résultats.

Une fois le dispositif assemblé et verrouillé, l'échantillon de sable est déposé sur le tamis supérieur (maille la plus large). La vibration mécanique de la colonne de tamis provoque alors l'arrangement et le classement granulométrique des particules par effet de ségrégation dimensionnelle, les grains les plus gros étant retenus sur les tamis supérieurs, tandis que les plus fins migrent vers les mailles inférieures.

Le mouvement vibratoire et les chocs induits par la tamiseuse génèrent un réarrangement dynamique des particules de sable, conduisant à un tri granulométrique précis : les grains supérieurs à la maille d'un tamis donné y sont retenus, tandis que les inférieurs migrent vers les tamis inférieurs. Ce mécanisme permet une séparation dimensionnelle progressive jusqu'à la maille la plus fine, où les particules résiduelles sont collectées.



Les résultats de l'analyse granulométrique pour les différents sables : sable concassé (SC), sable de dune de Touggourt (SDT) et sable de dune de Bou-Sâada (SDB) sont présentés ci-après Tableau II-1 ; Tableau II-2 et Tableau II-3, ainsi que les courbes granulométriques finales Figure. II.7.

➤ **Sable concassé**

Tableau II-1: Analyse granulométrique par tamisage du sable concassé (SC).

Tamis(mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus Cumulés (%)	Tamisats cumules (%)
5				
2,5				
1,25				
0,63				
0,315				
0,16				
0,08				
Fond				

➤ **Sable de dune Touggourt**

Tableau II-2: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune de Touggourt (SDT).

Tamis(mm)	Refus(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5				
2,5				
1,25				
0,63				
0,315				
0,16				
0,08				
Fond				

➤ **Sable de dune de Bou Saada**

Tableau II-3: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune Bou-Sâada (SDB).

Tamis(mm)	Refus(g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5				
2,5				
1,25				
0,63				
0,315				
0,16				
0,08				
Fond				

➤ **Courbes granulométriques.**

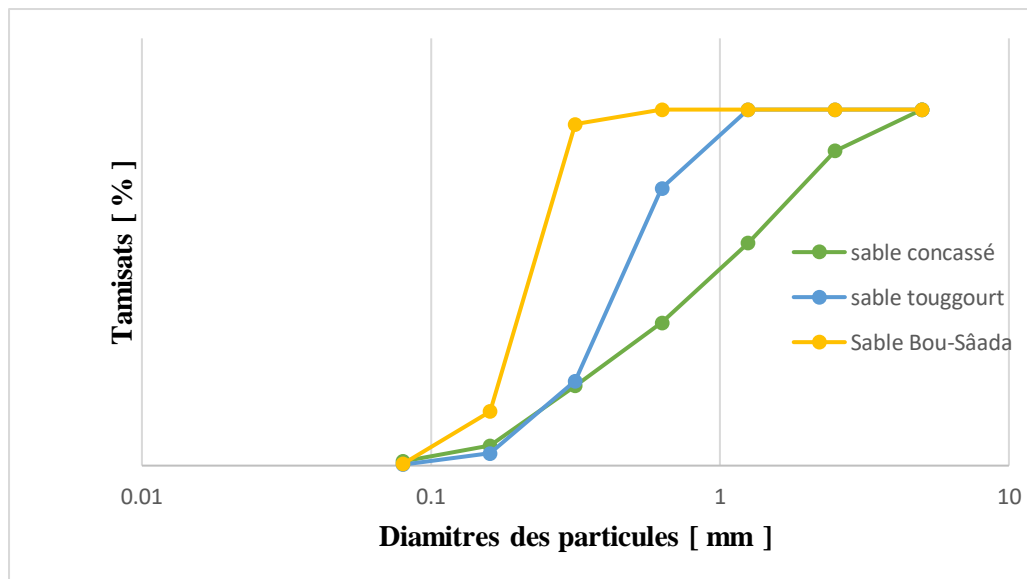


Figure II-8: Courbes Granulométriques des différents sables.

Les courbes granulométriques montrent que le sable de Bou Sâada contient une plus grande proportion de particules fines. Le sable de Touggourt, bien qu'également fin, présente un peu plus de particules grossières. Le sable concassé se caractérise quant à lui, par une distribution plus large avec davantage de grains grossiers.

II.4 Module de finesse

Les sables doivent posséder une granulométrie équilibrée, avec une proportion d'éléments fins ni trop élevée ni trop faible. Un excès de particules fines entraîne une augmentation du besoin en eau dans le mortier, tandis qu'un sable trop grossier réduit la plasticité du mélange, compliquant ainsi son application.

Le degré de finesse d'un sable se mesure par le module de finesse, un indicateur qui permet d'évaluer la distribution granulométrique et d'assurer une formulation optimale du mortier.

Selon la norme algérienne NA-5113 [36] équivalente à la norme européenne EN-12620 [37], le module de finesse est égal au 1/100ème 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

$$M_F = \frac{1}{100} \times \sum(R_i)$$

Où R_i représente les pourcentages cumulés des refus sur une série de tamis normalisés, correspondant aux ouvertures en ordre décroissant 5 de mm, 2,5 mm, 1,25 mm, 0,63 mm, 0,315 mm et 0,16 mm. En pratique, on additionne les pourcentages cumulés de matériau retenu sur ces tamis, puis on divise la somme par 100 pour obtenir le module de finesse. Ainsi, selon le module de finesse, un sable peut être défini, selon le Tableau II-4. Comme étant :

Tableau II-4: Module de finesse du sable.

Granulats	Spécifications
Module de finesse M_f	<p>$1.8 < M_f < 2.2$: le sable est à majorité de grains fins.</p> <p>$2.2 < M_f < 2.8$: le sable est moyen.</p> <p>$2.8 < M_f < 3.3$: le sable est grossier.</p>

II.4.1 Module de finesse des différents sables utilisés

La mesure du module de finesse des sables utilisés dans notre étude est présentée dans le Tableau II-5.

Tableau II-5: Résultats de module de finesse des sables.

Module de finesse		
Sable de Bou Sâada	$M_f =$	
Sable de Touggourt	$M_f =$	
Sable concassé	$M_f =$	

À partir du tableau précédent, nous pouvons décrire les deux sables de dune (Bou Sâada et Touggourt) comme étant des sables fins, voire très fin dans le cas du sable de Bou Sâada, tandis que le sable de carrière concassé est un sable grossier, à la limite d'un sable idéalement gradué.

II.5 Masses volumiques des sables

II.5.1 Masse volumique apparente ρ_{app}

La masse volumique apparente d'un matériau correspond à la masse d'un mètre cube de ce matériau en vrac, incluant les vides entre ses particules.

La masse volumique apparente d'un matériau varie selon qu'il est compacté ou non, toujours en intégrant les vides entre ses particules.

Pour déterminer la masse volumique apparente du sables norme NF P 18-555 [38], nous avons suivi les étapes ci-après :

- Préparation d'un récipient étalonné de volume connu (illustré en Figure. II.8).
- Pesage du récipient vide avec précision à l'aide d'une balance.
- Remplissage du récipient en versant le sable lentement, en laissant le matériau se tasser naturellement sans compaction forcée.
- Nivellement de la surface à l'aide d'une spatule pour éliminer les excès et obtenir une surface plane.
- Mesure de la masse totale du récipient rempli.
- Calcul de la masse du sable par soustraction (masse totale – masse du récipient vide).
- Détermination du volume à partir des dimensions géométriques du récipient



Figure II-9: Essai de la détermination de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente se détermine comme indiqué par l'équation

$$\rho_{app} = \frac{m}{V_{tot}}$$

m : est la masse du matériau sec (en kg).

V : st le volume total apparent du matériau (m^3), comprenant les grains solides et les espaces vides entre eux.

Tableau II-6: masses volumiques apparentes des sables de dune et concassé

Type de sable	Sable concassé	Sable Touggourt	Sable Bou Saada
ρ_{app} (kg/m^3)			

II.5.2 Masse volumique absolues des sables utilisés

La masse volumique absolue ρ_{app} correspond à la masse de la matière constituant le granulat par unité de volume, en excluant les vides présents à l'intérieur ou entre les grains.

Elle se détermine selon les étapes suivantes :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_0 d'eau.
- Peser un échantillon ($M_{sec} = g$) de sable et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume V_1 comme le montre la Figure II-9.



Figure II-10: Essai de détermination de la masse volumique absolue

La masse volumique absolue se détermine par l'équation ci-dessous

$$\rho_{abs} = \frac{\text{masse des grains}}{\text{volume totale} - \text{volume d'eau}} = \frac{M}{V_1 - V_0}$$

Avec :

ρ_{abs} : la masse volumique absolue

M : masse des grains

V0 : volume de l'eau

V1 : volume de l'eau plus les grains

A l'issue des essais, les masses volumiques absolues sont obtenues, et résumées dans le tableau II.7.

Tableau II-7: masses volumiques absolue des sables de dune et concassé

Type de sable	Sable concassé	Sable Touggourt	Sable Bou Saada
ρ_{abs} (kg/m ³)			

II.5.3 Equivalent de sable

Cet essai permet d'évaluer la propreté du sable en mesurant la valeur de l'E.S., ou équivalent de sable sous piston, qui correspond au pourcentage de fines qu'il contient. Une absence totale de fines empêche d'obtenir un béton ou un mortier bien compacté, tandis qu'un excès de fines est préjudiciable car il augmente la quantité d'eau nécessaire, ce qui élève le rapport eau/ciment (E/C) et réduit la résistance du matériau.

Pour réaliser cet essai, on utilise une éprouvette graduée ou, à défaut, un récipient à fond plat. On commence par remplir l'éprouvette d'eau jusqu'à environ un tiers de sa hauteur (repère N°1 sur l'éprouvette), puis on y introduit 120 g de sable. Après quelques minutes de repos, on ferme hermétiquement le récipient, puis on l'agite horizontalement, généralement 90 fois en une minute. Ensuite, on complète l'éprouvette avec de l'eau jusqu'au repère N°2, puis on laisse reposer le mélange pendant 20 minutes avant de procéder aux mesures.

L'essai a été réalisé conformément à la norme EN 933-8 [39], et l'indice d'équivalent sable est calculé à partir de la relation suivante :

$$E.S(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

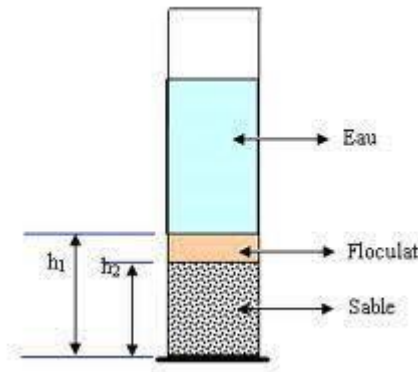


Figure II-11: Illustration de l'appareillage de mesure de l'E.S.

Avec :

La hauteur h1 : sable + éléments fins (flocculat).

La hauteur h2 : sable seulement.

L'essai d'équivalent de sable, utilisé au laboratoire a été mené sous piston, c'est-à-dire que la mesure finale des différentes hauteurs a été menée sous l'effet d'un piston, dont le but est de comprimer les différentes couches de matériau, réduisant l'effet de la variation de compacité du sable.

Cet essai d'E.S. permettant d'évaluer la propreté des sables utilisés dans les mélanges de béton et de mortier selon la classification du Tableau II-7, a abouti aux résultats présentés dans le Tableau II-8.

Tableau II-8: Les valeurs d'équivalent de sable indiquant la nature et qualité du sable.

La valeur de E. S	Nature et qualité du sable
$E_s < 60\%$	Sable argileux, à rejeter pour des bétons de qualité en raison des risques de retrait ou de gonflement.
$60\% \leq E_s < 70\%$	Sable légèrement argileux, admissible pour des bétons courants.
$70\% \leq E_s < 80\%$	Sable propre, parfaitement adapté aux bétons de qualité.
$E_s \geq 80\%$	Sable très propre, mais pouvant entraîner un défaut de plasticité.

L'essai a été effectué pour les trois types de sable afin de comparer leur propreté et leur adéquation pour la fabrication de béton et du mortier.

Tableau II-9: Résultat de l'essai E.S.

Equivalent de sable				
Sable de Touggourt	H1 = cm H2 = cm	Es = %	Es	Sable très propre. La quasi-absence de particules fines argileuses peut entraîner un manque de plasticité du béton, qu'il sera nécessaire de compenser par une augmentation de la quantité d'eau utilisée.
Sable de Bou Sâada	H1 = cm H2 = cm	Es = %	Es	
Sable Concassé	H1 = cm H2 = cm	Es = %	Es	



Figure II-12: Essai de l'Équivalent de Sable tel que mené au niveau du laboratoire béton-UMMTO.

II.6 Formulation des mortiers

Dans cette section, nous avons réalisé plusieurs mélanges de sables ayant différentes valeurs de module de finesse (M_f), afin d'étudier leur effet sur les propriétés des mortiers. Pour cela, nous avons utilisé deux types de sable de dune, l'un provenant de Touggourt et l'autre de Bou Sâada, que nous avons mélangés avec un sable concassé.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de la masse volumique absolue et apparente des différentes variantes de mélanges de sables utilisées :

Tableau II-10: Masses volumiques apparentes et spécifiques et équivalent de sable utilisé.

