REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie civil

Effet combiné de la nature du sable, des ajouts et de la température sur le comportement du béton de sable

---

Présenté par

MOUILHI Tayeb

LAIDOUDI Djillali

Proposé et Dirigé par

Pr DEBIEB Farid

Promotion Juin 2025

REMERCIMENTS

En premier, nous remercions **ALLAH**, le Tout-Puissant, pour nous avoir guidée sur le chemin de la lumière et du savoir, et pour nous avoir donné le courage, la volonté et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à notre promoteur, **le professeur DEBIEB Farid**, pour son encadrement précieux, sa disponibilité, sa patience, et la confiance qu'il nous a accordée tout au long de cette recherche. Son expertise et ses conseils ont été une source inestimable d'inspiration.

Nos remerciements s'étendent à tout le personnel du laboratoire de Génie Civil du Hall Technologique de l'université de Médéa, qui nous ont aidée avec dévouement lors de la réalisation de la partie expérimentale, en nous fournissant les matériaux et l'équipement nécessaires à la réussite de ce projet.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi à **tous les enseignants** du département de Génie civil de l'Université de Médéa qui ont contribué à notre formation au fil de ce cursus. Leur enseignement et leur bienveillance ont largement contribué à notre parcours académique.

Enfin, nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers toute personne qui a contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de recherche.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon père bien-aimé.

Qu'Allah lui fasse miséricorde, lui pardonne ses péchés et lui accorde une place dans Son vaste Paradis.

À ma famille, pour leur soutien moral et leurs prières sincères.

À tous mes amis fidèles, pour leur encouragement tout au long de ce parcours.

Que ce travail soit, par la volonté d'Allah, un témoignage de reconnaissance et de gratitude envers vous tous

MOUILHI Tayeb

Je dédie ce modeste travail à l'âme de mon père bien-aimé.

Qu'Allah lui fasse miséricorde, lui pardonne ses péchés et lui accorde une place dans Son vaste Paradis.

À ma famille, pour leur soutien moral et leurs prières sincères.

À tous mes amis fidèles, pour leur encouragement tout au long de ce parcours.

Que ce travail soit, par la volonté d'Allah, un témoignage de reconnaissance et de gratitude envers vous tous

LAIDOUDI Djillali

ملخص

تتناول هذه الدراسة التجريبية التأثير المشترك لطبيعة الرمل (ناعم، متوسط، خشن)، والإضافات المعدنية، ودرجة حرارة المعالجة على خصائص خرسانة الرمل .وقد أظهرت النتائج أن هذه العوامل الثلاثة تؤثر بشكل كبير على الخصائص الميكانيكية والمتانة للخرسانة .حيث أن الرمل المتوسط المصحوب ببعض الإضافات يساهم في تحسين الكثافة والمقاومة ، خاصة عند درجات حرارة معتدلة .في المقابل، تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى تسريع زمن التصلب، لكنها تؤثر سلباً على المتانة على المدى الطويل .وتبرز هذه الدراسة أهمية اعتماد تركيبة مناسبة حسب الموارد المحلية والظروف المناخية

الكلمات المفتاحية ;خرسانة الرمل، طبيعة الرمل ، الإضافات المعدنية، درجة حرارة المعالجة، المقاومة الميكانيكية، المتانة

Abstract

This experimental study investigates the combined effect of sand type (fine, medium, coarse), mineral additions, and curing temperature on the behavior of sand-based concrete. The results show that these three parameters significantly influence the mechanical properties and durability of the concrete. Medium sand, combined with selected additions, offers better compactness and strength, especially at moderate temperatures. Conversely, high temperatures accelerate setting but negatively affect long-term durability. The study highlights the importance of tailoring concrete formulation to local materials and climatic conditions

Keywords: Sand concrete, Sand type, Mineral additions, Curing temperature, Mechanical strength, Durability.

Résumé

Ce travail expérimental étudie l'effet combiné de la nature du sable (fin, moyen, gros), des ajouts minéraux et de la température de cure sur le comportement du béton de sable. Les résultats ont montré que ces trois paramètres influencent significativement les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Le sable moyen associé à certains ajouts optimise la compacité et les résistances, surtout à température modérée. À l'inverse, des températures élevées peuvent accélérer la prise mais nuisent à long terme à la durabilité. L'étude met en évidence la nécessité d'une formulation adaptée aux ressources locales et aux conditions climatiques.

Mots clés : Béton de sable, Nature du sable, Ajouts minéraux, Température de cure, Résistance mécanique, Durabilité.

Liste des tableaux

Chapitre II :

- Tableau II.4 : Résultats de l'équivalent de sable 29
- Tableau II.5:Résultats d'analyse granulométrique du sable fin 30
- Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable moyen 31
- Tableau II.7 : Analyse granulométrique du sable grossier 32
- Tableau II.8 : Résultats du module de finesse des trois sables 33
- Tableau II.9 : Caractéristiques chimiques du ciment CEM II/B 42.5N 33
- Tableau II.10 : Caractéristiques mécaniques du ciment 33
- Tableau II.11 : Caractéristiques physiques du filler de marbre 35
- Tableau II.12 : Caractéristiques chimiques du filler de marbre 35
- Tableau II.13 : Résultats de l'essai de maniabilité 36
- Tableau II.14 : Composition du béton de sable témoin et des bétons renforcés ...38
- Tableau II.15 : Composition du béton de sable (par m^3) 39

Chapitre III :

- Tableau III.1 : Résistance à la compression à 7 jours 46

- Tableau III.2 : Résistance à la compression à 14 jours 47
- Tableau III.3 : Résistance à la compression à 28 jours 47
- Tableau III.4 : Résistance à la traction par flexion à 7 jours 48
- Tableau III.5 : Résistance à la traction par flexion à 14 jours 48
- Tableau III.6 : Résistance à la traction par flexion à 28 jours 49
- Tableau III.7 : Évolution du taux d'absorption d'eau (%) en fonction du temps et de la cure 50

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1 : Fines anguleuses..... .**11**
Fig. I.2 : Fines sphériques..... .. **11**
Fig. I.3 : Poudrette de marbre..... ..**12**
Fig. I.4 : Différence entre béton de sable et béton ordinaire **13**
Fig. I.5 : Temps d'écoulement en fonction du module de finesse **13**
Fig. I.6 : Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C).....**13**
Fig. I.7 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance.....**13**
Fig. I.8 : Influence du rapport (E/C) et nature des fines sur la résistance.....**14**
Fig. I.9 : Effets de la granularité sur la résistance.....**14**
Fig. I.10 : Éprouvettes non vibrées non piquées.....**14**
Fig. I.11 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.....**16**
Fig. I.12 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale.....**17**
Fig. I.13 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v).....**18**
Fig. I.14 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).....**20**
Fig. I.15 : Évolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines.....**23**
Fig. I.16 : Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines.....**24**

Chapitre II

Fig. II.1 : Essai de la masse volumique absolue.....**26**
Fig. II.2 : Essai de la masse volumique apparente.....**27**
Fig. II.3 : Essai d'équivalent de sable.....**28**
Fig. II.4 : Essai d'analyse granulométrique.....**29**
Fig. II.4 : Essai d'analyse granulométrique.....**29**

Chapitre III

FigureIII. 1 : Essai de résistance à la flexion.....**41**

Photo III.1 : Appareil de traction par flexion **42**
Photo III.2 **:** Appareil utilisée pour l'essai de compression **43**
III.3-Photo de préparation des échantillons **44**
III.4 -Photo de melange..... .. .**44**
III.5 Photo : Table de vibration **45**
III.6-Photo **:** Conservation des éprouvettes dans l'eau..... .. ...**45**
Figure III.2;les courbes de la résistance de compression simple..... .. ....**50**

Figure III.3;les courbes de la résistance de traction par flexion **51**

Figure III.3;Évolution de taux d absorption..... .. ..**52**

Table des matières

REMERCIMENTS **2**
ملخص **4**
Abstract **5**
Résumé **6**
Liste des tableaux **7**
Chapitre II : 7
Chapitre III : 7
Liste des figures **8**
Chapitre I 8
Chapitre II 8
Table des matières **10**
Introduction Générale **13**
CHAPITRE 1 : Revue bibliographique **16**
I.1. Introduction 1
I.2. Historique 1
I.3. Définition 2
I.4. Constitution du béton de sable 2
I.5. Propriétés spécifiques des bétons de sable 7
I.6. Propriétés essentielles du béton de sable 10
I.7. Domaines d'application du béton de sable 14
I.8. Les méthodes de formulation 14
CHAPITRE 2 : Caractérisation des matériaux et procédures d'essais **25**
II.1. Introduction 25
II.2. Caractéristiques des matériaux 25
II.2.1. Sables utilisés 25
II.2.1.1. Masse volumique absolue 25

II.2.1.2. Masse volumique apparente 26
II.2.1.3. Equivalent de sable 27
II.2.1.4. Analyse granulométrique 29
II.2.1.4.1. Module de finesse 33
II.2.2. Ciment 33
II.2.2.1 Caractéristiques chimiques 33
II.2.2.2 Caractéristiques mécaniques 33
II.2.3. Eau de gâchage 34
II.2.4 Les Adjuvants 34
II.2.5. Les fillers 35
II.3. Formulation des bétons de sable résidus de fillers marbre 35
II.3.1. Les Essais de maniabilité 36
II.3.1.1. Conduite de l'essai 36
II.3.2. Formulation du béton de sable témoin 37
II.3.3. Formulation du béton de sable renforcé par filières de marbre 37
II.3.4. Composition de béton de sable utilisé 37
II.3.5. Nomenclature des bétons réalisés 37
II.4. Conclusion 38
CHAPITRE 3 : Résultats et discussions 39
III.1. Introduction 40
III.2 Résistances mécaniques 40
III.3 Préparation de l'échantillon 42
III.4- Résistances à la compression du béton 44
III.4.1 Résistances à la compression (Rc) à 7 jours 44
III.4.2 Résistances à la compression (Rc) à 14 jours 44
III.4.3 Résistances à la compression (Rc) à 28 jours 44
III.5. Résistances à la traction par flexion 45
III.5.1 Résistances à la traction par flexion (Rt) à 7 jours 45
III.5.2 Résistances à la traction par flexion (Rt) à 14 jours 45
III.5.3 Résistances à la traction par flexion (Rt) à 28 jours 45
III.8 -Taux d'absorption d'eau 50
III.9-Évolution du Taux d'absorption d'eau (%) 51
III.10- Conclusion 53
Conclusion générale 55

Recommandations 56
Liste Bibliographique 56

Introduction Générale

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, le béton est le matériau le plus utilisé en raison de ses performances mécaniques, de sa durabilité et de sa facilité de mise en œuvre. Toutefois, la raréfaction des ressources naturelles, notamment les granulats, pousse les chercheurs à s'intéresser à des solutions alternatives plus durables. Le béton de sable, aussi appelé béton sans gravier, apparaît comme une alternative prometteuse,

notamment dans les régions où le sable est abondant mais les granulats grossiers sont rares.