M_f	$M_f =$	$M_f =$	$M_f =$	$M_f =$
Sable				
$\rho_{app}(\text{kg/m}^3)$				
$\rho_{abs}(\text{kg/m}^3)$				
E.S.				

Dans le cadre de cette étude des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ et cubiques $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ont été confectionnées. Trois types de sables ont été utilisés : un sable de carrière concassée, un sable de dune originaire de Touggourt et un autre originaire de Bou Sâada.



Figure II-13: Principe de la confection des mortiers.

A cet effet, nous avons confectionné 3 formulations de mortier différentes. Chaque mortier est lui-même constitué de 8 mélanges de sables (dune et concassée) à différents dosages. Le 1^{er} mortier (MT) est un mortier témoin sans additif, Le 2^{ème} mortier (MFS) est constitué d'un mortier à base de fumée de silice, dans lequel % de la quantité de ciment ont été remplacés par de la fumée de silice. Le 3^{ème} mortier (M-CH-FS) est constitué du mortier à base de fumée de silice et de chaux hydratée, dans lequel % de la quantité de ciment a été remplacée par un mélange fait de (% de fumée de silice et % de chaux hydratée).

En utilisant le calcul du module de finesse M_f global ($M_f = ; ; ;$) par la loi d'Abrams, nous avons pu déterminer les différentes quantités de sable à peser entre le sable concassée et les différents sables de dune (Bou Sâada et Touggourt).

Les tableaux suivants nous résument en conséquence, les compositions des mortiers adoptées

Tableau II-11: Formulation des éprouvettes prismatiques avec et sans FS

	SC	SD1	SD2	Ciment	Eau	FS
M						
M						
M						
M-T						
M-B						
M-T						
M-B						
M-T						
M-B						
M-T						
M-B						
M-FS						
M-FS						
M-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						

SC : sable concassé

SD1 : sable Touggourt

SD2 : sable Bou Sâada

FS : Fumée de silice

Tableau II-12: Formulation des éprouvettes prismatiques avec CH et FS.

	SC	SD1	SD2	Ciment	Eau	CH	FS
M0-CH-FS							
M-CH-FS							
M-CH-FS							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							

Tableau II-13: Formulation des éprouvettes cubiques avec et sans FS.

	SC	SD1	SD2	Ciment	Eau	FS
M						
M						
M						
M-T						
M-B						
M-T						
M-B						
M-T						
M-B						
M-T						
M-B						
M-FS						
M-FS						
M-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						
M-T-FS						
M-B-FS						

Tableau II-14: Formulation des éprouvettes cubiques avec CH et FS.

	SC	SD1	SD2	Ciment	Eau	CH	FS
M-CH-FS							
M-CH-FS							
M-CH-FS							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							
M-T-CH-FC							
M-B-CH-FC							

Remarque : concernant les formulations M-FS et M-FS-CH on leu ajoute % de superplastifiant

Préparation des éprouvettes :

La préparation des éprouvettes de mortier a été effectuée selon la norme NF EN 196-1 [40]., qui stipule que le mélange doit être malaxé à l'aide d'un malaxeur à deux vitesses pendant une durée totale de 3 minutes.

Selon la norme, le protocole de malaxage doit s'effectuer comme suit :

- Verser le ciment dans le bol du malaxeur, puis ajouter l'eau.
- Mélanger à vitesse lente pendant 30 secondes.
- Incorporer progressivement le sable sur une durée de 30 secondes.
- Continuer le malaxage à vitesse rapide pendant 30 secondes supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur durant 30 secondes afin de racler les parois du bol
- Remettre le malaxeur en marche à vitesse rapide pendant 1 minute.

Après le malaxage, le mortier est versé dans des moules en acier, puis recouvert de sachets en plastique. Les moules sont ensuite conservés au laboratoire pendant 24 heures.

À l'issue de cette première phase de durcissement de 24 heures, les éprouvettes sont démoulées puis immergées dans de l'eau à température ambiante jusqu'au jour des essais.

Ce protocole standardisé de préparation des éprouvettes de mortier a pour objectif de garantir la reproductibilité des mélanges ainsi que la fiabilité des résultats lors des tests ultérieurs.

II.7 Essai de caractérisation du mortier

Au terme de 28 jours de cure, les éprouvettes de mortier ont été soumises à une série d'essais non destructifs et destructifs afin d'évaluer leurs propriétés physiques et mécaniques.

II.7.1 Tests non destructifs

Mesures d'absorption d'eau : ces tests permettent de quantifier la capacité du mortier à absorber l'eau, un indicateur directement lié à sa porosité et, par conséquent, à sa durabilité.

Mesures des vitesses acoustiques : ces essais non destructifs fournissent des informations sur la compacité et l'homogénéité du matériau.

II.7.2 Tests destructifs

Essai de résistance à la traction par flexion : cet essai mécanique permet de déterminer la résistance du mortier à la traction, un paramètre essentiel pour apprécier sa capacité à supporter les sollicitations en traction.

Essai de résistance en compression : cet essai standard permet de mesurer la résistance du mortier à la compression, une caractéristique fondamentale pour son usage dans le secteur du bâtiment.

L'ensemble de ces essais, alliant méthodes non destructives et destructives, permet d'obtenir une évaluation approfondie des performances physiques et mécaniques du mortier composé de sable de dune et de sable Concassé, après 28 jours de durcissement.

Les résultats obtenus permettront d'analyser les performances de ces mortiers élaborés à partir des deux sables de dune à faible impact environnemental, utilisés seuls, ou conjointement, et de les comparer à celles des mêmes mortiers optimisés par l'ajout de fumée de silice et/ou de chaux hydratée

La démarche expérimentale objet de ce mémoire, a pour objectif de fournir des éclaircissements sur la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de ce mortier innovant dans le domaine de la construction.

II.7.3 Mesure de vitesse ultrason

L'auscultation par ultrasons est une technique non destructive employée pour évaluer l'homogénéité du béton, conformément aux normes NF EN 12504-4 [41] et ASTM C597 [42].

Cette méthode repose sur la mesure du temps de propagation des ondes longitudinales (ondes de compression) à travers un élément en béton ou en mortier sur une distance déterminée.

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores est affectée par divers facteurs, notamment l'âge du béton, son taux d'humidité, le rapport granulats/ciment, le type de granulats, ainsi que la présence d'armatures ou de fissures. L'analyse de ces vitesses permet ainsi d'évaluer l'intégrité et la qualité du béton sans endommager sa structure.



Figure II-14: Mesure de la vitesse ultrasonore.

Dans le cadre de cette étude, l'appareil de mesure ultrasonore utilisé est le Pundit Lab, qui comprend les éléments suivants :

- Un testeur ultrasonique, assurant la génération et la réception des ondes.
- Deux transducteurs, un émetteur et un récepteur, positionnés de part et d'autre de l'éprouvette.
- Une barre de calibrage, utilisée comme référence pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil avant chaque mesure.
- Deux câbles de connexion de 1,5 m, reliant les transducteurs au testeur.
- Un gel de contact, facilitant le couplage entre les transducteurs et la surface de l'éprouvette.
- Une centrale d'acquisition des données, qui enregistre les temps de propagation mesurés.

Cette méthode non destructive permet d'évaluer l'homogénéité, et la qualité du mortier composé de sable de dune et de sable concassé, et de fournir des indications sur la compacité souvent associée à la résistance mécanique.

II.7.4 Principe de mesure

L'appareil à ultrasons produit des ondes ou impulsions ultrasonores, transmises au mortier via un transducteur en contact avec la surface de l'éprouvette. Le temps de propagation de ces ondes à travers le mortier est ensuite mesuré et affiché sur l'écran numérique de l'appareil ou enregistré par un logiciel spécialisé.

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores mesurée permet alors de classer la qualité du matériau cimentaire (souvent du béton) selon le barème suivant :

Tableau II-15: Classification de la qualité des bétons selon la vitesse ultrasonore

Vitesse de propagation [m/s]	Qualité du mortier
> 4575	Excellente
3600 à 4575	Bonne
3050 à 3660	Douteuse
2135 à 3050	Mauvaise
< à 2135	Très mauvaise

Ce classement peut être utilisé comme une indication sur l'homogénéité et la densité du matériau cimentaire en général ou mortier dans notre cas. Une vitesse de propagation élevée reflète généralement une porosité réduite et une bonne compaction du matériau, ce qui atteste d'une qualité supérieure.

II.8 Absorption

L'absorption d'eau des éprouvettes de mortier a été évaluée conformément à la norme ASTM C1585-11 [43]. Cet essai permet de mesurer la capacité du matériau à absorber l'eau, un indicateur de sa porosité et de sa durabilité. Pour ce faire, des éprouvettes cubiques de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ont été préparées et conservées en immersion dans l'eau pendant 28 jours afin d'évaluer, à saturation, la porosité accessible à l'eau des différentes formulations de mortier.

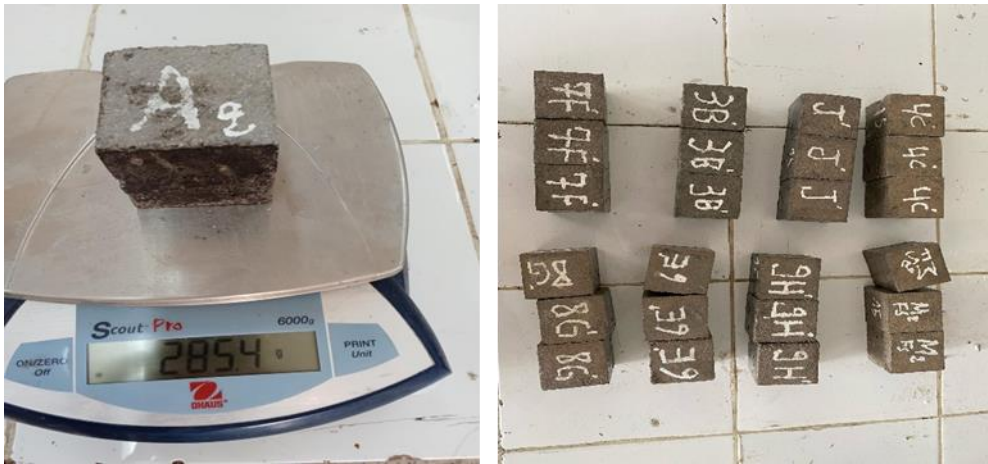


Figure II-15: Éprouvettes cubiques utilisées pour l'absorption.

Le protocole expérimental s'est déroulé en plusieurs étapes :

- Mesure d'abord de la masse à l'air des éprouvettes saturées en eau.
- Séchage en étuve à 105°C pendant 24 heures.
- Mesure à l'état sec de la masse à l'air de l'éprouvette.

II.9 Résistance à la traction par flexion

L'essai de résistance à la traction par flexion, effectué selon un dispositif en trois points, permet d'évaluer indirectement la capacité du matériau, ici le mortier, à résister à la rupture sous sollicitation en traction.



Figure II-16: Test de résistance à la flexion.

Le principe de l'essai est le suivant :

- Les éprouvettes de mortier, aux dimensions normalisées, sont placées sur deux appuis distants de 10cm.
- Une force est appliquée au centre de la face supérieure de l'éprouvette.
- Sous cette sollicitation en flexion, des contraintes de traction se développent dans la partie inférieure de l'éprouvette.
- L'essai se poursuit jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne sa résistance maximale et se fracture.

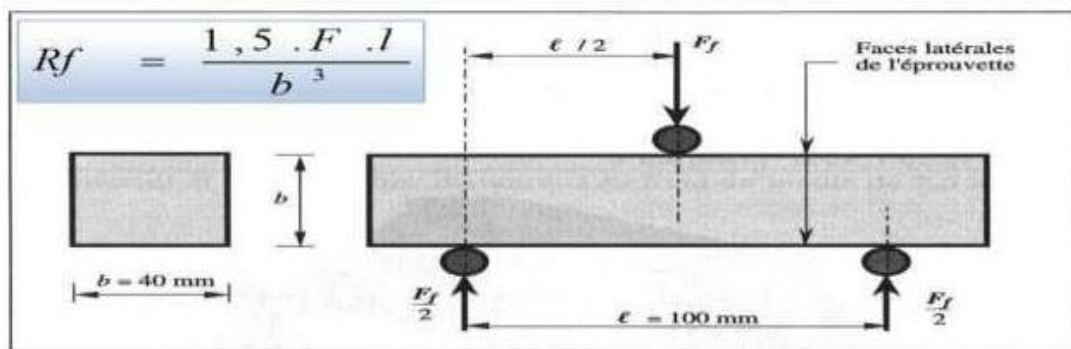


Figure II-17: Principe de l'essai de flexion 3 points.

La résistance à la traction par flexion est déterminée à partir de la valeur maximale de la force appliquée ainsi que des dimensions de l'éprouvette. Cet essai mécanique destructif permet d'évaluer une propriété essentielle du mortier : sa capacité à résister aux efforts de traction, un critère crucial pour les applications en construction. Les résultats obtenus sur le mortier à base de sable de dune et de sable concassée, seuls ou renforcés par fumée de silice et chaux hydratée, seront analysés afin d'identifier les avantages ou les limites de cette formulation innovante. Le schéma de principe de l'essai de flexion en 3 points ainsi que la formule de calcul de la résistance à la traction par flexion sont présentés dans la Figure II.16.

II.10 Résistance à la compression

Il s'agit d'une propriété permettant d'apprécier les performances du matériau pour son utilisation dans le domaine de la construction, où un élément structural est principalement soumis à des efforts de compression. Cette résistance à la compression est obtenue après l'essai de résistance à la traction par flexion, sur les demi-éprouvettes de mortier fendues. Chaque demi-éprouvette ou demi-prisme, présentant des faces de moulage lisses, est positionné entre deux plaques métalliques rigides sur une surface de contact de 40 x 40 mm². Une force croissante est appliquée axialement jusqu'à la rupture de l'échantillon, permettant de mesurer sa résistance maximale en compression.

Les résultats de l'essai de compression, associés à ceux de la résistance à la traction par flexion, permettent d'obtenir une évaluation complète des caractéristiques mécaniques du mortier fabriqué à partir du sable de dune et de sable concassé.

La confrontation de ces résultats avec ceux d'un mortier de référence (contenant un sable d'une seule origine) permettra de mettre en évidence les bénéfices ainsi que les éventuelles contraintes de cette formulation innovante combinant, deux sables différents, mais aussi des additions minérales nommément la fumée de silice et la chaux hydratée.



Figure II-18 : Test de résistance à la compression.

II.11 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description détaillée de toute la partie expérimentale, en commençant par la caractérisation des différents constituants, ainsi que les essais réalisés sur nos mortiers. Cette étape est essentielle pour comprendre clairement le comportement du mortier à un âge avancé. Les divers résultats obtenus à l'issue de nos tests en laboratoire sur les mortiers à base de sable de dune et de sable concassé sont ensuite illustrés et analysés dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux issus des différents essais réalisés sur les mortiers élaborés à partir de sable de dune et de sable de carrière concassé.

Durant l'étude, nous avons élaboré trois types de mortiers : un mortier témoin sans additifs, un mortier contenant que la fumée de silice, un autre additionné de fumée de silice et chaux hydratée. Pour chaque formulation, trois éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) et trois éprouvettes cubiques ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$) ont été préparées, chacune étant soumise à des essais spécifiques tels que décrits dans le chapitre 2.

III.2 Effet de sable de Touggourt sur caractéristiques des mortiers

III.2.1 Effet sur la Résistance à la compression

Les résultats obtenus à l'issue de l'essai mécanique destructif sous presse hydraulique sont présentés en (Figure. III.1)

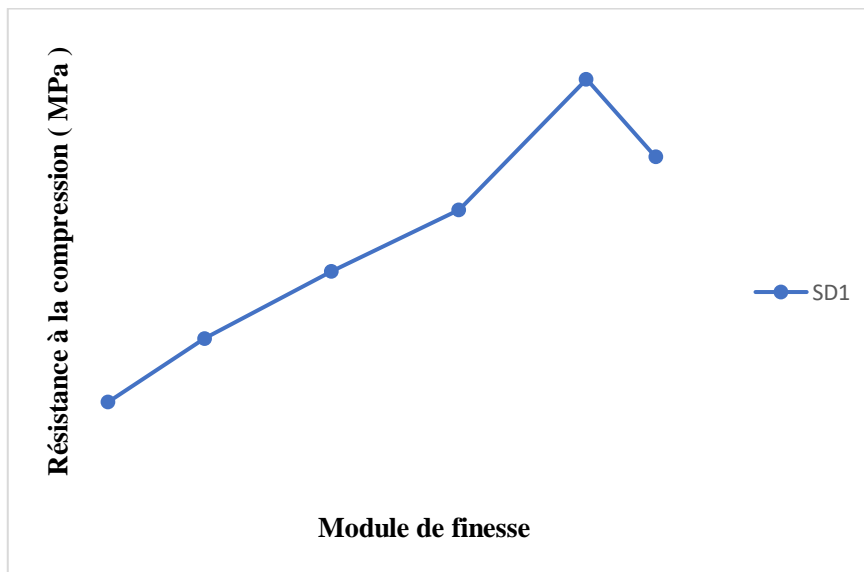


Figure III-1 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de Touggourt

Nous pouvons observer que la résistance à la compression du mortier formulé à base du sable de Touggourt augmente progressivement avec l'évolution du module de finesse, atteignant un maximum de MPa pour un module de finesse de , puis diminue pour des valeurs supérieures.

III.2.2 Effet sur la Résistance à la traction

À l'issue de l'essai mécanique de flexion 3 points, les résultats présentés en (Figure. III.2) ont été obtenus.

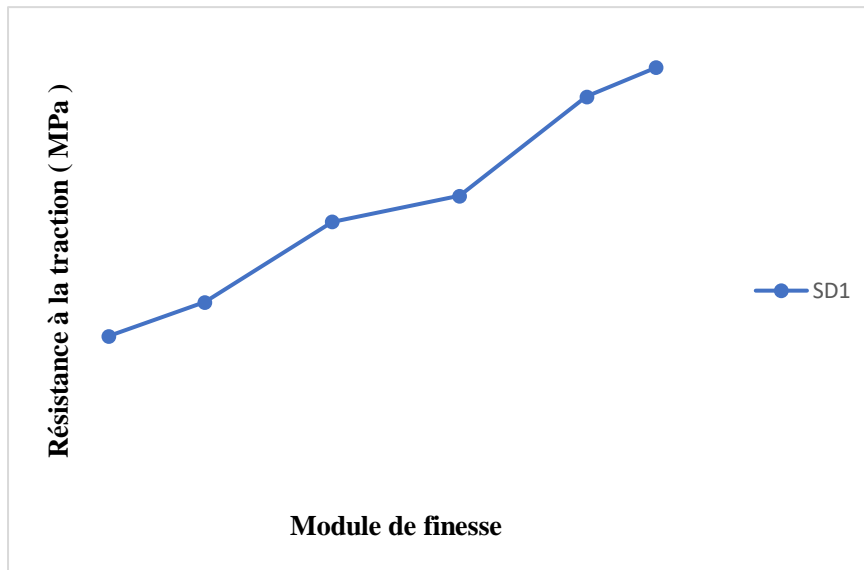


Figure III-2 : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de Touggourt.

Nous observons à partir de ces résultats que la résistance à la traction du mortier suit quasiment la même trajectoire que pour le cas de la résistance à la compression, en augmentant régulièrement avec le module de finesse global du mélange de sables.

III.2.3 Effet sur l'absorption d'eau

Les observations effectuées sur les essais d'absorption à l'eau des éprouvettes de mortier sont résumées à la figure III.3.

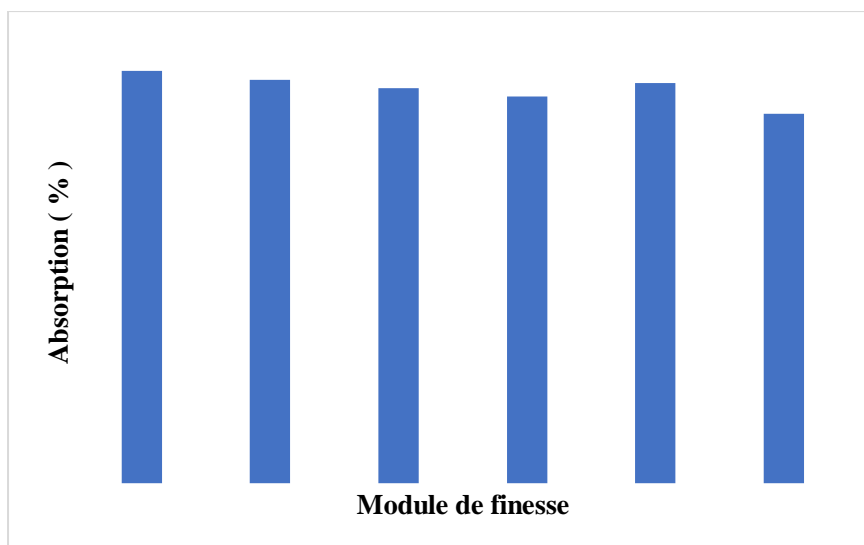


Figure III-3: Absorption d'eau des mortiers à base de sable de Touggourt

L'étude des taux d'absorption du mortier menée sur les éprouvettes cubiques à 28 jours, montre que celle-ci diminue très légèrement lorsque le module de finesse du sable de Touggourt augmente.

III.2.4 Effet sur les vitesses ultrasonores

Les résultats des essais à l'appareil à ultrasons sont présentés à la figure III.4.

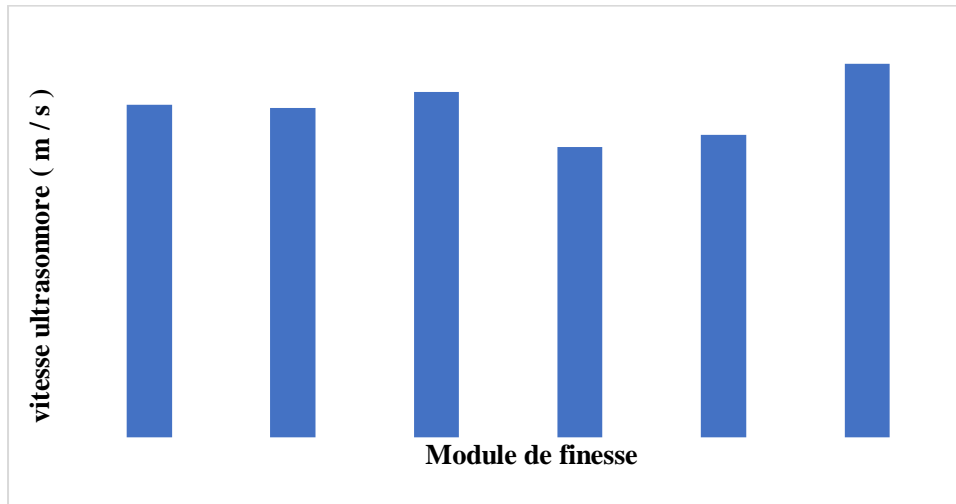


Figure III-4: Vitesse ultrasonore des mortiers à base de sable de Touggourt

Les résultats de la figure III.4 indiquent que la vitesse ultrasonique à travers les mortiers montre un profil en dents de scie à mesure que le module de finesse global du mélange de sables augmente.

III.3 Effet du sable Bou-Sâada sur les caractéristiques des mortiers

III.3.1 Effet sur la résistance à la compression

Les résultats obtenus à l'issue de l'essai mécanique destructif de compression sont résumés en (Figure. III.5)

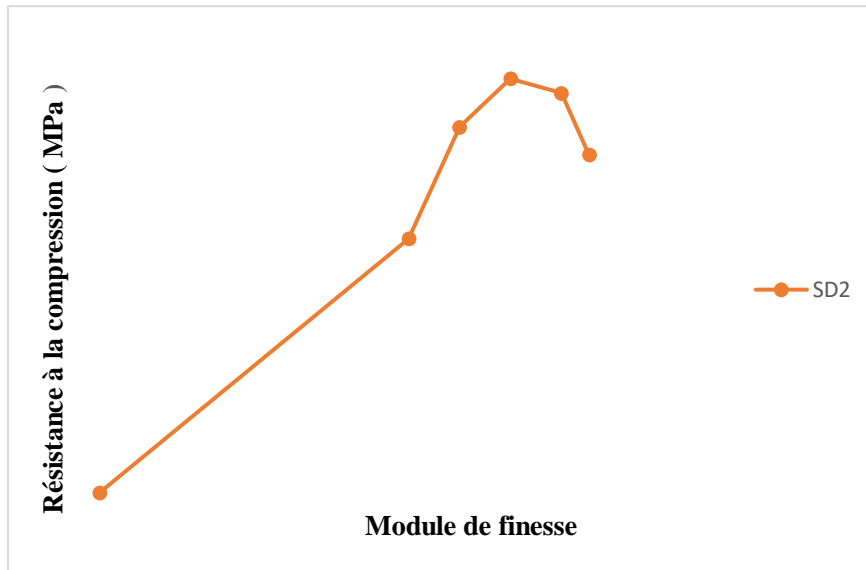


Figure III-5 : Résistance à la compression des mortiers à base de sable de Bou-Sâada

Les résultats ci-dessus montrent que la résistance à la compression du mortier augmente nettement avec l’augmentation du module de finesse global du mélange de sables, atteignant un maximum de MPa pour un module de finesse du mélange de .