L'efficacité du béton de sable dépend de plusieurs paramètres, parmi lesquels la nature du sable utilisé joue un rôle primordial. Les caractéristiques granulométriques, la forme des grains et leur finesse influencent considérablement la compacité, la maniabilité et la résistance mécanique du matériau. Par ailleurs, l'ajout de fines minérales, appelées additions ou ajouts (comme le filler de marbre ou les cendres volantes), permet d'améliorer la densité de la matrice et les propriétés du béton frais et durci.

Un autre facteur essentiel à considérer est la température de conservation ou de cure. En effet, la température influence le processus d'hydratation du ciment, et par conséquent, le développement des résistances mécaniques au jeune âge comme à long terme. Une température élevée peut accélérer la prise mais affecter la résistance finale, tandis qu'une température modérée favorise un développement plus lent mais plus durable.

Cette étude vise donc à analyser l'effet combiné de trois paramètres clés : la nature du sable (fin, moyen ou grossier), la présence d'ajouts minéraux, et la température de conservation sur les propriétés mécaniques du béton de sable. L'objectif est d'identifier les combinaisons optimales permettant d'obtenir un matériau performant, adapté aux besoins spécifiques des régions arides ou semi-arides, tout en respectant les exigences de durabilité et d'économie de ressources.

Et Cette étude s'articule autour de **trois chapitres complémentaires**.

Le **premier chapitre** constitue une revue bibliographique, qui présente l'état de l'art sur le béton de sable, ses propriétés, ses constituants, et les différentes méthodes de formulation existantes.
Le **deuxième chapitre** est consacré à la **caractérisation des matériaux** utilisés (sables, ajouts, ciment, eau, etc.) ainsi qu'aux **procédures expérimentales** adoptées dans le cadre de cette étude.
Enfin, le **troisième chapitre** expose et analyse **les résultats expérimentaux** obtenus, en mettant en évidence l'effet combiné de la nature du sable, des ajouts et de la température de cure sur le comportement mécanique et la durabilité du béton de sable.

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

I.1. Introduction

’

L'Algérie est un grand consommateur d'agrégats, dont la demande croît annuellement. Face à l'épuisement des granulats dans certaines régions et à l'abondance de sables (dunaire, alluvionnaire, concassé) et de fines dans le Sud, le développement de nouveaux bétons comme le béton de sable devient nécessaire. Normé (P18-500 AFNOR), ce matériau combine sable, fines, ciment et eau. Moins riche en gravillons que le béton ordinaire et moins cimenté que les mortiers, il offre des propriétés physico-mécaniques adaptées à certains usages, tout en apportant des solutions économiques et techniques."*

I.2. Historique

La technique des bétons de sable était tombée en sommeil vers les années 1920 aussi bien en Europe Occidentale qu’en ex URSS pour redevenir d’actualité pendant la deuxième guerre mondiale grâce au comportement de certaines pistes réalisées par l’Allemagne. A travers les différents secteurs (routes, autoroutes, aérodromes, bâtiments et composants du génie civil, ouvrages d’art), les Soviétiques ont développé une méthodologie de formulation et surtout de mise en œuvre dans la préfabrication et la projection

Le béton de sable trouve en effet ses origines dans "le béton aggloméré", mis au point par le Français **Coignet F**. Dans le troisième quart du XIX ^{e} siècle. Ce matériau se composait à l’époque de sable, de ciment, de chaux et d’eau. Plusieurs ouvrages ont été réalisés à partir de ce matériau et constituent les premières applications de cette technique **rapport- sablo crête (1987-1991)**.

On peut citer à titre d’exemple : le mur de soutènement à Passy, la maison COIGNET à Saint Denis, la tour de port Saïd (h=52m) en Egypte et le pont de New York.

La possibilité d’obtenir des niveaux élevés de résistance avec l’utilisation des gros agrégats a fait tomber, à une certaine époque, le béton de sable dans l’oubli. A la fin de la deuxième guerre mondiale, le béton de sable revient en force grâce à ses propriétés spécifiques, à la pénurie des gros agrégats dans certaines régions et bien entendu à la disponibilité de gros gisements de sable.

I.3. Définition

Un béton de sable est un béton, constitué de sable, de ciment, d'eau et/ou de fines d'ajout. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts peuvent être envisagés tels que : des adjuvants, des fibres, des gravillons, poudrette de caoutchouc etc. Comme son nom l'indique, ce mélange est composé de sable comme élément majoritaire, au lieu des agrégats de gros calibres.

Ce qui distingue les bétons de sable des bétons classiques réside essentiellement en leur faible dosage ou non en gravillons tandis qu'un dosage en ciment est similaire aux bétons entre (300 et 400 kg/ m^3) et leur destinations.

On les distingue des mortiers destinés à la réalisation des joints et des enduits.

Ce béton est destiné à réaliser des éléments structuraux, dans le domaine du bâtiment et du génie civil, il doit avoir une résistance caractéristique suffisante, qui est liée à la compacité des constituants mélangés

I.4. Constitution du béton de sable

I.4.1. Les sables

Les sables utilisables sont ceux conformes aux définitions des normes NFP18-541 (ES≥ 75 si le sable est roulé et ES≥ 65 s'il est broyé) [CIMBETON]. Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/D.

Aucun critère granulométrique n'est exigible à priori, la seule restriction d'emploi réside dans la propreté ; les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau, ce qui entraîne une chute de résistance. Les sables de plage ou des dunes pourraient donc être utilisés [2].

I.4.2 Les ciments

Ceux utilisés sont confirmés à la norme NFP15-301, ils sont utilisés comme liants hydrauliques, servent à combler les vides entre les grains de sable et jouent le rôle de fillers.

I.4.3 L'eau

Elle est conforme à la norme NFP18-303. La proportion élevée d'éléments fins nécessite un volume de mouillage plus important, élevant le rapport E/C au dessus de celui des bétons ordinaires ; l'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables.

I.4.4. Les fines d'ajouts

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité; les principaux paramètres l'influençant sont:

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau et
- L'énergie de mise en place.

La différence entre le béton ordinaire et le béton de sable réside principalement dans la gamme granulaire. Des fillers de dimensions majoritairement inférieures à 80 µm sont utilisés pour remplir les vides entre les grains de sable afin de réduire la quantité de ciment.

Dans le cas d'un béton classique, on a les éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 30 mm), ils créent des macro vides que l'on peut remplir par du sable et les vides crées par ce dernier par des fines. Ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer les performances mécaniques coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment est interprétée par la règle suivante:

$$C = 500 / \sqrt[5]{D} \quad \text{Ou} \quad C = 700 / \sqrt[5]{D} \qquad \text{Éq. (II.1)}$$

(Selon l'usage du béton), tel que:

C: Quantité de ciment en (Kg/m^3);
D: Diamètre maximal en (mm);

Le tableau II.4 donne le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre maximal (D_{max}) de l'agrégat employé. [6]

Dans la conception de la composition du mélange, la quantité du filler est considérée comme un liant au même titre que le ciment et donc on peut ainsi parler non plus du rapport E/C mais du

$$E/(C + kF) \qquad \text{Éq. (II.2)}$$

Où C représente le dosage en ciment F le dosage en fillers et k représente le coefficient qui prend en compte la nature du filler.

Tableau I.1 : Relation entre le dosage minimal en ciment et le D_{max}.

Diamètre maximal (D) en (mm)	$C = 550 / \sqrt[5]{D}$	$C = 700 / \sqrt[5]{D}$	
25	290	370	**Béton**
20	300	385	
16	315	400	
8	360	460	
6,3	380	480	**Mortier**
4	415	530	
2	480	610	
1	550	700	

La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable. Ainsi, des Fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci. (Figures II.1 et II.2). On distingue des fines actives (laitiers moulus et cendres volantes) et des fines passives, résultant du broyage de roches massives (fillers calcaires et fillers siliceux).

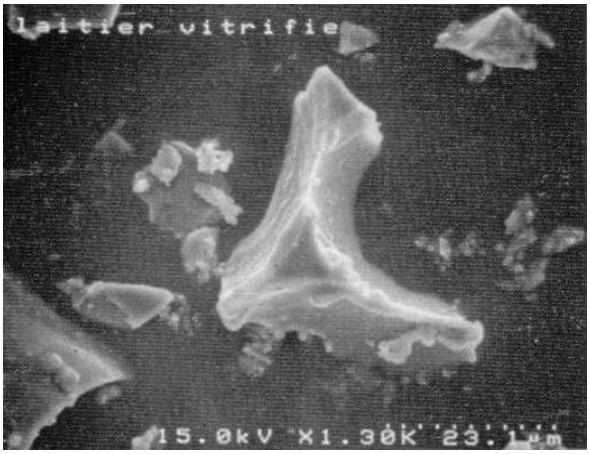


Fig. I.1: Fines anguleuses. (Leur usage conduit à une quantité d'eau supérieure).

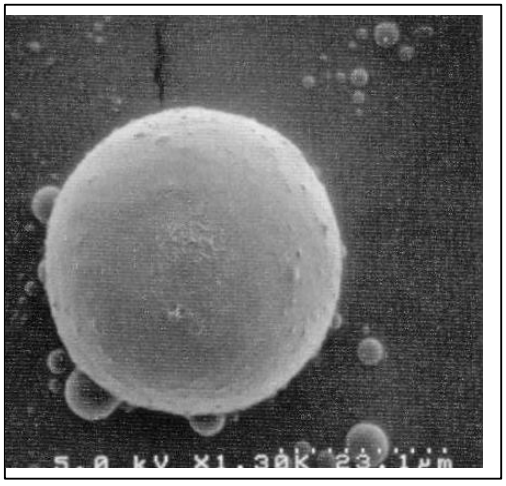


Fig. I.2 : Fines sphériques. (Leur usage conduit à une réduction d'eau).