III.3.2 Effet sur la résistance à la traction

Les résultats obtenus à l’issue de l’essai de traction par sont montrés dans la Figure. III.6

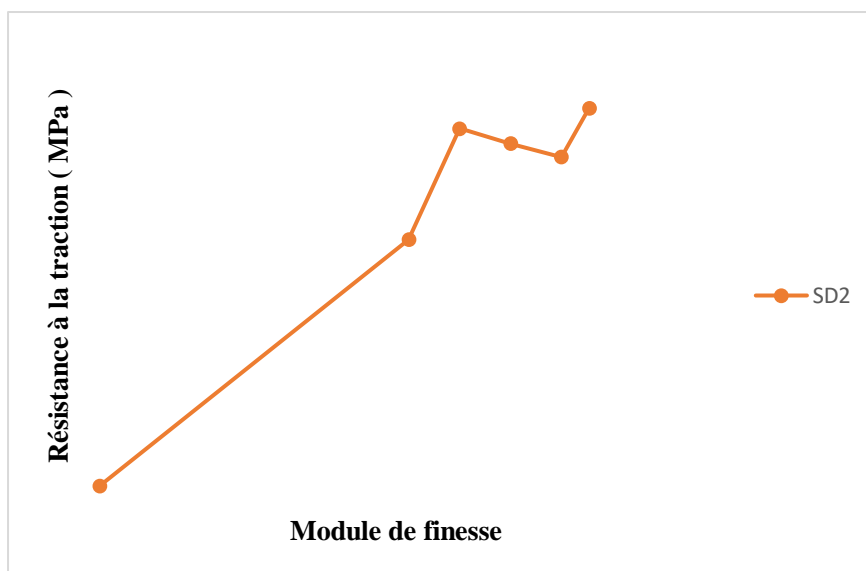


Figure III-6 : Résistance à la traction des mortiers à base de sable de Bou-Sâada.

La résistance à la traction de mortiers à base de sable Bou-Sâada augmente globalement avec le module de finesse global des sables les constituant, passant de MPa pour un module de (sable contenant % de SD2) à un maximum de MPa pour un module de finesse de .

III.3.3 Effet sur l'absorption d'eau

Les observations effectuées sur les essais d'absorption à l'eau des éprouvettes de mortier sont montrées à la figure. III.7.

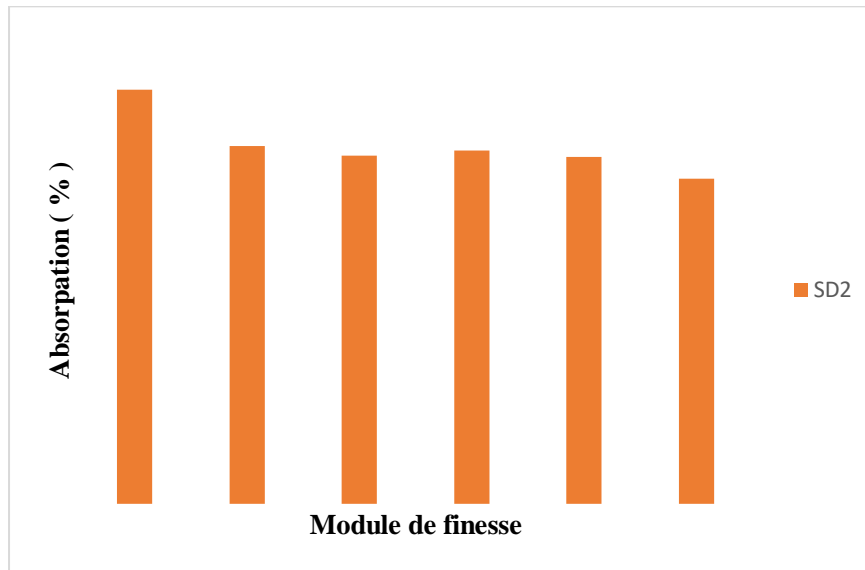


Figure III-7: Absorption d'eau des mortiers à base de sable de Bou-Sâada

Les données exprimées dans la figure ci-dessus, indiquent que le taux d'absorption d'eau (porosité accessible à l'eau) diminue fortement lorsque le module de finesse passe de à ; puis reste relativement stable autour de à % pour des modules de finesse compris entre et .

III.3.4 Effet sur les vitesses ultrasonores

La figure III.8. Présente les vitesses ultrasonores enregistrées à l'appareil à ultrasons.

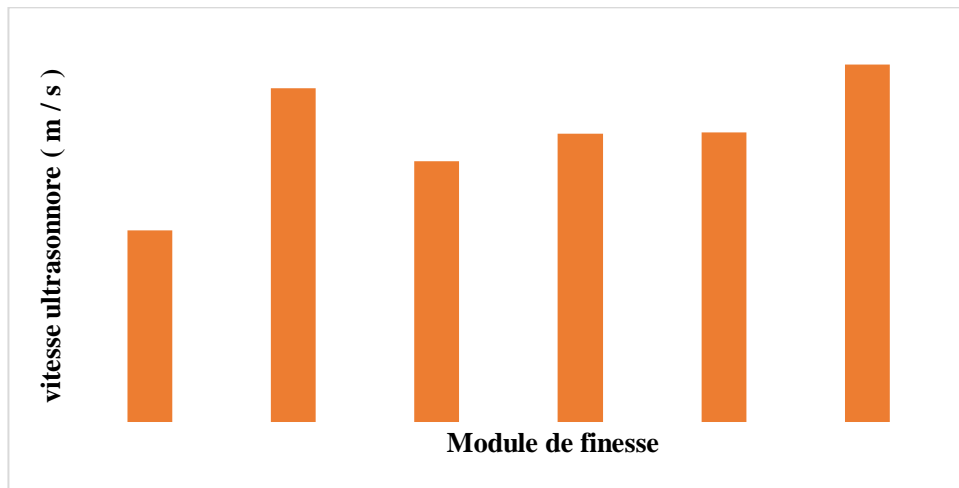


Figure III-8. Vitesse ultrasonore des mortiers à base de sable de Bou-Sâada

Les résultats montrés à la figure III.8 mettent en évidence que la vitesse ultrasonore du mortier augmente globalement avec le module de finesse du sable de Bou-Sâada.

III.4 Comparatif entre les deux sables de dune

III.4.1 Effet sur la résistance à la compression

La figure III.9. Présente le comparatif de résistances à la compression des deux sables étudiés.

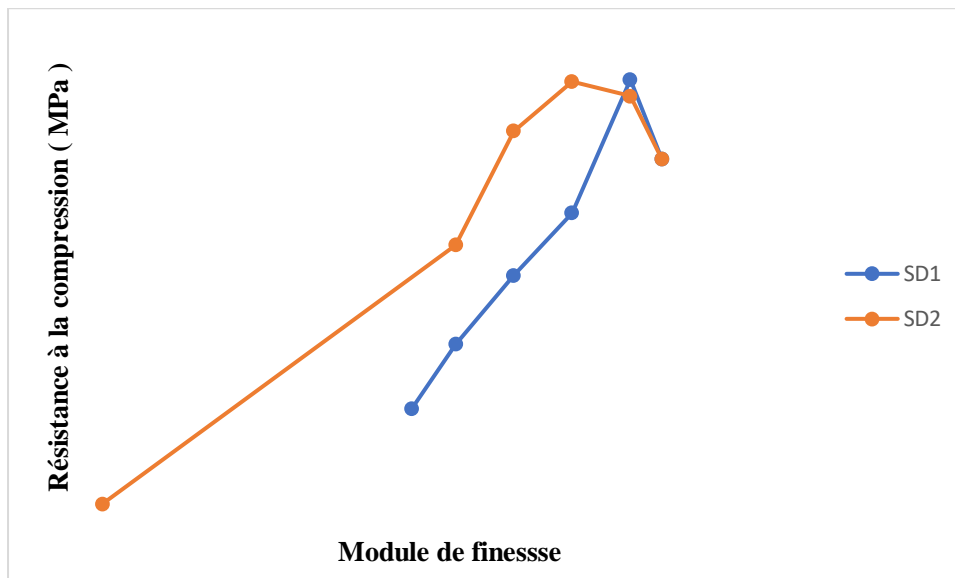


Figure III-9: Comparatif des résistances à la compression des mortiers à base de sable de Bou-Sâada et Touggourt

On observe ici que, pour les deux types de sable, la résistance augmente avec le module de finesse, atteignant un maximum autour de dans le cas de SD1 (sable de Touggourt) et dans le cas de SD2 (Bou-Sâada). En termes de résistances, SD2 présente des valeurs de nettement supérieures à SD1, traduisant une meilleure performance mécanique pour ce sable dans cette plage de finesse. Cependant, à partir d'un module de finesse de , la tendance s'inverse : SD1 atteint une résistance maximale légèrement supérieure à celle de SD2, avec MPa contre MPa. Au-delà, la résistance diminue pour les deux formulations.

III.4.2 Effet sur la résistance à la traction

La figure III.10. Ci-après, montre le comparatif de résistances à la traction par flexion des deux sables étudiés.

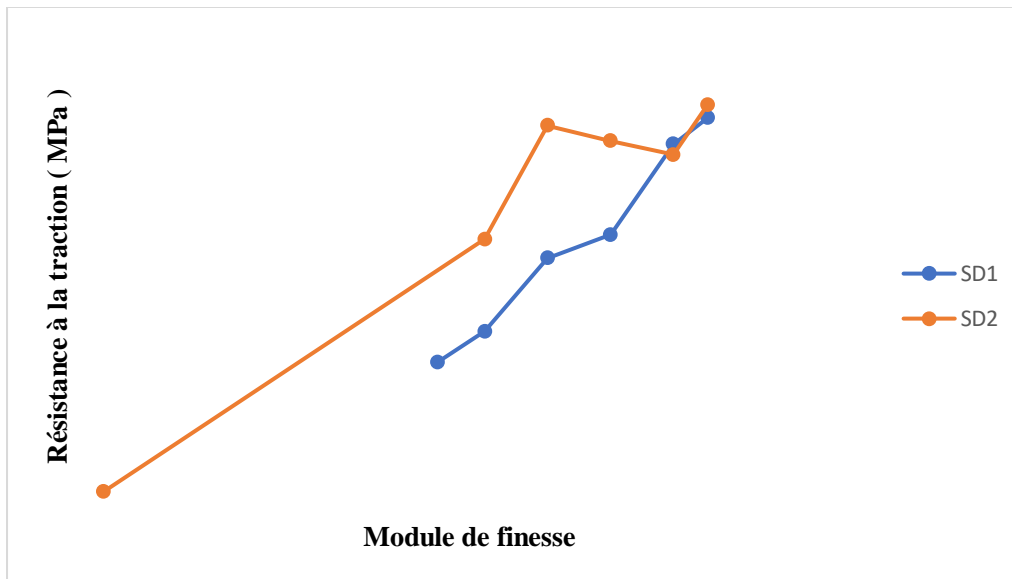


Figure III-10 : Comparatif des résistances à la traction des mortiers à base de sable Bou-Sâada et Touggourt

On constate que, pour chaque valeur du module de finesse, la courbe correspondant au sable de Bou-Sâada (SD2) affiche des résistances à la traction, supérieures à celles du sable de Touggourt. Par exemple, pour un module de finesse de , la résistance à la traction est de MPa contre Mpa, soit une différence d'environ %. À un module de finesse de , la résistance atteint Mpa alors que l'autre sable affiche Mpa, ce qui correspond à un écart de près de %. Cette tendance montre que l'augmentation du module de finesse améliore la résistance à la traction pour les deux formulations.

III.4.3 Effet sur l'absorption

La figure III.11. Présente le comparatif des taux d'absorption d'eau ou l'évaluation de la porosité accessible à l'eau des mortiers fait à la base des deux sables de dunes.

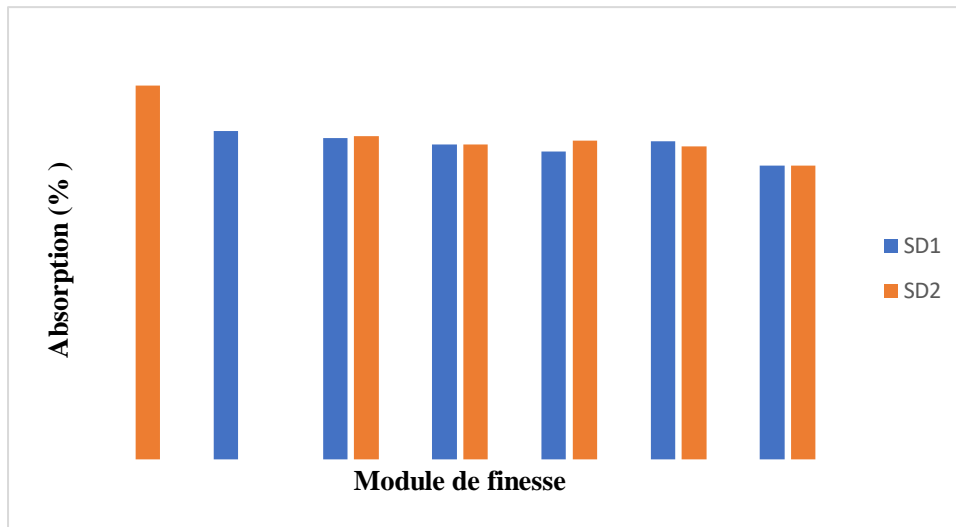


Figure III-11: Comparatif des taux d'absorption des mortiers à base de sable Bou-Sâada et Touggourt

La figure III.11 présente l'évolution du pourcentage d'absorption en fonction du module de finesse global pour les deux formulations SD1 et SD2. On remarque pour la plus faible valeur de module de finesse (% de SD2), une absorption élevée, proche de %, ce qui est très impactant en termes de durabilité.

III.4.4 Effet sur l'ultrason

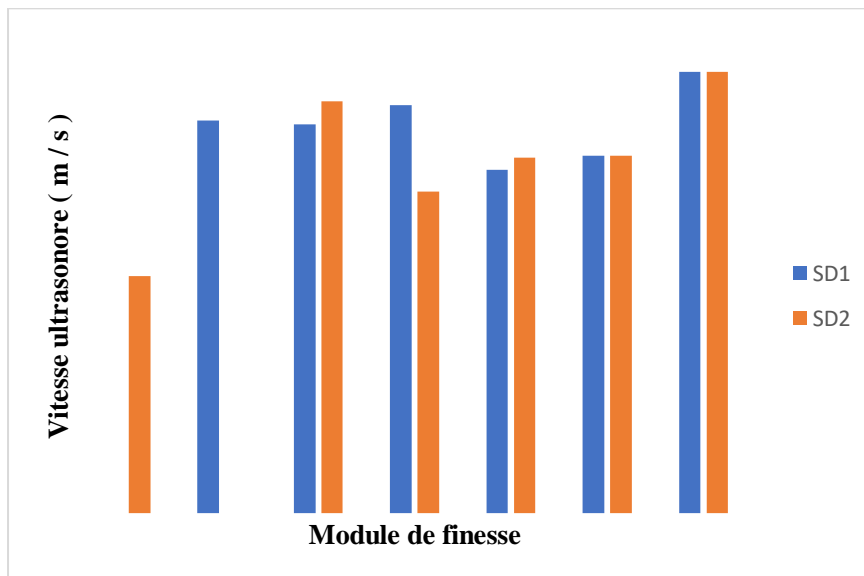


Figure III-12 : Comparatif des vitesses ultrasonores des mortiers à base de sable Bou-Sâada et Touggourt

La figure présente une analyse comparative entre SD1 et SD2 qui révèle des variations dans les vitesses mesurées.

III.5 Effet de la fumée de silice sur les mélanges contenant du sable de dune

III.5.1 Mélange sable de Touggourt - fumée de silice

III.5.1.1 Effet sur la résistance à la compression

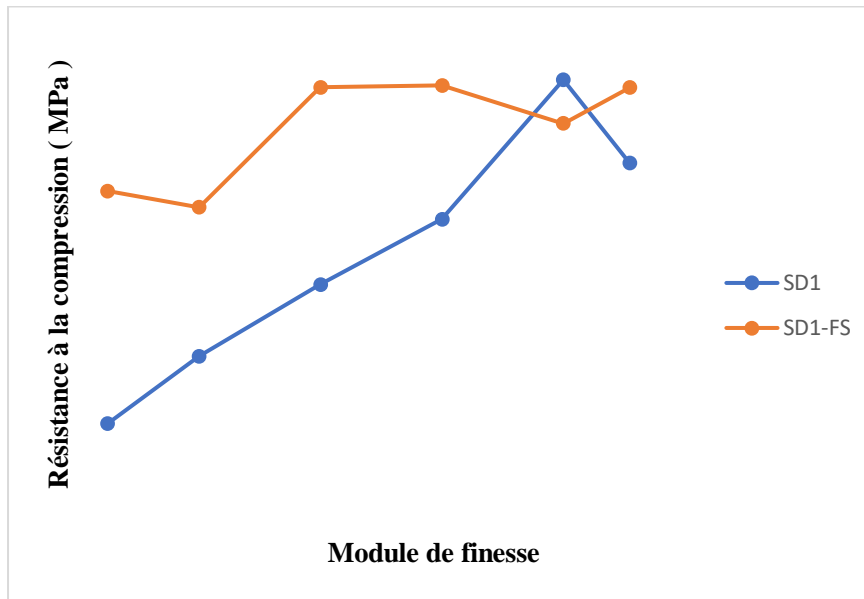


Figure III-13: Résistance à la compression des mortiers à base de sable Touggourt et de fumée de silice

On remarque à partir de la figure III.13, qu'à un module de finesse de 0,15, la résistance à la compression de SD1, qui est de 10,5 MPa, est nettement inférieure à celle de SD1-FS qui est de 15,5 MPa, soit une différence d'environ 32 %. À 0,25 ; la résistance à la compression de SD1 est de 12,5 MPa, elle aussi bien inférieure à celle de SD1-FS 14,5 MPa, avec une différence d'environ 14 %. À 0,42 ; SD1 atteint 15,5 MPa contre 20,5 MPa pour SD1-FS, soit une différence d'environ 25 %. Pour 0,75 ; la différence diminue à environ 10 %, avec 18,5 MPa pour SD1 et 20,5 MPa pour SD1-FS. À 1,25 ; SD1 affiche une résistance maximale de 23,5 MPa, supérieure à celle de SD1-FS qui est de 19,5 MPa, inversant ainsi la tendance précédente. Enfin, à 2,0 ; SD1 présente 20,5 MPa contre 21,5 MPa pour SD1-FS, avec une différence d'environ 5 %.

III.5.1.2 Effet sur la résistance à la traction par flexion

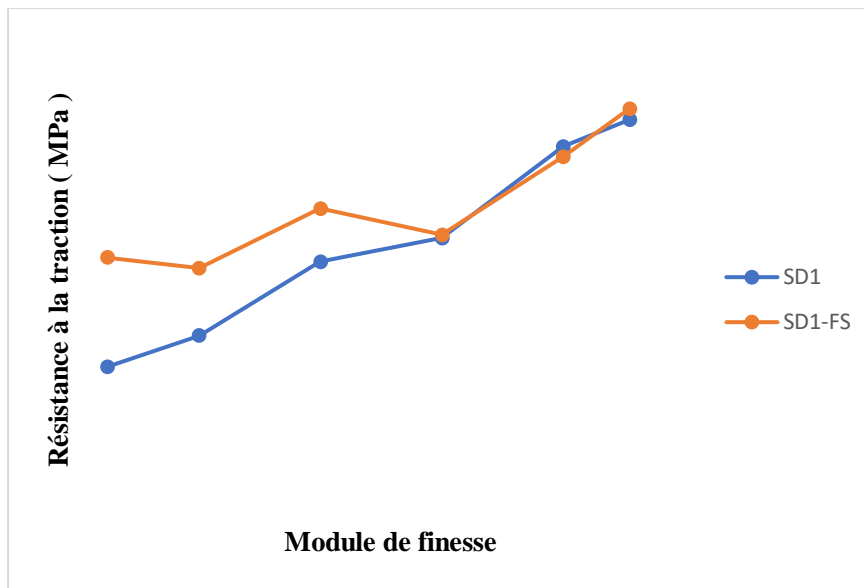


Figure III-14: Courbe de résistance à la traction des mortiers à base de sable Touggourt et de fumée de silice

Nous observons à partir des courbes précédentes de la figure III.14 que la résistance à la traction évolue de manière croissante avec l'augmentation du module de finesse pour les deux courbes, SD1 et SD1-FS. Pour un module de finesse de 1, SD1-FS présente une résistance à la traction de 15 MPa, supérieure à celle de SD1, qui est de 10 MPa, soit une différence d'environ 50%. Pour un module de finesse de 2 ; SD1-FS présente également une résistance supérieure (estimée à 14 MPa) à SD1 qui a pour résistance 12 MPa, soit une différence d'environ 17%. À 3 ; l'écart se réduit, SD1-FS atteignant 22 MPa contre 18 MPa pour SD1, ce qui correspond à une différence d'environ 22%. Pour un module de finesse de 4 ; les deux séries affichent des valeurs très proches, avec une différence d'environ 10%. Cette tendance se confirme à 5 où SD1 et SD1-FS présentent des résistances quasiment identiques. Enfin, à 6 SD1 atteint 30 MPa tandis que SD1-FS est à 32 MPa, montrant une légère supériorité de SD1 avec une différence d'environ 7%.

III.5.1.3 Effet sur l'absorption d'eau

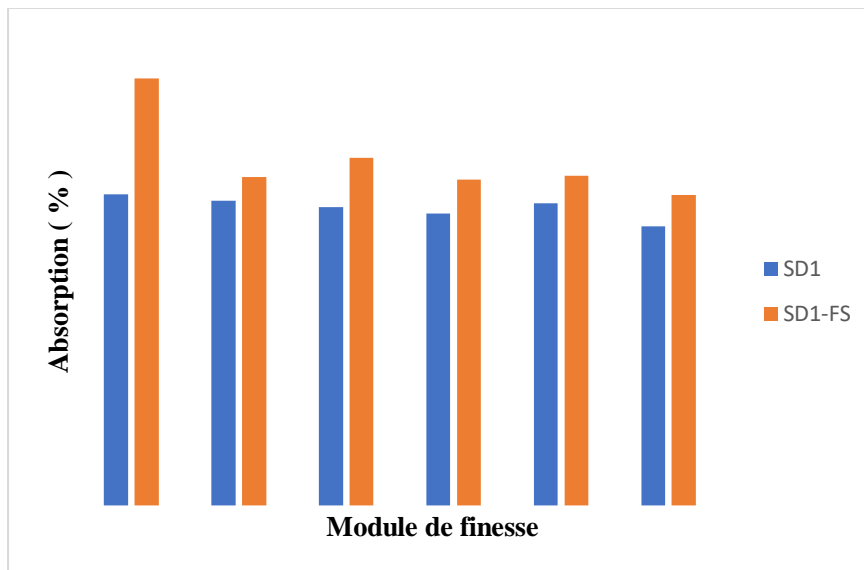


Figure III-15: Taux d'absorption des mortiers à base de sable de Touggourt et de fumée de silice

Nous observons à partir de la figure III.15 que le pourcentage d'absorption diminue globalement avec l'augmentation du module de finesse pour les deux séries, SD1 et SD1-FS. Pour chaque valeur de module de finesse, SD1-FS présente systématiquement une absorption supérieure à celle de SD1. La différence est particulièrement marquée pour le module de finesse de (% SD1), où SD1-FS atteint environ %, contre environ % pour SD1 seul. À partir de et jusqu'à , l'absorption de SD1-FS reste toujours plus élevée que celle de SD1, mais l'écart se réduit progressivement. Les valeurs d'absorption pour SD1 restent relativement stables, oscillant autour de %, tandis que celles de SD1-FS varient entre % et % pour les modules de finesse les plus élevés. Globalement, ce graphique montre que l'ajout du composant FS dans SD1-FS augmente l'absorption d'eau, mais que cette différence tend à diminuer à mesure que le module de finesse augmente.

III.5.1.4 Effet sur l'ultrason

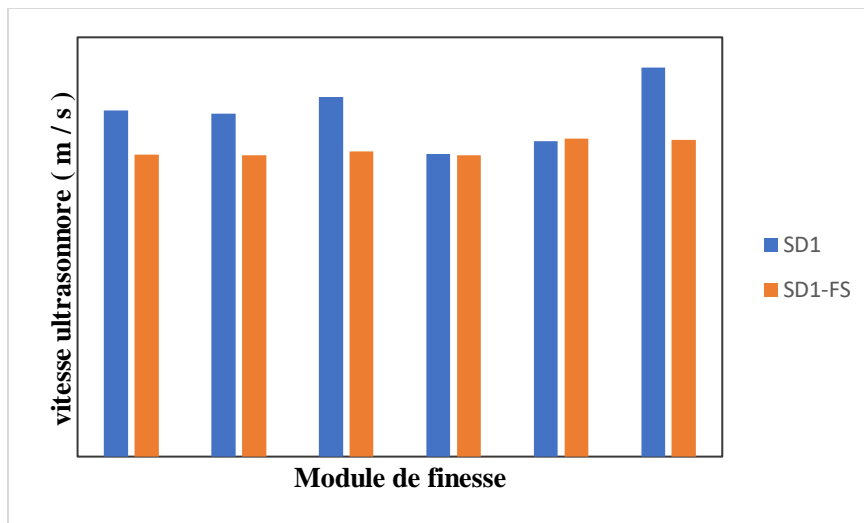


Figure III-16: Vitesses ultrasonores des mortiers à base de sable Touggourt et de fumée de silice

À partir de la figure III-16, nous observons que pour chaque valeur du module de finesse, la vitesse mesurée dans la série SD1 est la plupart du temps supérieure à celle de la série SD1-FS. Cette différence est particulièrement marquée pour les modules de finesse de et ; où l'écart entre les deux séries dépasse m/s. À partir du module de finesse , les vitesses des deux séries deviennent plus proches, avec un rapprochement notable à . Enfin, pour le module de finesse le plus élevé, SD1 atteint sa valeur maximale, dépassant nettement SD1-FS.