Les fines actives s'hydratent en présence d'eau au même titre que le ciment et donc accrochent les particules de sable. Parmi les fines passives, les fillers calcaires ont la particularité de s'associer chimiquement avec les hydrates de ciment et donc favorisent l'adhérence entre les particules de sable. [7] [8]

I.4.5. Les adjuvants

On utilise les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, pour avoir les mêmes propriétés. Les deux principaux adjuvants utilisés dans le béton de sable sont :

I.4.5.1 Les plastifiants ou super plastifiants

L'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable; la diminution de la quantité d'eau qui en résulte engendre une amélioration des caractéristiques du béton. (Les adjuvants employés devront être conformes aux normes **NFP 18-300**.

I.4.5.2 Les entraîneurs d'air

L'objectif est de créer un réseau de microbulles d'air qui assurent la protection du béton de sable vis-à-vis du gel et des fondants utilisés en période hivernale Leur utilisation est obligatoire dans les zones froides. [7]

I.4.6 Autres ajouts

I.4.7 Filers de marbre ; l`ajoute filler de marbre dans le béton de sable ,amélioré la compacité , la résistance et la durabilité du mélange .il permet aussi de valoriser un déchet industriel tout en réduisant la porosité du béton



Fig. I.3: poudrette de marbre

I.4.6.2. Les fibres

Elles sont surtout utilisées dans le but d'améliorer le comportement du béton aux jeunes âges ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

On utilise, dans le cas échéant, des fibres organiques (polyester, polypropylène…etc.) pour limiter les effets de retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte.

Si l'objectif est d'améliorer la ductilité du béton, il est préférable, dans ce cas, d'utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fante amorphe.

I.4.6.3. Les gravillons

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et prend la dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable (figure II.4), et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste généralement le même. [7].

L'ajout de gravillons, en faible dosage, a pour objectif d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique.

En pratique, on pourra considérer qu'on a un béton de sable tant que le rapport pondéral ($^{gravillon}/_{sable}$ (G/S) reste inférieur à 0,7.

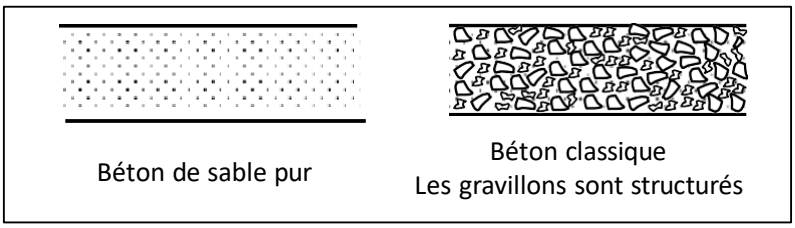


Fig I.4: Différence entre béton de sable et béton ordinaire [12]

Les gravillons utilisés doivent être conformes aux spécifications de la norme **NFP 18 541**.

I.4.6.4. Les colorants

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants utilisés dans le béton classique peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps; pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas.

I.5. Propriétés spécifiques des bétons de sable

Du fait de la présence des fines, les bétons de sable nécessitent plus d'eau de mouillage que les bétons classiques, ce qui se traduit par des valeurs E/C plus élevées (>0,5) si on ne considère que le ciment, mais ce rapport devient similaire à celui des bétons classiques si on considère (C+F), F étant les fillers.

Pour un rapport E/C constant, plus le sable sera grossier, plus la maniabilité sera bonne puisque la surface à mouiller est moins importante. De même, l'augmentation de la teneur en fines entraîne une perte de maniabilité sauf dans le cas des fines sphériques non absorbantes qui améliorent la maniabilité tout en réduisant la quantité de vides.

A dosage en ciment constant et pour un type de filler donné, le gain de compacité augmente avec la finesse des fillers. Si l'on prend en considération l'activité hydraulique et l'avidité d'eau, les résistances peuvent varier dans un sens ou dans un autre puisque certains fillers hydrauliquement actifs peuvent exiger plus d'eau alors que d'autres sont réducteurs d'eau de par leur état de surface ou leur forme.

I.5.1 Caractéristiques physiques et mécaniques

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montée en résistance est plus lente – ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrages mis en charge précocement- d'autre part, il est aisé d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques, même à court terme. La vocation de ces derniers n'est pas de se substituer mécaniquement aux bétons ordinaires, mais d'être une nouvelle source de bétons de qualité, au sens large. C'est dans cet esprit que plusieurs comparaisons ont été faites avec le béton classique dans l'objectif de voir dans quelles mesures les bétons de sable pourraient les remplacer.

L'analyse du comportement du béton de sable à l'état frais et l'observation de fragments durcis au microscope électronique à balayage permettent de décrire la microstructure du matériau comme homogène, d'aspect amorphe avec un bon enchevêtrement des inclusions de sable dans la matrice. Le caractère peu ou pas fissurant mis en évidence par le MEB s'explique par l'uniformité de séchage entre le cœur et la périphérie d'une éprouvette cylindrique. Cette uniformité de séchage entraîne de faibles gradients hydriques et donc de faibles contraints de traction en surface d'où une faible densité de fissuration. [1] et [10]

L'étude de la prosimètrè au mercure montre une différence entre les porométries du béton de sable et celles du béton ordinaire. En effet, l'histogramme des pores du béton de sable présente un pic unique décalé vers les gros micropores (au voisinage de 250A° autour duquel se trouvent 80 à 90% des pores du complexe) alors que dans les bétons classiques, on trouve deux pics, l'un correspondant aux micropores (entre 50 et 100A°) et l'autre aux macrospores (600 à 1300A°). La porométrie du béton de sable est donc de type monomodal alors qu'elle est bimodale dans les autres bétons. [1]

I.5.1.1 Comportement à la fatigue

La tenue à la fatigue est importante à connaître pour dimensionner une structure. Il s'agit pour un niveau de contrainte répétée, de voir à partir de quel moment il y a rupture.

Les études réalisées [sablocréte] ont permis de constater que le béton de sable avait un comportement analogue à celui des matériaux traités au ciment.

I.5.1.2. Retrait et fluage

On distingue deux retraits :

- Retrait d'auto dessiccation : se fait sans contact avec le milieu extérieur et est voisin de celui des bétons ordinaires.

- Retrait de séchage : a lieu en milieu ambiant et peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons.

En matière de fluage, un phénomène analogue a été observé, lié à la structure du béton de sable et confirmé par les valeurs des modules d'élasticité très différents entre les bétons de sable et les bétons ordinaires. Le niveau de résistance en compression (inférieure à 25MPa) y est pour beaucoup. C'est ainsi qu'à un niveau de contrainte en compression de 25MPa, on note à peu prés la même chose, à savoir que la cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable, alors que le fluage de dessiccation du béton de sable a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importante même.

Des essais ont montré que, en passant de 25 à 50MPa, le fluage du béton de sable était divisé par 5 et n'était supérieur à celui du béton ordinaire que de 20%. [7].

De même, sous contrainte élevée, les déformations de fluage ne présentent plus de caractère linéaire. [13] [10]

I.5.1.3. Durabilité des bétons de sable

La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend évidemment de l'environnement de celui-ci. L'estimation de la durabilité se fera par conséquent à l'aide d'essais de perméabilité à l'eau et à l'air, de mesure de la carbonatation et de la pénétration des ions chlorures. Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico chimiques. [7]

- La perméabilité à l'eau est plus faible qu'un béton ordinaire ($2{,}5x10^{-12}$ contre $1x10^{-10}$ m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés [10].

- La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores < (10μm) et de l'absorption initiale. Des résultats expérimentaux montrent une quasi proportionnalité entre profondeur carbonatée et absorption initiale. [14] [10]

- Le comportement à la pénétration des ions chlores est comparable à celui des bétons traditionnels.

I.5.1.4. Fissuration

Le module d'élasticité relativement faible du béton de sable implique une plus grande déformabilité que pour les bétons ordinaires et donc un moindre risque de fissuration. L'absence de gros agrégats est aussi un facteur atténuateur de fissuration qui confirme le caractère peu fissurant du matériau. Le séchage du béton de sable est uniforme, en effet les gradients hygrométriques entre la périphérie et le cœur d'une éprouvette sont faibles ce qui entraîne de faibles gradients de contraintes et par conséquent une faible fissuration.

La microstructure du béton de sable est une structure continue, la pâte de ciment est d'apparence amorphe et présente un aspect compact sans fissures notables. La porosité totale du béton de sable est de l'ordre de 11 à 13% ; elle est proche de celle d'un béton classique. La cinétique de séchage très rapide et uniforme explique l'absence de fissuration.

I.6. Propriétés essentielles du béton de sable

I.6.1. Maniabilité du béton frais

Une des particularités du béton de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement supérieures à 0,5. Ce rapport est généralement compris entre 0,6 et 0.8 par rapport à un E/C de 0,5 à 0,6 pour le béton ordinaire avec des maniabilités comparables ; cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange qui a besoin d'être mouillée.

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la figure II.5 qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité.

La figure I.6 montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport E/C augmente. Cependant pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend da la nature des fines d'ajout.

La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.

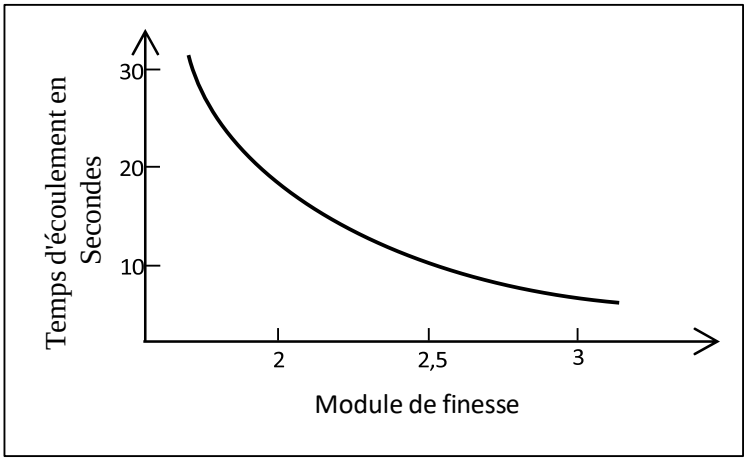


Fig. I.5: Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [8]

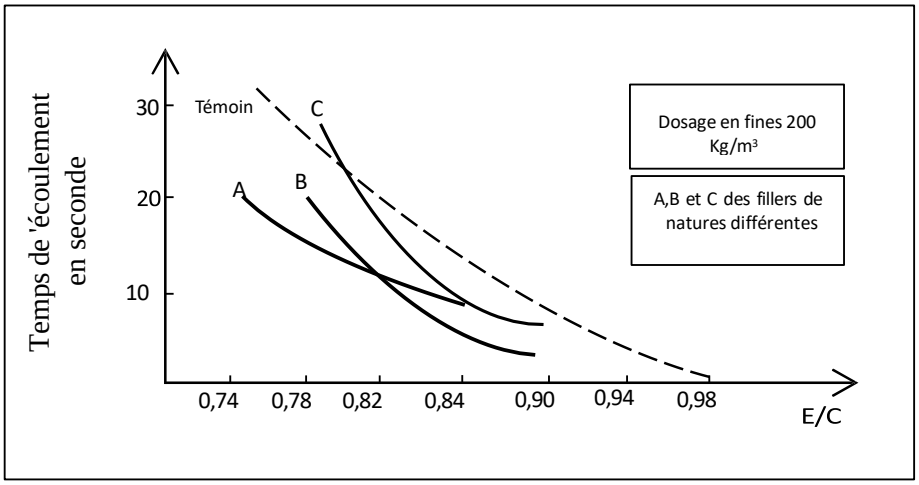


Fig.I.6: **Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C)** [7]

I.6.2. Résistance

C'est la propriété la plus importante pour l'usage de matériau. La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres tels que : La finesse des fines d'addition, la nature de fines l'addition, la dimension du D_{max} …

I.6.3. La finesse des fines d'addition

Plus l'addition est fine plus la compacité est importante (et donc gain en résistance) ; le résultat est valable quelque soit la granulométrie et la nature du sable (sable alluvionnaire, sable de dunes…etc.). Figure (I.7).