III.5.2 Mélange sable de Bou-Sâada - fumée de silice

III.5.2.1 Effet sur la résistance à la compression

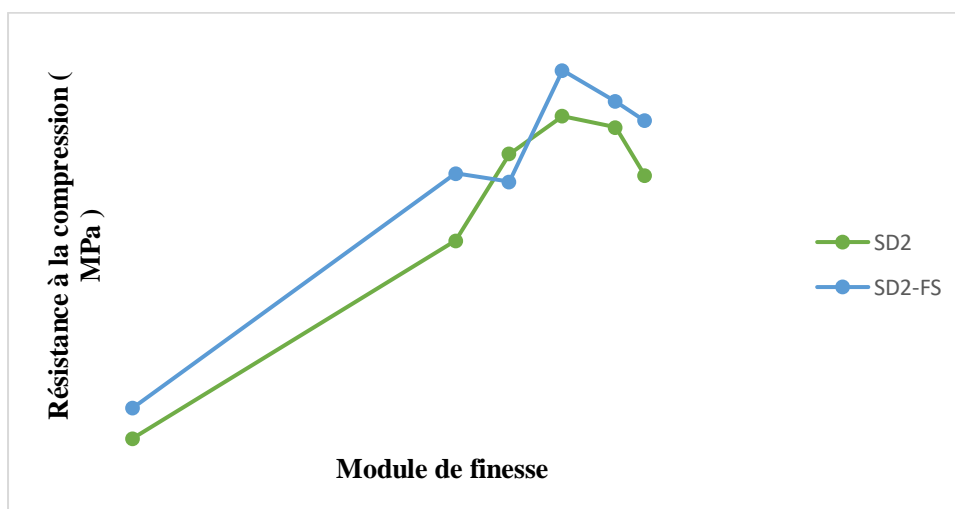


Figure III-17: Résistance à la compression des mortiers à base de sable Bou-Sâada et de fumée de silice

Nous avons observé que la résistance à la compression augmente globalement avec le module de finesse pour les deux formulations, SD2 et SD2-FS. Cependant, la formulation SD2-FS présente systématiquement des valeurs de résistance plus élevées que SD2 pour un même module de finesse. Cette différence est particulièrement marquée pour les modules de finesse faibles, où l'écart entre les deux formulations est le plus important. À mesure que le module de finesse augmente, la résistance à la compression progresse pour les deux formulations, atteignant un maximum autour de , avec environ MPa pour SD2-FS contre MPa pour SD2. Au-delà de ce point optimal, la résistance diminue légèrement, mais SD2-FS conserve toujours un avantage.

III.5.2.2 Effet sur la résistance à la traction par flexion

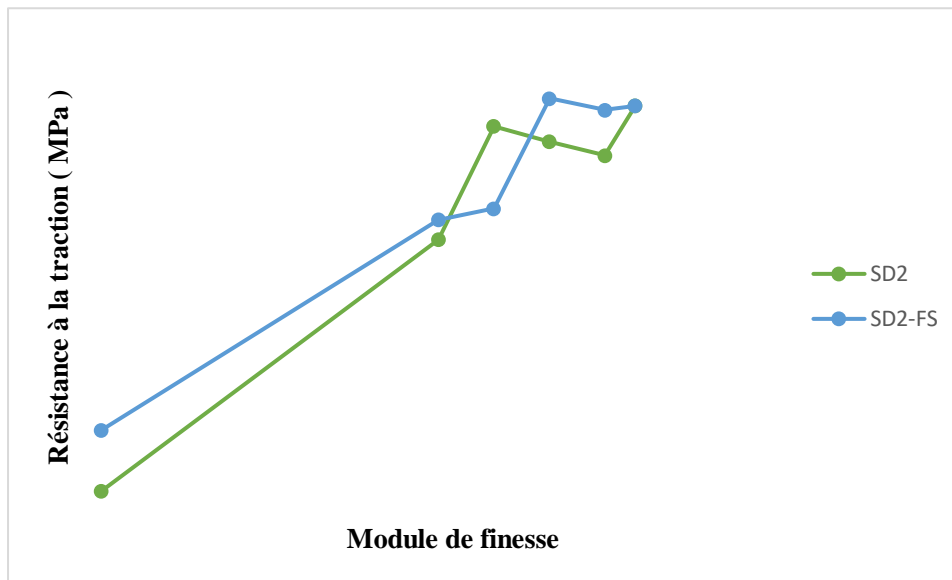


Figure III-18: Résistance à la traction des mortiers à base de sable de Bou-Sâada et de fumée de silice

La figure III-18 montre que la résistance à la traction augmente avec le module de finesse pour les deux formulations, SD2 et SD2-FS, la formulation SD2-FS ayant toujours des valeurs plus élevées. Pour le module de finesse de , la différence est très importante : SD2-FS atteint MPa contre seulement MPa pour SD2, soit un écart de %. À et , la différence devient plus faible, estimée à environ % et % respectivement. À , la différence remonte légèrement à %, puis elle diminue à % pour un module de finesse de .

III.5.2.3 Effet sur l'absorption d'eau

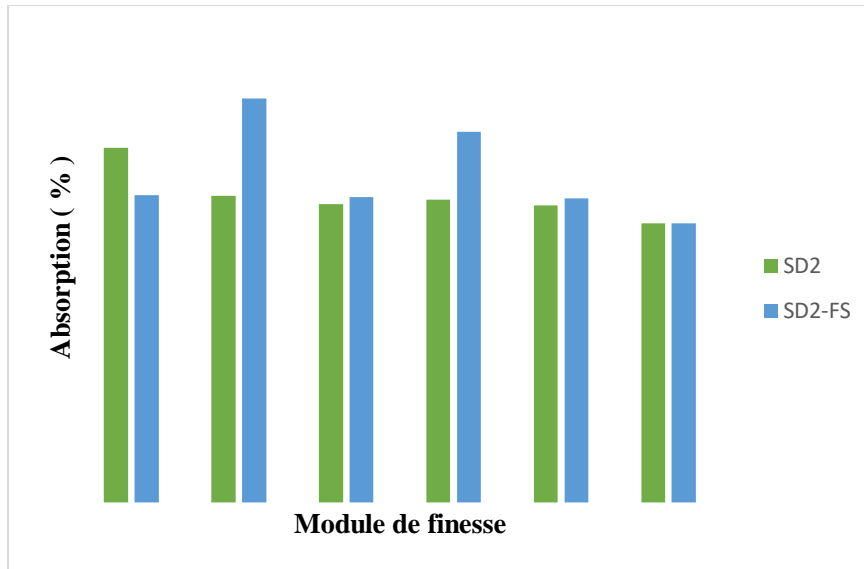


Figure III-19 : Taux d'absorption des mortiers à base de sable Bou-Sâada et de fumée de silice

Nous constatons à partir de la figure III-19, que le pourcentage d'absorption varie selon le module de finesse pour les deux formulations, SD2 et SD2-FS. Pour un module de finesse faible, l'absorption est très élevée pour SD2, autour de %, alors qu'elle est nettement faible par rapport à SD2-FS, environ %.

III.5.2.4 Effet sur l'ultrason

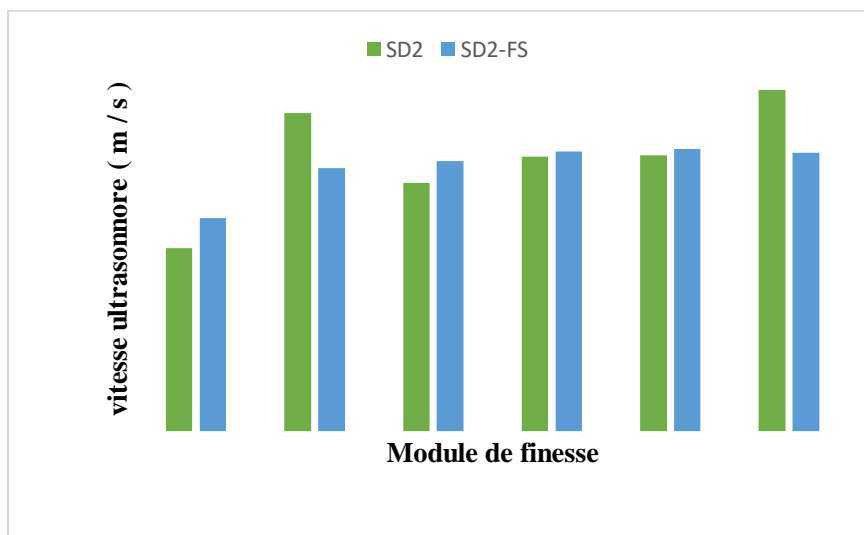


Figure III-20: Vitesse ultrasonore des mortiers à base de sable de Bou-Sâada et de fumée de silice

L'analyse des résultats de la figure III.20 montre des résultats de vitesses ultrasonores quasi-similaires entre les mélanges de SD2 et SD2-FS pour la plupart des mélanges testés.

III.6 Effet combiné FS-CH sur les mélanges contenant du sable de dune

III.6.1 Mélange du sable Touggourt et la fumée de silice avec la chaux hydratée

La figure III.21 montre le comparatif de résistance à la compression entre les trois mélanges SD1 seul, SD1-FS (mélange contenant de la fumée de silice) et SD1-FS-CH (mélange comprenant de la fumée de silice et de la chaux hydratée)

III.6.1.1 Effet sur la résistance à la compression

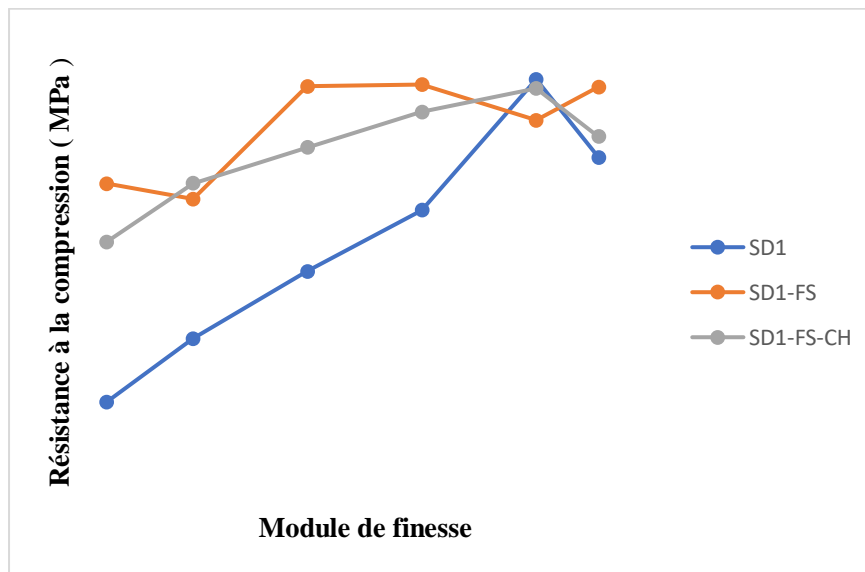


Figure III-21: Comparatif des résistances à la compression des mortiers à base de sable de Touggourt

Le graphique présente l'évolution de la résistance à la compression en fonction du module de finesse pour ces trois formulations : SD1, SD1-FS et SD1-FS-CH.

La courbe SD1 montre une progression régulière de la résistance à la compression avec l'augmentation du module de finesse, passant de MPa à MPa, puis une légère baisse à MPa pour le module le plus élevé. Comparativement, SD1-FS affiche des valeurs nettement supérieures à SD1 presque pour tous les modules de finesse, atteignant un maximum de MPa à un module de , soit une amélioration d'environ % par rapport à SD1 au même module. De même, SD1-FS-CH présente des résistances supérieures à SD1, avec un pic à MPa pour un module de , ce qui représente une augmentation de près de % par rapport à SD1.

III.6.1.2 Effet sur la résistance à la traction par flexion

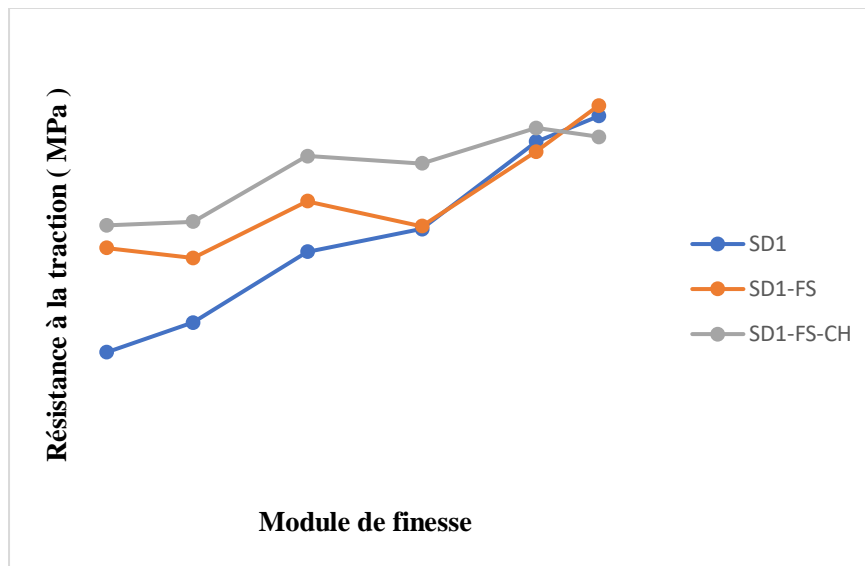


Figure III-22: Comparatif des de résistances à la traction des mortiers à base de sable de Touggourt

L'analyse de la figure III.22 met en évidence l'évolution de la résistance à la traction en fonction du module de finesse pour les trois formulations : SD1, SD1-FS et SD1-FS-CH.

Pour chaque valeur du module de finesse, la formulation SD1-FS-CH présente systématiquement la résistance à la traction la plus élevée, suivie de SD1-FS, puis de SD1, hormis pour le dernier mélange à $M_f=$. Par exemple, à un module de finesse de , la résistance de SD1 est de MPa, alors que SD1-FS atteint MPa et SD1-FS-CH MPa. Cela représente une augmentation d'environ % pour SD1-FS et près de % pour SD1-FS-CH par rapport à SD1. Cette caractéristique se confirme presque pour tous les modules de finesse, notamment aux valeurs de modules de finesse faibles (et), où la différence d'amplitude de résistance est la plus élevée. Ainsi, la résistance de SD1-FS-CH atteint MPa contre MPa pour SD1 et MPa pour SD1-FS.

III.6.1.3 Effet sur l'absorption d'eau

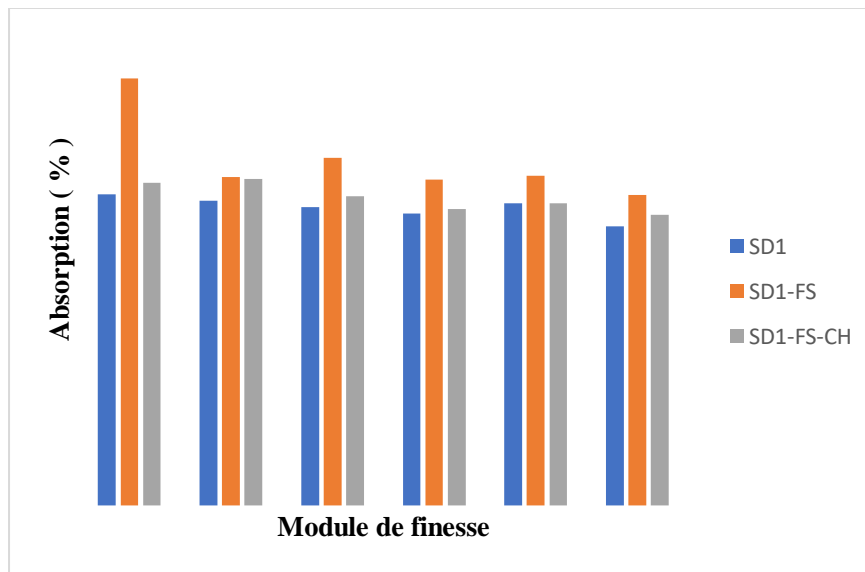


Figure III-23: Comparatif des absorptions des mortiers des mortiers à base de sable de Touggourt

En regardant la figure III.23, on remarque tout de suite que l'ajout de fumée de silice au sable de Touggourt (SD1-FS) fait clairement augmenter le taux d'absorption, surtout pour le mélange $M_{f=}$ où il atteint environ %, contre environ % pour le sable seul (SD1) et pour le mélange avec chaux hydratée (SD1-FS-CH). Par contre, dès qu'on ajoute aussi de la chaux hydratée (SD1-FS-CH), l'absorption baisse et revient quasiment au niveau des absorptions notées sur les mortiers de sable de dune seul, avec environ % toujours pour le mélange à $M_{f=}$. Pour les autres valeurs, c'est-à-dire entre et , les pourcentages d'absorption se situent tous autour de % à %, et les différences entre les mélanges sont moins marquées.

III.6.1.4 Effet sur l'ultrason

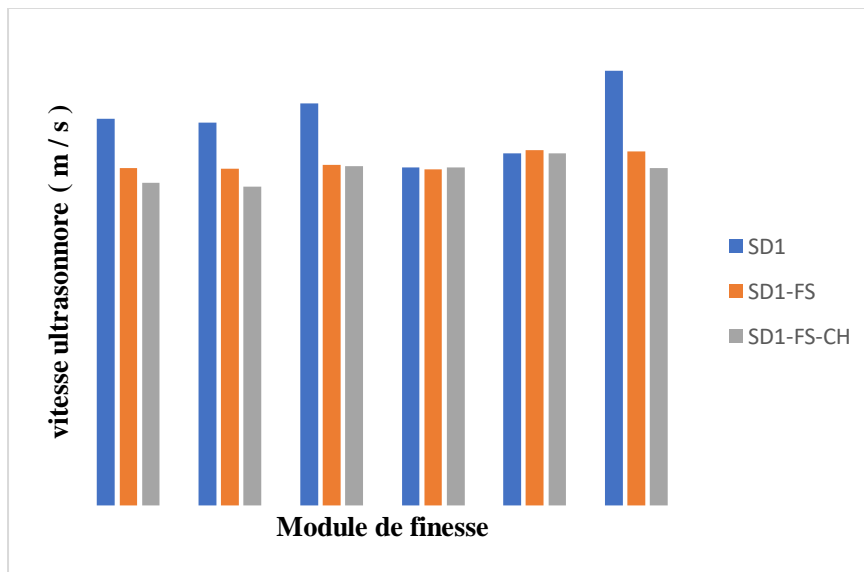


Figure III-24: Comparatif de l'ultrason des mortiers des mortiers à base de sable de Touggourt

En observant les graphiques de la figure III.24, nous remarquons que la vitesse ultrasonore varie selon les différentes formulations : le sable de Touggourt seul (SD1), le sable avec fumée de silice (SD1-FS) et le sable avec fumée de silice et chaux hydratée (SD1-FS-CH). À la première formulation de sable mesurée $M_{f=}$, le sable seul (SD1) affiche la vitesse la plus élevée, autour de m/s, alors que le mélange avec fumée de silice (SD1-FS) descend à m/s et celui avec fumée de silice et chaux (SD1-FS-CH) descend, à près de m/s. Cette tendance se retrouve pour toutes les valeurs : SD1 reste quasiment toujours au-dessus des autres mélanges, avec des vitesses qui oscillent entre m/s et m/s (maximum atteint pour $M_{f=}$).

III.6.2 Mélange du sable Bou-Sâada et la fumée de silice avec la chaux hydratée

III.6.2.1 Effet sur la résistance à la compression

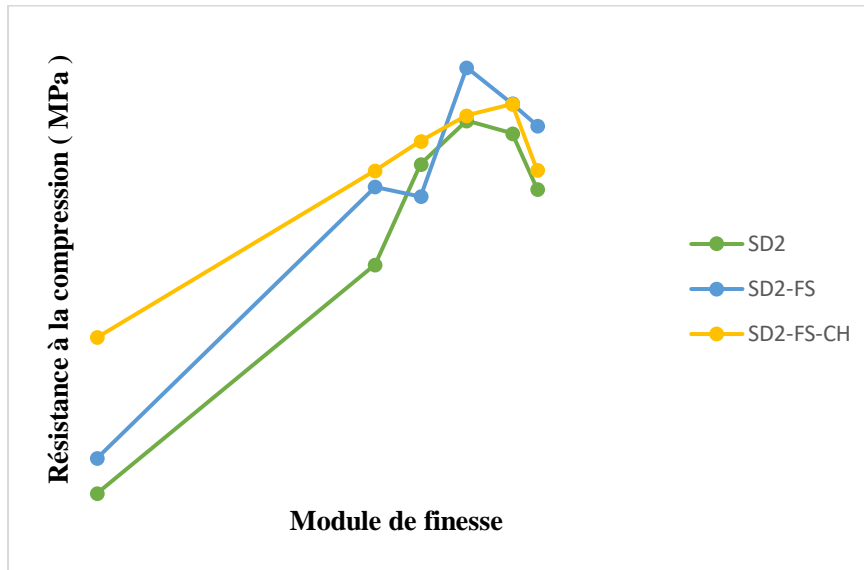


Figure III-25: Comparatif des de résistances à la compression des mortiers à base de sable de Bou Sâada

Le graphique de la figure III.25 présente la variation de la résistance à la compression en fonction du module de finesse pour les trois formulations testées : SD2, SD2-FS et SD2-FS-CH.

La courbe SD2 montre une augmentation progressive de la résistance à la compression avec le module de finesse, atteignant un maximum d'environ MPa pour un module de finesse de puis une légère diminution au-delà. La courbe SD2-FS affiche une résistance supérieure à SD2 pour chaque valeur du module de finesse, culminant à MPa à un module de finesse de , soit une amélioration d'environ % par rapport à SD2 à ce même module.

III.6.2.2 Effet sur la résistance à la traction par flexion

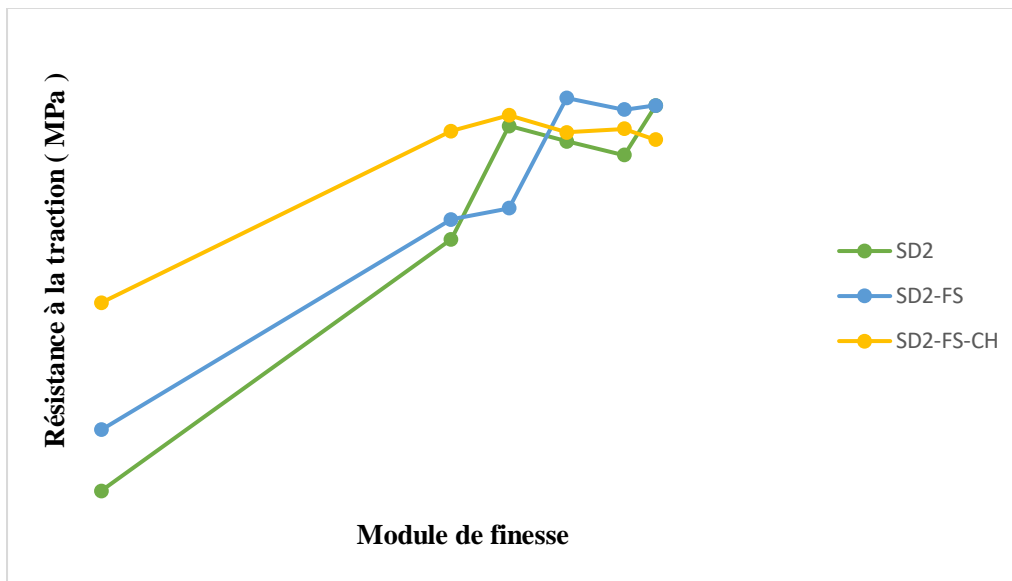


Figure III-26: Comparatif des de résistances à la des mortiers à base de sable de Bou Sâada

L'analyse comparative de la résistance à la traction en fonction du module de finesse (Figure III.26), met en évidence une augmentation générale des performances pour les trois formulations : SD2, SD2-FS et SD2-FS-CH. Les mélanges contenant de la fumée de silice, avec ou sans chaux hydratée, présentent des résistances systématiquement supérieures à la formulation de base SD2.

III.6.2.3 Effet sur l'absorption

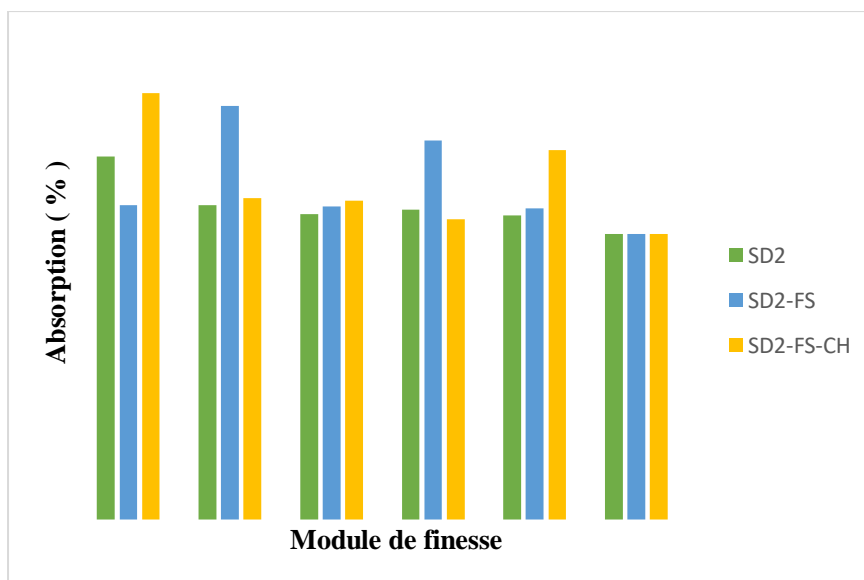


Figure III-27 : Comparatif des absorptions des mortiers des mortiers à base de sable de Bou Sâada

L'analyse comparative des valeurs de l'absorption en fonction du module de finesse met en lumière une amélioration progressive des performances de durabilité pour les trois formulations. Cette grandeur étant un indicateur de la porosité accessible à l'eau indirect de la compacité et de la densité interne du matériau.

III.6.2.4 Effet sur l'ultrason

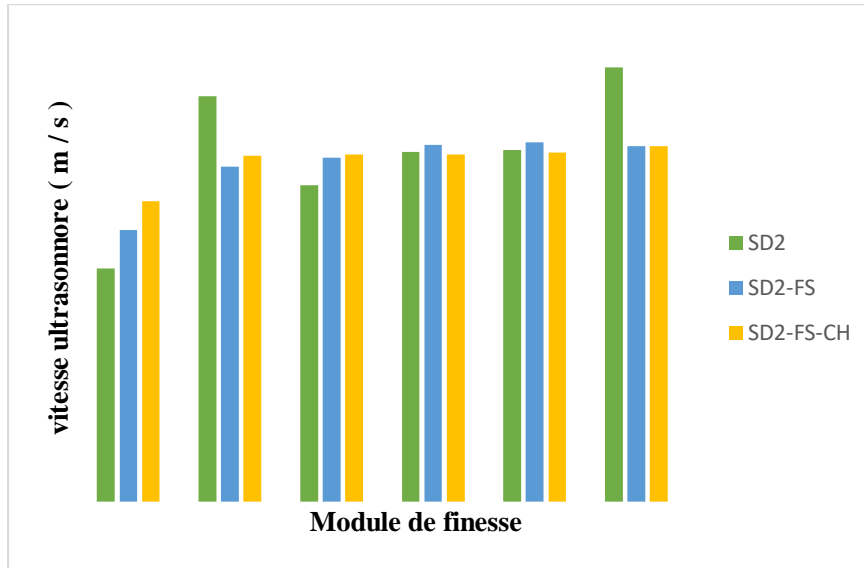


Figure III-28 : Comparatif de l'ultrason des mortiers à base de sable de Bou Sâada

III.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'analyser l'impact de différents types de sable de dune (Touggourt et Bou-Sâada), ainsi que l'effet de la fumée de silice et de la chaux hydratée sur les propriétés des mortiers. Les résultats expérimentaux montrent que le module de finesse joue un rôle déterminant sur les performances mécaniques, physiques et acoustiques du matériau.