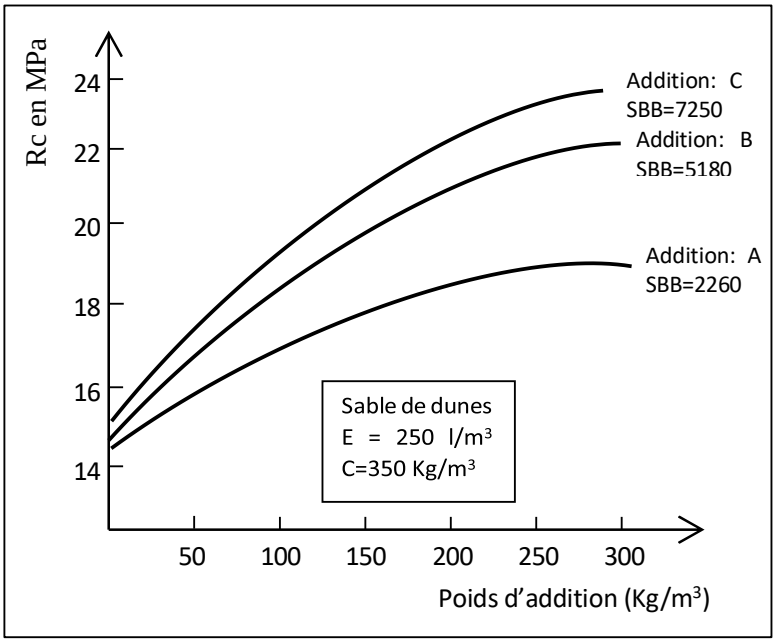


Fig.I.7 : Effet du dosage et de la finesse de poids d'addition sur la résistance

I.6.4. La nature de fines l'addition

L'ajout de fines d'additions aux bétons de sable permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain en résistance est très variable à même dosage en fines. La figure II.8 permet de constater la diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler.

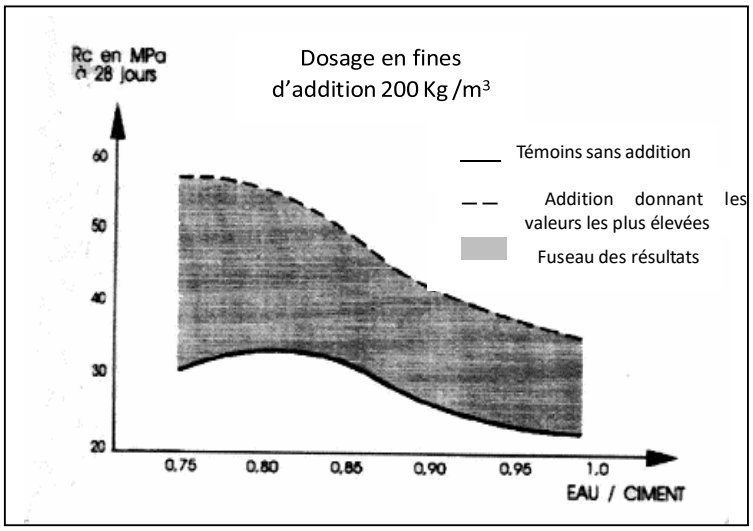


Fig.II.8 : Influence de rapport (Eau /Ciment) et nature des fines sur le niveau de résistance.

I.6.5. La dimension du D_{max}

La figure I.9 montre que pour une même valeur du rapport E/C, on constate que l'effet du diamètre D_{max} du plus gros agrégat est peu important, et pas défavorable aux sables pour la résistance à la compression. Concernant l'influence de D_{max} en fonction de dosage en ciment I.9.B on constate que la résistance de compression augmente en fonction de dosage de la plus grosse dimension.

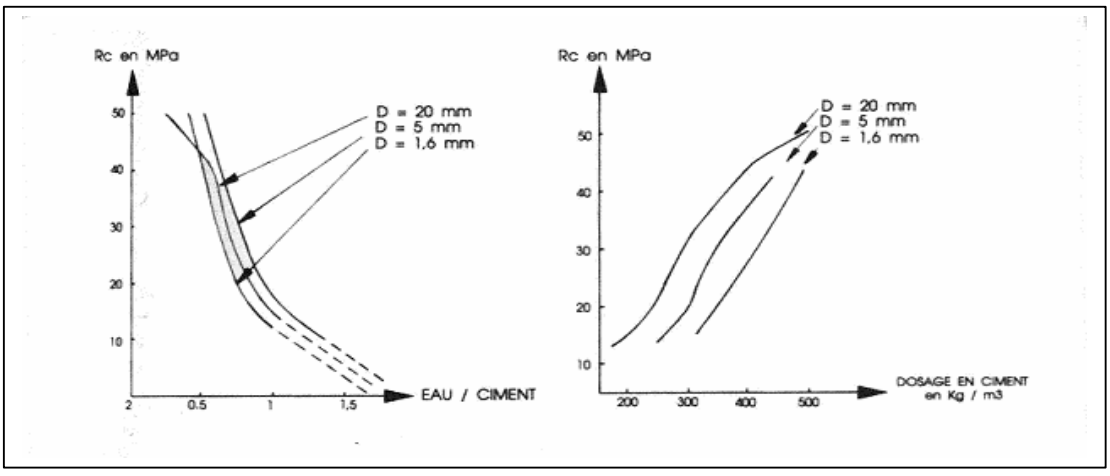


Fig.I.9: Effets de la granularité sur la résistance

Concernant la maniabilité, l'effet est très important. On trouve que pour un D_{max} égal à 20 mm le béton est très maniable ; alors que, ce n'est pas le cas pour un D_{max} égal à 1.6 mm. [7].

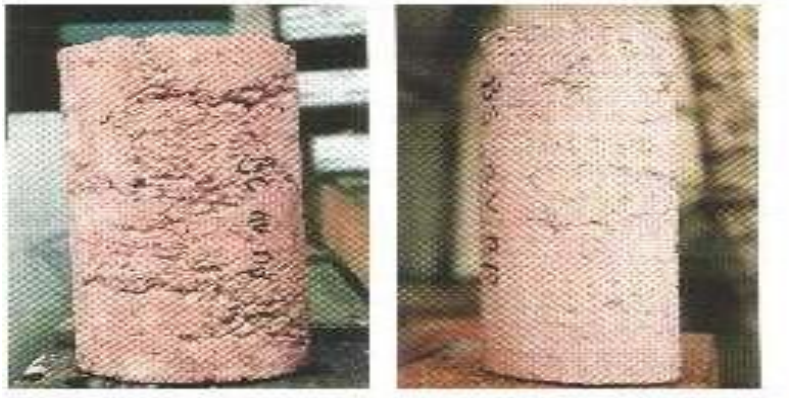
I.6.6 Résistance au gel et au dégel

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalente aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition des micropores. Figure I.10 b)

I.6.7 Phénomène de ségrégation des constituants

Du fait de son faible étendue granulaire, et donc sa plus grande homogénéité, combinée à une bonne maniabilité, le béton de sable présente un meilleur comportement vis à vis des phénomènes de ségrégation que les bétons ordinaires. Cette faculté apparaît plus clairement à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en œuvre variables.

Les deux figures qui suivent montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées, sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastique équivalentes
(cône de 14 cm.)



a) Béton ordinaire b) Béton de sable

Fig I.10 :Éprouvettes non vibrées non piquées.

I.7. Domaines d'application du béton de sable

Le béton de sable a été utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes [4] :

- Dans la préfabrication: murs architecturaux, mobiliers urbains, en bâtiment, voirie, etc.
- Dans la projection: travaux de rénovation, ponts, égouts visitables, en bâtiments etc.
- Comme béton de sable coulé: dans les routes, autoroutes, aérodromes, en bâtiment, etc. [12]

I.8. Les méthodes de formulation

I.8.1 Définition

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants, à fin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques. Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème. Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique. A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre expérimentale, en se basant sur les deux critères principaux des bétons structuraux

- La résistance mécanique.
- La maniabilité qui est la facilité de la mise en œuvre.

I.8.2 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [1] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{max}).

Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit [7] :

$V = V_0 (d / D_{max})^{1/5}$ Éq. (I.3)

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ; D_{max}

: La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

I.8.2.1 Dosage en fines d'un béton de sable

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80µm (0,080mm) et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.

2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80µm et le diamètre maximal du sable D_{max} , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80µm. provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80um et l'étendue du sable comprise entre 80µm et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$Ps = V = 0.75 (0.08/D)^{1/5}$$ Éq. (I.4)

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80 m et D_{max}

D_{max} : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V_0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7÷0.8).

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80µm, et à combler la porosité du sable ainsi calculée.

En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines < (80µm) et le volume des vides associé a l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38\ (0.08/D_{max})^{1/5}. \qquad \text{Éq. (II.5)}$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.

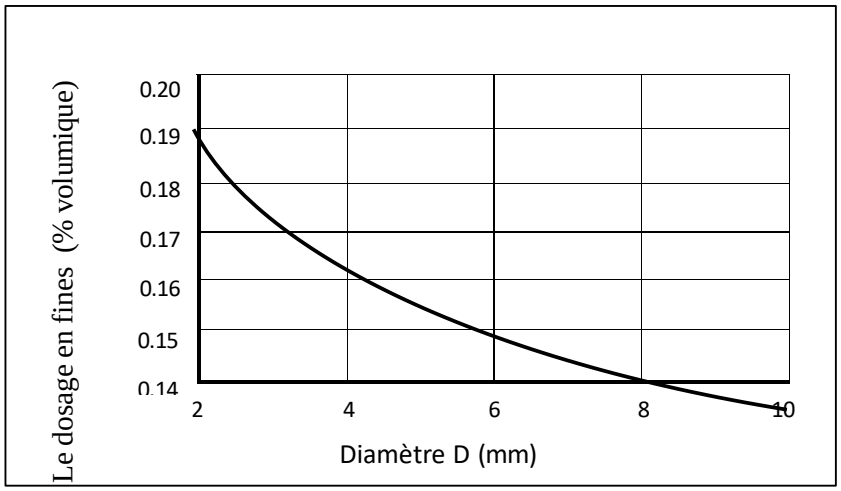


Fig.I.11 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [7]

I.8.2.2 Dosage en eau d'un béton de sable

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v

$$(e + v)_{min} = 0.8\ (d/D_{max})^{1/5} \qquad \text{Éq. (I.6)}$$

Cette formule exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

d = (60 / (f)) mm Éq. (II.7)

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant.

: Densité du constituant exprimée en g/cm^3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 µm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale .

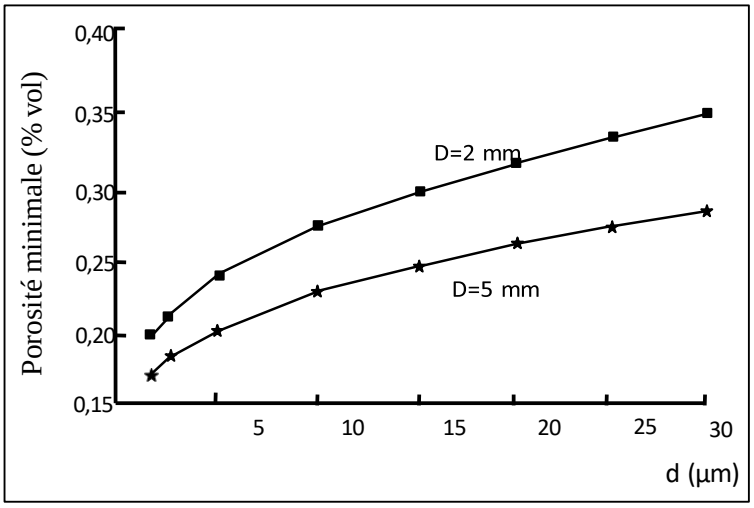


Fig.I. 12 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable. [7] [8]

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v)

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la figure I.13 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

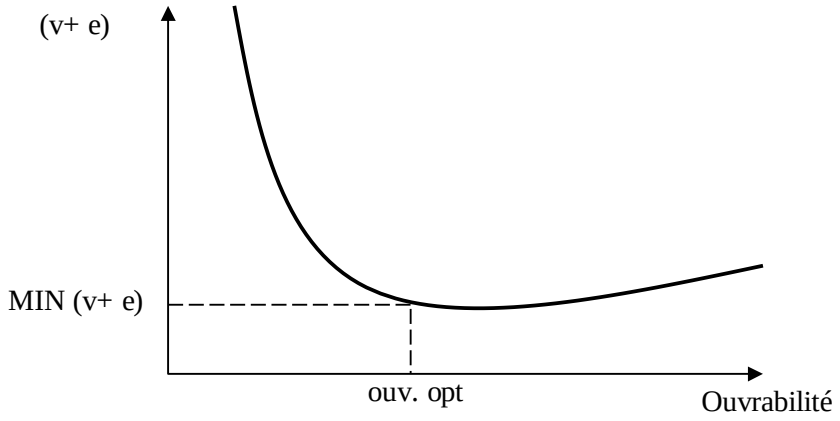


Fig.I.13: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piègera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e+v) supérieure à $(e+v)_{min,}$ alors pour des quantités d'eau supérieures à celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans les bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

[Vides] = K [eau] Éq. (I.8)

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

I.8.2.3. Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, ($1m^3$), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide).

[Sable]=1000-[fines]-[eau]-[vide] (l/m^3).

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80µm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

II.8.2.4 Estimation de la résistance en compression

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [1] a été proposée récemment.

$$Rb = \frac{Kf \times Rc}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \qquad \text{Éq. (I.9)}$$

Avec :

K_f : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

R_c : classe vraie du ciment (MPa) ;

E : dosage en eau total (l/m^3) ;

V : air piégé (l/m^3) ;

C : dosage en ciment (kg/m^3) ;

R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$K_1 = K_{cv}\,(CV/C)+K_{fs}\,(FS/C)$;

$0.2 < K_{cv} < 0.4$ $\quad 2 < K_{fs} < 3.3$ $\quad K_1 \leq 0.5$

$K_2 = K_{fil}\,(Fil/C)$;

$0 < K_{fil} \leq 0.4$ $\quad K_1 < 0.2$

K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire. (Voir figure II.14.)

K_{cv}, K_{fs}, K_{fill} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente [1], alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

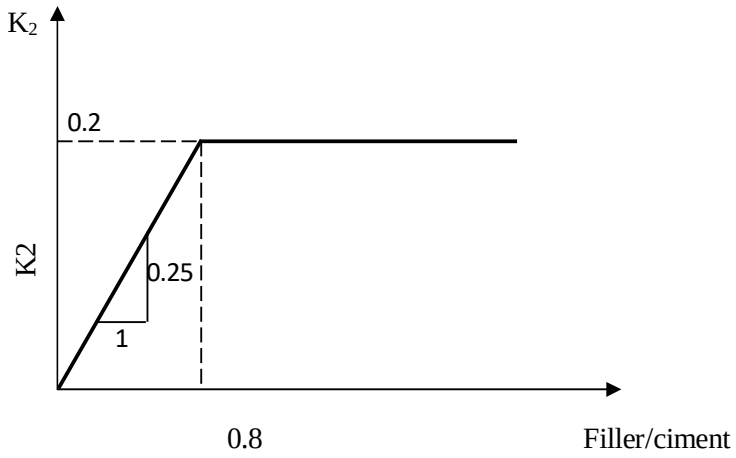


Fig.II.14 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre parametre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le systeme de deux équations simples

- Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = doage en fines.
- Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Il en resulte de tout ce qui précéde que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

I.8.3. Méthode expérimentale de formulation

I.8.3.1. La méthode expérimentale de formulation du béton de sable vise à obtenir un matériau compact et performant, sans chercher à expliquer les phénomènes en jeu. Elle s'appuie sur un dosage fixe en ciment pour respecter les exigences normatives. Inspirée de la méthode itérative de Baron-Lesage, elle repose sur des gâchées légères, évaluées par la maniabilité (maniabilimètre LCL) et la masse volumique apparente. Cette méthode a donné de bons résultats pour divers types de bétons, comme les bétons de pieux, routiers ou projetés

I.8.3.2. Les différentes étapes de la formulation

I.8.3.2.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

a) Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m^3).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m^3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 µm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, V_{air}, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton; on aboutit à la relation suivante :

$$V_{air} + V_C + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \quad \text{(En litres).} \qquad \text{Éq. (I.10)}$$

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule d'un mètre cube du béton S (Kg/m^3).

d) Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Lorsqu'on fait la confection de la formule initiale du béton, et la détermination de :

- La valeur du temps d'écoulement 't' au maniabilimètre à mortier LCL.

- La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

Cette formule doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$s_i = s_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm V \times MV_{sable} \qquad \text{Éq. (I.11)}$$

Tel que : MVAT et MVAR représentent respectivement la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle du béton.

Si le temps d'écoulement au maniabilimètre est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si le temps d'écoulement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (-V dans l'équation).

Après chaque correction, la masse volumique apparente théorique devra être comparée à la masse volumique apparente réelle.

I.8.3.2.2. Détermination du dosage en fines d'addition

Il faut maintenant introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides.

Notre objectif, est d'obtenir une formule de un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \qquad \text{Éq. (II.12)}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées:

- **Fine d'addition N° 1 :** Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m^3 de fines. Figures I.15, I.16

- **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.

- **Fine d'addition N° 3 :** Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m^{3}de fines.

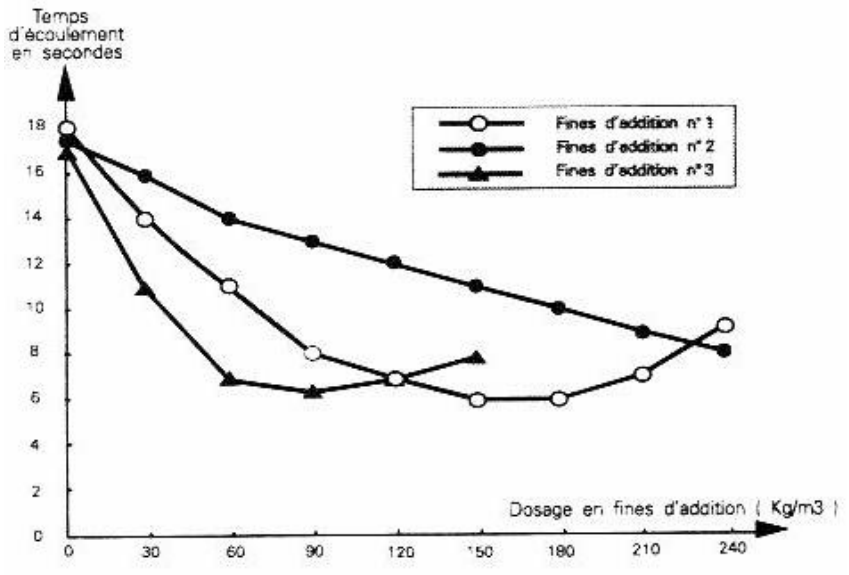


Fig.I.15 : Evolution de la maniabilité (T d'écoulement) en fonction du dosage en fines d'addition.