Les sables plus grossiers améliorent globalement la résistance à la compression et à la traction, avec des performances supérieures, lorsque leur taux est élevé dans les mortiers.

En comparant les deux sables de dune entre eux, nous avons remarqué que le sable de Bou-Sâada est globalement plus performant par rapport à celui de Touggourt, aussi-bien en termes de résistance à la traction qu'en compression.

L'ajout de fumée de silice permet d'améliorer de manière significative ces propriétés, en particulier pour les modules de finesse faibles à moyens. La combinaison de la fumée de silice et de la chaux hydratée offre un bon équilibre entre résistance mécanique et absorption, en réduisant l'effet négatif de la porosité.

Concernant l'absorption d'eau, une diminution est observée avec l'augmentation du module de finesse, ce qui indique une densité accrue du mortier. Toutefois, certains ajouts comme la fumée de silice peuvent augmenter la porosité. L'apport de la chaux hydratée s'avère alors bénéfique pour compenser cet effet.

Enfin, les mesures ultrasonores confirment que les formulations à base de sables plus grossiers et enrichies en additions présentent une meilleure compacité et homogénéité, se traduisant par des vitesses de propagation plus élevées

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons examiné le comportement des mortiers élaborés à partir de sables éoliens de deux régions algériennes, en comparaison avec ceux formulés à base de sables concassés. Les sables éoliens se distinguent par une granulométrie fine à moyenne, une forme arrondie et une surface lisse polie par le vent, caractéristiques résultant de leur transport éolien. Cette morphologie particulière mais surtout leur grande pureté et une teneur élevée en silice, les rendent intéressants pour diverses applications dans le domaine de la construction.

La comparaison avec d'autres types de sables, ainsi que l'analyse de leur utilisation dans les formulations de mortiers, a permis de mieux appréhender leur influence sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. L'ajout d'additions appropriées, telles que la chaux hydratée ou la fumée de silice, représente une solution très intéressante afin d'optimiser les performances de ces mortiers et valoriser efficacement cette ressource naturelle abondante.

À l'issue du travail expérimental réalisé au sein du laboratoire de béton du département de génie civil, dans le cadre du projet de fin d'études, plusieurs résultats significatifs ont été obtenus. Ils peuvent être résumés comme suit :

- L'augmentation du module de finesse du squelette granulaire du mortier (sables éoliens + sable de carrière concassé) améliore nettement la résistance mécanique des mortiers. Pour le sable de Touggourt, la résistance à la compression a progressé de %, tandis que celle du sable de Bou-Sâada également a connu amélioration notable.
- La résistance à la traction a également été fortement améliorée avec la présence de sables plus grossiers.
- L'absorption d'eau diminue globalement avec l'augmentation du module de finesse global des mortiers pour les deux sables de dunes testés. Ainsi par exemple, pour les mortiers à base de sable de Bou-Sâada, on note une réduction de % de l'absorption entre les mélanges avec sable très fin et ceux plus grossiers.
- L'ajout de fumée de silice a permis d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à % et la résistance à la traction jusqu'à %, notamment pour les formulations à base de sable de Touggourt. Cependant la plupart du temps, cette fumée de silice détériore les propriétés physiques des mortiers telles que l'absorption d'eau notamment.

- L'association de fumée de silice et de chaux hydratée (formulations FS-CH) a amélioré la résistance mécanique tout en réduisant l'absorption pour l'ensemble des sables de dunes testés comparativement aux mélanges additionnés de fumée de silice seule, permettant un bon équilibre entre compacité et durabilité.
- Les mesures d'ondes ultrasonores ont révélé une hausse de la vitesse de propagation des ondes jusqu'à %, attestant d'une plus forte homogénéité des mortiers au fur et à mesure que la quantité de sable grossier augmente (concassé). Cela est surtout valable dans les mortiers contenant du sable de Bou-Sâada, tandis que cet effet est moins significatif dans les mortiers à base du sable de Touggourt, en d'autres termes la présence de ce type de sable n'altère pas négativement et de manière significative l'homogénéité des mortiers testés

Références bibliographiques

- [1] Bédérina, M., Khenfer, M. M., Dheilly, R. M., & Quéneudec, M. (2005). Reuse of local sand: Effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1172–1179.
- [2] K. Abdellah, *Effets de la pollution atmosphérique par les hydrocarbures sur la teneur en chlorophylle et en Polyphénols de Zygophyllum album et Tamarix gallica*, 2012.
- [3] J. CHAUVIN, *Les sables : guide technique d'utilisation routière*, ISTED, 76 p. France, 1987.
- [4] GUENNOUN. R, « *Etude et formulation d'un béton de sable de dune* », Alger,, juin 2003..
- [5] Guiraud, P. (n.d.). *Caractéristiques et types de granulats*. Infociments.
<https://www.infociments.fr/betons/caracteristiques-et-types-de-granulats>
- [6] R. SALIMA, « *Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux* », mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [7] A. Guidoum, *Étude comparative des sables naturels et leur influence sur les propriétés mécaniques et durabilité du béton.*, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie., 2019.
- [8] M. Mainguet, *Les paysages éoliens : dunes et ergs*. Paris : Masson., 1999.
- [9] Paskoff, R. (1996). Geneviève Coudé-Gaussen et Pierre Rognon (sous la direction de), Désertification et aménagement au Maghreb. *Annales de géographie*, 103-103.
- [10] Miossec, A. (2004). *Les littoraux: entre nature et aménagement*. Armand Colin.
- [11] Chavaillon, J. (1964). Étude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara nord-occidental: Colomb-Béchar à Reggane: Centre national de la recherche scientifique.
- [12] P. Fookes et J. Higginbotham, *The Engineering Characteristics of Desert Soils and Sands.*, 1968.
- [13] M. BEN DHIA, *Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière*, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 213, Jan-Fev.,pp.33-42, 1998.
- [14] GHRIEB. A, *Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques*, thèse de, thèse de Magister, ENP, Alger, 2003.

- [15] L. ZEGHICHI et Azzeddine LAHMADI, *Contribution à l'étude des caractéristiques du sable de dune et de son effet sur le comportement des bétons autoplaçants*, Université de M'sila, 2012.
- [16] C. OULD SID, H. HAVARD et C. VALIN, *Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 199, sept.- oct., pp. 27-34, 1995..
- [17] R. KETTAB, A. GHRIEB et A. BALI, *Béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques*, 1ER Congrès international sur la technologie et la durabilité du béton USTHB ALGER 24 AU 26 MAI, 2004.
- [18] G. DREUX., *Technique générale de construction « composition du béton » C2 220 / 1986*.
- [19] A. Hocine, *Etude des bétons à base des sables de dune*, Mémoire de magister université MOHAMED KHEIDER BISKRA, 2009. .
- [20] My Cailloux Sud., «My Cailloux Sud.» 24 juin 2024. [En ligne]. Available: mycailloux-sud.com/le-sable-dans-la-construction/. [Accès le 14 mai 2025].
- [21] Khelil, N. (2020a). Silica fume-hydrated lime blended cements: Contribution of pre-blending to strength development in mortars. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(1), 12–25. <https://doi.org/10.1080/14488353.2020.1790723>
- [22] Khelil, N., Ould Ouali, M., & Meziane, L. (2023a). On the use of fine dune sand in reactive powder concrete: Effect on resistance, water absorption and UPV properties. *Construction and Building Materials*, 388, 131684. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131684>
- [23] D. PARLONGUE, *Forme des dunes et géométrie des tas de sable*, 2002..
- [24] Dawood, A. O., & Jaber, A. M. (2022). Effect of dune sand as sand replacement on the mechanical properties of the hybrid fiber reinforced concrete. *Civil and Environmental Engineering*, 18(1), 111–136. <https://doi.org/10.2478/cee-2022-0012>
- [25] A. M. AYACHI, *Etude des propriétés mécaniques du béton de sable de dunes*, mémoire mastère ; Université Ouargla., 2011.
- [26] Ghrieb, A., & Abadou, Y. (2022). Physical and mechanical properties of dune sand mortar reinforced with recycled pet fiber: An experimental study. *Advances in Materials Science*, 22(4), 41–56. <https://doi.org/10.2478/adms-2022-0018>
- [27] British Standards Institution. (2016). *Methods of Testing Cement Determination of Strength* (BS EN 196-1:2016). <https://www.bsigroup.com/>

- [28] Alhozaimy, Abdulrahman, Alawad, O. A., Jaafar, M. S., Al-Negheimish, A., & Noorzaei, J. (2014a). Use of fine ground dune sand as a supplementary cementing material. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 20(1), 32–37. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.768541>
- [29] Alhozaimy, A., Jaafar, M. S., Al-Negheimish, A., Abdullah, A., Taufiq-Yap, Y. H., Noorzaei, J., & Alawad, O. A. (2012b). Properties of high strength concrete using white and dune sands under normal and autoclaved curing. *Construction and Building Materials*, 27(1), 218–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.057>
- [30] Neville, A. (2012). *Properties of concrete, fifth edition*. Prentice Hall.
- [31] Park, S., Lee, E., Ko, J., Yoo, J., & Kim, Y. (2018). Rheological properties of concrete using Dune Sand. *Construction and Building Materials*, 172, 685–695. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.192>
- [32] Seif, E.-S. S. (2011). Assessing the engineering properties of concrete made with fine Dune Sands: An experimental study. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(3), 857–863. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0376-6>
- [33] Ghrieb, A., & Abadou, Y. (2022a). Physical and mechanical properties of dune sand mortar reinforced with recycled pet fiber: An experimental study. *Advances in Materials Science*, 22(4), 41–56. <https://doi.org/10.2478/adms-2022-0018>
- [34] British Standards Institution. (2011). *Cement—part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements* (BS EN 197-1:2011). <https://www.bsigroup.com/>
- [35] NA 2607, *Granulats - Analyse granulométrique par tamisage..*
- [36] NA 5113, *Granulats pour béton.*
- [37] British Standards Institution. (2013). *Aggregates for concrete* (BS EN 12620:2013). <https://www.bsigroup.com/>
- [38] Association Franchise de Normalisation. (1990). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes* (NF P 18-555:1990). <https://www.afnor.org/>
- [39] British Standards Institution. (2012). *Tests for geometrical properties of aggregates - Assessment of fines. Sand equivalent test* (BS EN 933-8:2012). <https://www.bsigroup.com/>

- [40] European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. (2005). *The European guidelines for selfcompacting concrete: Specification, production and use*. <https://efnarc.org/>
- [41] British Standards Institution. (2004). Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity (BS EN 12504-4:2004). <https://www.bsigroup.com/>
- [42] American Society for Testing and Materials. (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete (ASTM C597-16:2016). <https://www.astm.org/>
- [43] American Society for Testing and Materials. (2013). Granulats. Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables (ASTM C1585-11:2013). <https://www.astm.org/>

Résumé

Ce travail s'intéresse à la caractérisation et à la valorisation du sable de dune saharien dans les formulations de mortiers. Ces sables, abondants en Algérie, sont très fins, riches en silice, et présentent des propriétés physiques et chimiques particulières qui influencent la performance des matériaux cimentaires. Les études expérimentales exposées dans le présent travail, montrent que leur utilisation partielle, notamment en combinaison avec la fumée de silice et la chaux hydratée, peut améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons. Toutefois, à forte teneur, la finesse excessive du sable peut nuire à la compacité et à la résistance. Ce matériau offre au vu des constatations faites en laboratoire, un intérêt économique important grâce à sa disponibilité locale et son faible coût d'exploitation.

Mots clés : Sable de dune, Mortier, Granulométrie, Résistance mécanique, Compacité, Absorption, Matériaux cimentaires, Valorisation.

Abstract

This work focuses on the characterization and valorization of Saharan dune sand in mortars. These sands, abundant in Algeria, are very fine, rich in silica, and possess specific physical and chemical properties that influence the performance of cementitious materials. The experimental studies presented in this work, show that partial use of dune sand, especially in combination with silica fume and hydrated lime, can improve the mechanical strength and durability of concrete. However, at high replacement levels, the excessive fineness of the sand may negatively affect compaction and strength. This material offers, in view of the observations made in the laboratory, presents significant economic interest due to its local availability and low expl.

Keywords : Dune sand, Mortar, Particle size distribution, Mechanical strength, Compactness, Absorption, Cementitious materials, Valorization.