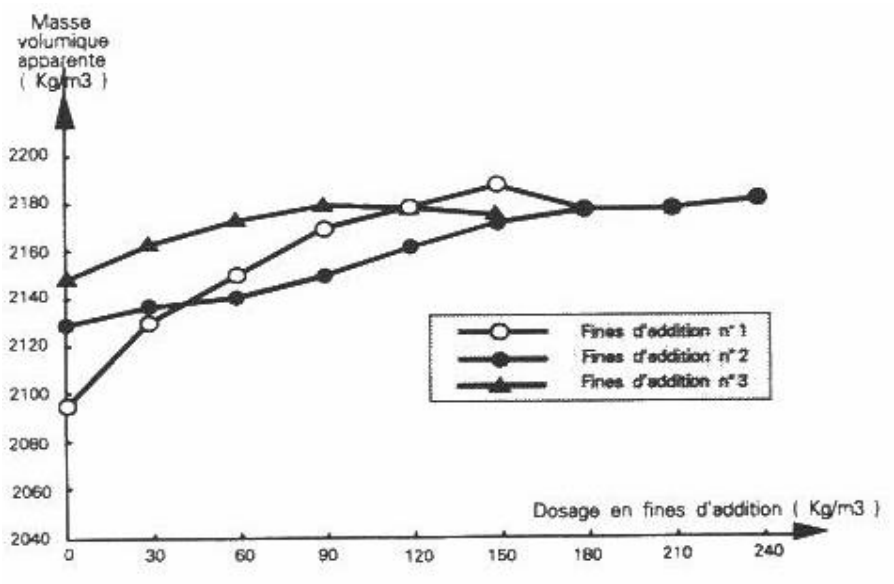


Fig.I.16 : masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition

Résumé ;.

À travers ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance croissante du béton de sable en tant qu'alternative pertinente au béton ordinaire, notamment dans les régions à ressources limitées en gros granulats. L'évolution historique, la composition, les propriétés spécifiques ainsi que les différentes méthodes de formulation démontrent que le béton de sable constitue une solution technique et économique fiable pour de nombreuses applications. Sa maniabilité, sa durabilité et sa faible fissuration, combinées à la possibilité d'utiliser des ajouts comme les fillers ou la poudrette de marbre, en font un matériau innovant et adaptable aux exigences modernes du génie civil

CHAPITRE 2 : Caractérisation des matériaux et procédures d'essais

II.1. Introduction

Le béton de sable est un matériau composite constitué essentiellement de sable, de liant et d'eau, sans gravier, souvent utilisé dans des applications spécifiques telles que les éléments préfabriqués ou les couches de surface. Son comportement dépend fortement des caractéristiques de ses constituants et des conditions de mise en œuvre. Ce chapitre présente les matériaux utilisés dans l'étude, notamment les différents types de sable, les ajouts minéraux et le liant. Il décrit également les principales propriétés physiques et chimiques des constituants. Enfin, les protocoles expérimentaux adoptés pour évaluer les performances du béton de sable sont détaillés, en lien avec les conditions de température imposées.

II.2. Caractéristiques des matériaux

II.2.1. Sables utilisés

Le sable désigne tout granulat dont la fraction granulométrique est comprise entre 0 et D mm, conformément aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301. Il peut s'agir d'un sable naturel, provenant d'un oued ou d'une sablières , ou d'un sable de carrière obtenu par concassage de roches massives ou détritiques [05]. Dans cette étude nous avons utilisé trois types de sable. Un sable de dune de type siliceux (S1) provenant de la région d'Oued-Souf, un sable alluvionnaire de la région de Boughezoul de type siliceux-argileux (S2) et un sable concassé de carrière de type calcaire riche en CaCo3 (S3).

II.2.1.1. Masse volumique absolue

Cet essai est régi par la norme NFP18-301, elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains [16]. Cet essai permet de connaître la masse d'une fraction granulaire lors de l'élaboration d'une composition de béton. [15]

Mode opératoire

Cette méthode consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume V1 d'eau, ensuite peser un échantillon sec MS de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V2, la masse volumique absolue est alors donnée par la formule suivante [16]:

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.1)$$

Où : ρ_s : Masse volumique absolue ;

M_S: Masse des grains solides ;

V_1 : Volume de l'eau ;

V_2 : Volume total (grains solide + eau).

Le tableau II.1 présente les résultats obtenus de la masse volumique absolue.

Tableau II.1: Masse volumique absolue des sables utilisés

Type de sable	ρ_s (kg/m^3)
S1	2650
S2	2660
S3	2670



Figure II.1: Essai de la masse volumique absolue

II.2.1.2. Masse volumique apparente

Cet essai est régi par la norme NFP 18 -554, elle est défini comme étant la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

Mode opératoire

Cette méthode consiste à remplir un récipient dont le volume V est bien connu, par un échantillon sec de granulats, en prenant soin de bien raser le bord du récipient, peser l'échantillon sec M de granulats, la masse volumique apparente est déterminée par la relation suivante [16]:

$$\rho_a = {}^{M}/_{V} \quad \text{(2.2)}$$

Où :

ρ_a: Masse volumique apparente ; M :

Masse de l'échantillon ;

V : Volume de l'échantillon.

Le tableau II.2, présente les résultats obtenus de la masse volumique apparente des sables utilisés.

Tableau II.2: Masse volumique apparente

Type de sable	ρ_a (kg/m^3)
S1	1600
S2	1610
S3	1660



Figure II.2: Essai de la masse volumique apparente

II.2.1.3. Equivalent de sable

Il est défini par la norme NFP 18-598 ; cet essai permet de mesurer la propreté du sable, il est effectué sur la fraction d´un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floculent [N.F, 1991].

Mode opératoire

Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable, il donné par la formule suivante [16] :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad \text{..... (2.3)}$$

Où :

ES: équivalent de sable ;

h_1: hauteur du sable propre et élément fins; h_2 :

hauteur du sable propre seulement.



Figure II.3: Essai d'équivalent de sable

Tableau II.3: Nature et qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable [CHABIA.R, 2016]

Equivalence de sable Par piston et visuel	Nature et qualité du sable
E.S.P< 60 E.S.V <65	" Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
60 ≤E.P.S < 75 75>E.S.V> 65	" Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
75 ≤E. P.S < 85 80> E.S.V>75	" Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
E.P.S > 85 E.S.V< 85	" Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Les résultats présentés dans le tableau II.4, montre les pourcentages obtenus de l'équivalent de sable pour les sables utilisés dans ce travail.

Tableau II.4: Résultats de l'équivalent de sable

Sable	ESP/ESV	ES	Nature qualité du sable
S1	Piston	70.11	Sable légèrement argileux
	Visuel	68.21	
S2	Piston	73.27	Sable légèrement argileux
	Visuel	71.35	
S3	Piston	76.58	Sable propre à faible pourcentage de fines
	Visuel	75.10	

II.2.1.4. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondérés respectifs des différentes familles des grains constituants l'échantillon. Cet essai est défini par la norme (NF P18-560).

But de l'essai

Le but de l'analyse granulométrique est de classifier et exprimer les poids des particules constituant un échantillon de sable en fonction des diamètres de ces particules.

Principe d'essai

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

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisas sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique) [NF EN 933-1]

En utilisant généralement les tamis 0.08, 0.160, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5mm.



Figure II.4: Essai d'analyse granulométrique.

Nous avons utilisé trois échantillons :

Premier échantillon : S1 ;

Deuxième échantillon : S2 ;

Troisième échantillon : S3 ;

Les résultats d'analyse granulométrique obtenus pour les sables utilisés sont représentés dans les tableaux et figures 5, 6 et 7suivantes.

Tableau II.5: Résultats d'analyse granulométrique du S1

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0	0,00	100,00
2,5	0	0,00	100,00
1,25	0	0,00	100,00
0,63	2,9	0,48	99,52
0,315	320,3	53,38	64,62
0,16	585,1	97,31	2,48
0,08	592,0	98,66	1,33
Fond	598,2	99,70	0,31

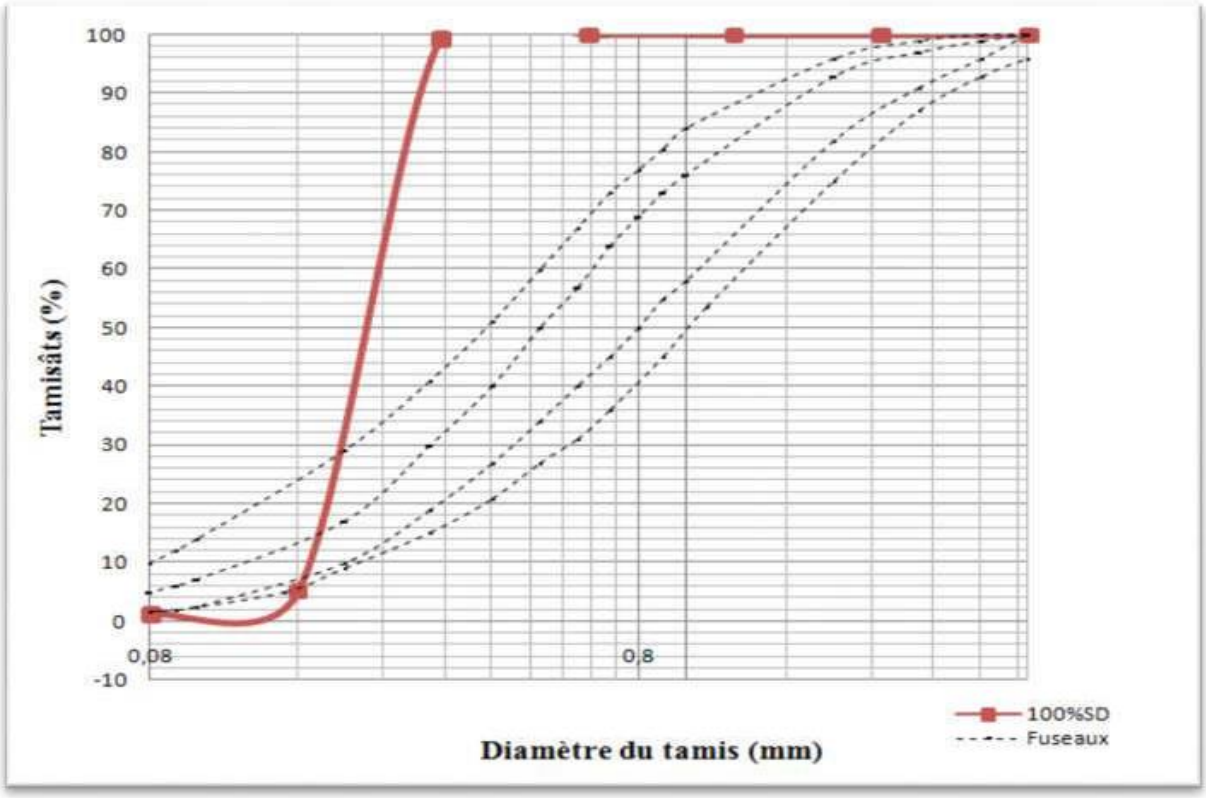


Figure II.5: Courbe granulométrique du sable S1

Tableau II.6: Analyse granulométrique du sable S2

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	00	00	100
2,5	24,90	4,15	96
1,25	121,86	20,31	80
0,63	229,44	38,24	62
0,315	349,02	58,17	42
0,16	468,84	78,14	22
0,08	552,42	92,07	8
Fond	598,20	99,70	0,00

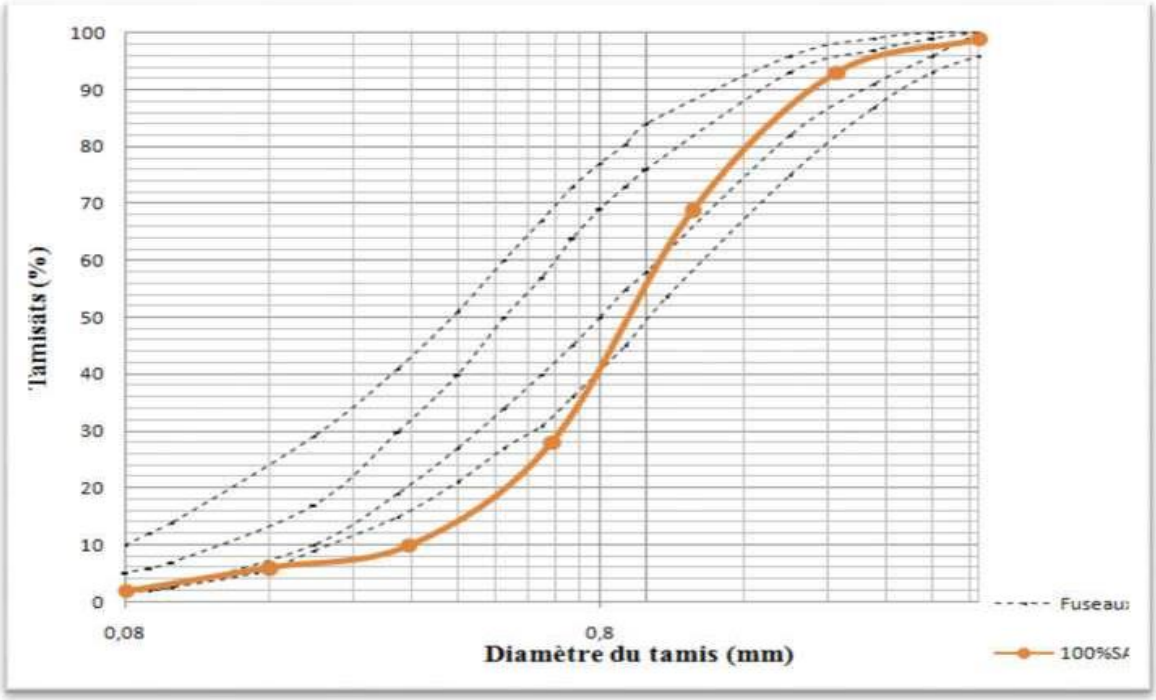


Figure II.6: Courbe granulométrique sable S2

Tableau II.7: Analyse granulométrique du sable carrière 0/3 EPTTRS

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	25,20	4,20	95,80
2,5	168,00	28,00	72,00
1,25	283,20	47,20	52,80
0,63	366,12	61,02	38,98
0,315	445,80	74,30	25,70
0,16	541,80	90,30	09,70
0,08	585,00	97,50	02,50
Fond	599,94	99,99	0,01

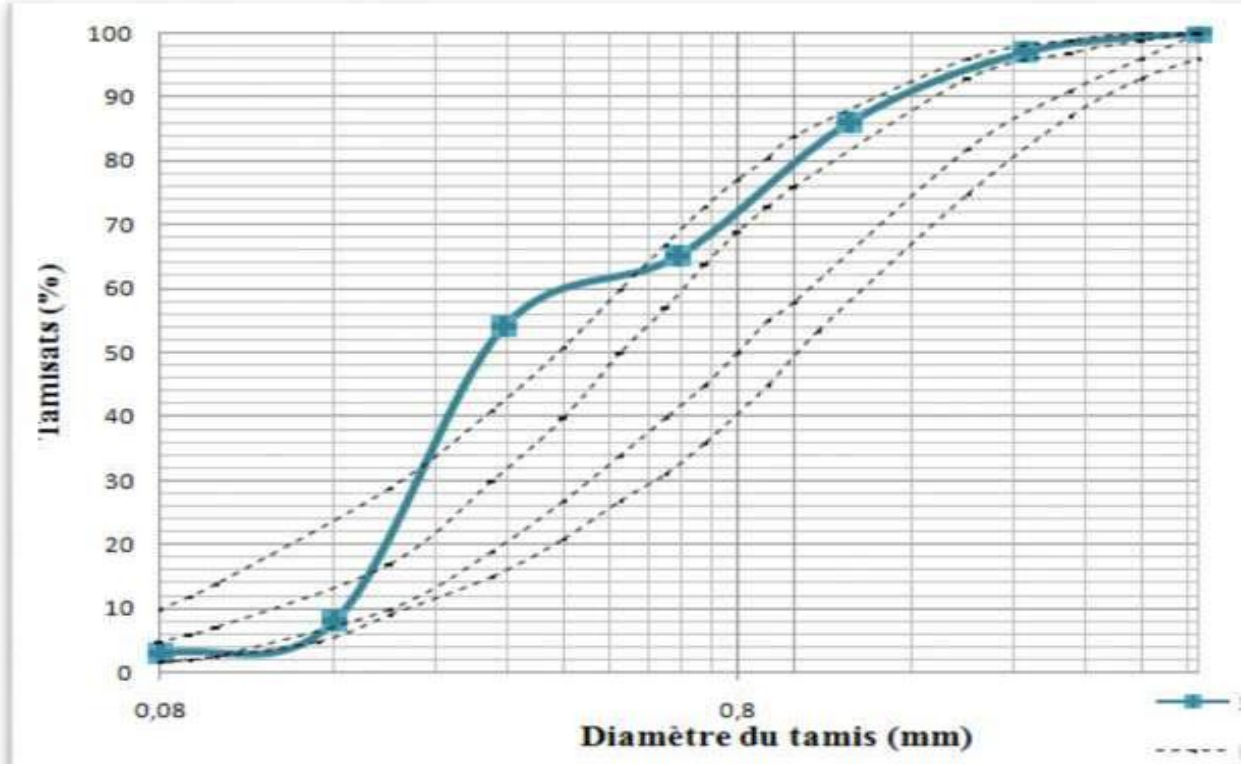


Figure II.7: Courbe granulométrique sable S3

II.2.1.4.1. Module de finesse

Les sables sont caractérisés par le module de finesse, ce module est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur les tamis de série suivant (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm) [17].

$$M_f = \Sigma R_c / 100 \text{ ..... (2.4).}$$

Où :

R_c : refus cumulé en (%).

Les modules de finesse de chaque échantillon sont représentés dans le tableau ci-dessus : Tableau II.8 : Modules de finesses de différents échantillons

Echantillons	Module de finesse (M_f)	Classement des sables
S1	1,53	Sable fin
S2	1,99	Sable considéré moyen
S3	3,05	Sable gros

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment CPJ CEM II /BL 42.5N (dénommé El Matine) disponible fabriqué par la cimenterie Lafarge ciment de Hammam El Dalla à M'sila. Les caractéristiques chimiques et mécaniques du ciment utilisé proviennent de la fiche technique du ciment et sont récapitulés dans les tableaux 9 et 10 suivants.

II.2.2.1 Caractéristiques chimiques

L'analyse chimique du ciment utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau suivant :

Tableau II.9: L'analyse chimique du ciment [F.T.M 1017] équivalent la norme NF EN 196-2

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (NA5042) (%)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxide de magnéium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

II.2.2.2 Caractéristiques mécaniques

Le tableau suivant résume certaines caractéristiques mécaniques de ciment utilisé.

Tableau II.10: Caractéristiques physiques et mécaniques de ciment utilisé[F.T.M 1017]

Propriétés physiques et mécaniques	CPJ-CEM II /B-L
Début de prise heur/min	150±30
Fin de prise heur/min	230±50
Rc_{28} (MPa)	≥42.5
Rc_2 (MPa)	≥10.0

II.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection du béton est l'eau potable du robinet. L'analyse chimique de l'eau a été effectuée au laboratoire Algérienne des Eaux de Médéa, les résultats sont présentés dans le tableau II.11

Tableau II.11Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée

Ca^{++}	Mg^{++}	K^{+}	Na^{+}	Cl^{-}	NH_4	SO_4^{-}	HCO_3^{-}	PH	salinité
48,6	12,4	2,1	15,3	25,8	0,05	19,6	125,4	7,5	0,3g/l

*Les concentrations sont données en mg / l

D'après les résultats notre eau représente une faible salinité, donc pouvant être utilisée pour les bétons et mortiers normaux en vigueur <NF EN 1008>

II.2.4 Les Adjuvants

Un super plastifiant appelé Sika® viscocrete® TEMPO-12 et un plastifiant haut réducteur d'eau a été utilisé pour la confection de tous les bétons réalisés, les caractéristiques sont résumés dans le tableau 12 suivant.

Tableau II.12: Caractéristiques de **Sika® ViscoCrete® TEMPO-12**

Couleur	Aspect	pH	Teneur en chlore	Extrait sec	Densité
Brun clair foncé	Liquide	4,5-6,5	< 0,1 g	28,1-30,9 %	1.060



Figure II.8: Le plastifiant utilisé Les

propriétés de l'adjuvant sont :

- diminuer le rapport E / C;
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Eviter la ségrégation
- Conservation de l'ouvrabilité par temps chaud.

II.2.5. Les fillers

Pour le besoin de la composition du béton de sable réalisé, des fillers de marbre ont été utilisé. Les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques ainsi que la réactivité des fillers utilisés sont récapitulées dans les tableaux suivants.

1. Origine

Le matériau étudié est un marbre blanc, de nature calcaire, provenant de petites unités de transformation de marbre de la région de Médéa.

2. Propriétés physiques

Propriété	Valeur typique	Méthode d'essai
Densité absolue	2,70 – 2,75 g/cm³	NF EN 1097-7
Densité apparente	0,9 – 1,2 g/cm³	NF EN 1097-3
Teneur en humidité	< 1 %	Séchage à 105 °C
Surfacespécifique (Blaine)	3000 – 9000 cm²/g	NF EN 196-6
Teneur en fines < 63 µm	> 95 %	NF EN 933-10

3.Propriétés chimiques

Composé	Pourcentage typique	Méthode
$CaCO_3$ (Carbonate de calcium)	> 95 %	NF EN 196-2
$MgCO_3$ (Carbonate de magnésium)	< 3 %	Analyse chimique
SiO_2	< 1 %	XRF ou spectroscopie
Fe_2O_3	< 0,5 %	Idem
LOI (Perte au feu à 950 °C)	43 – 45 %	NF EN 196-2

4.Propriétés mécaniques et réactivité

- Réactivité pouzzolanique : Faible ou nulle (comportement inert)
- Rôle principal : effet de filler (compactage, rhéologie)
- Influence sur la maniabilité : amélioration du pouvoir lubrifiant

5. Aspect visuel de la poudre de marbre utilisé

- Couleur : blanc à beige clair
- Texture : poudre fine

II.3. Formulation des bétons de sable résidus de fillers marbre

Après avoir choisi les constituants utilisés dans la composition des bétons de sable modifié par de fillers de marbre, et après détermination des propriétés, on procède à la détermination de dosages de chaque composé, et cela dans le but d'avoir une maniabilité acceptable par rapport à la consistance du béton souhaitée.

II.3.1. Les Essais de maniabilité

Les Essais de maniabilité permis d'apprécier la fluidité d'un mortier selon la norme NF P18-452. La maniabilité est une propriété physique spécifique du béton sans tenir compte des conditions particulières d'utilisation pour un type donné d'application. Elle est définie comme étant la propriété d'un mortier ou d'un béton fraîchement malaxé qui définit la facilité et l'homogénéité à être malaxé, mis en place, serré et fini.

Le béton de sable demande une quantité d'eau élevée par rapport au béton classique ; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement entre (0.6 et 0.7). Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange. Sachant que la granulométrie jouera aussi sur le besoin en eau, plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par la relation entre le module de finesse et la maniabilité.
Le principe de cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre LCPC figure II.10, Il consiste en un boitier parallélépipédique métallique (7.5cm × 7.5cm×15cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipe d'un vibrateur et muni d'une cloison amovible [16].



Figure II.10: Schéma d'un Maniabilimètre LCL [16].

II.3.1.1. Conduite de l'essai

Le mortier est introduit dans la partie désigné sur la figure II.10 délimitée par la cloison et mis en place par piquage en quatre couches. Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule, le chronomètre est arrêté une fois le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boitier figure II.10 [15].

Le temps " **t** " mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance, ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide comme illustré au tableau II.14.

Tableau II.14: Classe de consistance des bétons

classe de consistance	durée (en s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très Plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

II.3.2. Formulation du béton de sable témoin

Pour la composition du béton de sable, nous avons utilisé un dosage en ciment et sable correspondant à celui d'un mortier normalisé c'est-à-dire une part de ciment et trois parts de sable. Concernant le dosage en eau nous avons utilisé l'essai de maniabilité pour la détermination de la quantité d'eau correspondant à un béton plastique [15].

II.3.3. Formulation du béton de sable renforcé par filleres de marbre

Concernant la formulation du béton de sable modifié par des fillers de marbre, nous avons gardé le rapport E/C de la composition de la matrice du béton de sable sans fillers. En se basant sur l'essai de maniabilité au laboratoire on trouve pratiquement les mêmes résultats du rapport E/C pour les bétons sans fillers et ceux avec fillers. La quantité des fillers utilisées varie de 12% et 14% en volume, ajoutee au volume de sable par un même volume de fillers.

II.3.4. Composition de béton de sable utilisé

Dans le cadre de cette étude, une seule composition de béton de sable a été adoptée. Dans le but d'étudier l'influence de la nature du sable sur les propriétés du béton de sable réalisé, les trois types de sables différents présentant des caractéristiques physiques et minéralogiques variées suscités dans ce chapitre sont utiliser pour réaliser trois familles de béton de sable. La composition du béton de sable est décrite dans le tableau suivant.

II.3.5. Nomenclature des bétons réalisés

En plus du béton témoin, les trois familles de béton réalisés sont dénommés comme suite :

BST : Béton témoin

BSF : Béton de sable à base de sable fin

BSM : Béton de sable à base de sable moyen

BSG : Béton de sable à base de sable gros

Tableau II.15: même Composition du Béton de sable S1,S2,S3

Composant	**Dosage (kg/m³)**
Ciment (CEM II/ B-L 42.5N)	350
Filler marbre	180
Sable	1480
Eau	270
Superplastifiant	5,3
Total	2195,3

II.4. Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre traite les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation de notre mélange, les conclusions qu'on peut tirer de cette caractérisation sont :

- Le sable fin d'oued Souf, est caractérisé par une granulométrie étalée qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires.
- Le sable considéré moyen de la région Boughazoul, est caractérisé par une granulométrie serrée situé hors du fuseau recommandé de sable.
- Le sable concassé donne un module de finesse relativement acceptable.
- Pour la formulation du béton de sable résidus de fillers, nous avons gardé le rapport E/C de la composition de la matrice du béton de sable sans fillers.
- Nous avons choisi des fillers de marbre avec pourcentages sont 51% par méthode expérimentale , pour tester l'effet de l'orientation des fillers et déterminer les meilleurs performances mécaniques de mélanges proposé.

CHAPITRE 3 : Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux issus des essais de résistance à la compression, de résistance en traction par flexion et de mesure du taux d'absorption d'eau réalisés sur les mêmes formulations de béton de sable, dont une formulation témoin. Les effets conjoints de la nature du sable, de l'ajout de filler de marbre et des conditions de cure (eau, étuve à 50 °C et ambiance à 20 °C) sont étudiés à 7, 14 et 28 jours.

III.2 Résistances mécaniques

Les essais de flexion et de compression sont effectués selon la norme EN 196-1 sur des éprouvettes prismatiques (4 × 4 × 16) cm^3, pour différents échéanciers (7,14,28 jours).

III.2.1. Résistance de traction par flexion

Cet essai est réalisé conformément a la norme EN 196-1 moyennant une machine désignée pour les tests de flexion. Pour la détermination de la résistance à la flexion, nous avons utilisé la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé.

Principe de l'essai

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.
- Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de 50 N/s ± 10 N/s, jusqu'à la rupture.

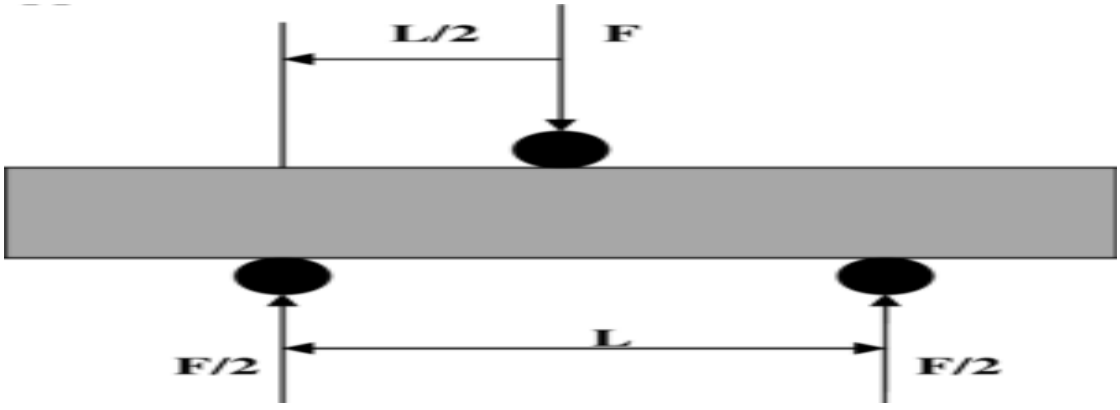


Figure III. 1 : Essai de résistance à la flexion

La résistance en flexion R_f (en N/mm) est calculée au moyen de la formule :

$$Rf = 3FL / 2bh^2$$

Où :

- R : Résistance à la flexion en (MPa).
- F : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N).
- L: Longueur total d'éprouvate.
- b : Côte de l'éprouvette est égale à40 mm.
- H : est la hauteur (épaisseur) de l'éprouvette (mm).



Photo III.1 : Appareil de traction par flexion

III.2.2. Résistance à la compression

Principe de l'essai

- Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ±0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm. **[EN 196-1]**

-Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression R_c (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

Où :

- **:** Résistance à la compression en (MPa) ;
- **:** Charge de rupture en (N) ;
- **:** Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

Dispositif de l’essai de résistance à la compression



Photo III.2 **:** Appareil utilisée pour l’essai de compression

III.3 Préparation de l’échantillon

La préparation des échantillons se fait suivant les étapes suivantes :

- Premièrement, on mélange le sable et le ciment ensuite en rajoute la fumée de silice et enfin, on procède au mélange de l’ensemble avec l’ajout d’eau de gâchage et le super plastifiant ;
- Puis vient l’étape de remplissage des moules suivi de vibration du béton suivant deux couches ;
- Ensuite séchage des éprouvettes pendant 24 heures ;
- Finalement, la conservation des éprouvettes dans l’eau pendant 7et14 et 28 jours.
- Et des éprouvettes dans la température ambiante à 20°C et autres dans l’étuve a 50°C même age



III.3-Préparation des échantillons



III.4 -Nature du mélange béton de sable



III.5 Table de vibration



III.6- Conservation des éprouvettes dans l'eau

III.4- Résistances à la compression du béton

Les résultats de la des résistances à la compression de différents bétons réalisés sont résumées dans les tableaux suivants.

III.4.1 Résistances à la compression (Rc) à 7 jours

Tableau III.1 : Résistances à la compression (Rc) à 7 jours

Type de Béton	Conservation					
	Dans l'eau		Dans le étuve à 50 °C		Air ambiant à 20 °C	
	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)
BSF	6,04	1,93	09,44	1,86	6,56	1,80
BSM	03,61	2,073	08,00	1,934	09,06	1.970
BSG	21,56	2,290	22,09	2,078	11,04	2,012

III.4.2 Résistances à la compression (Rc) à 14 jours

Tableau III.2 : Résistances à la compression (Rc) à 7 jours

Type de Béton	Conservation					
	Dans l'eau		Dans le four à 50 °C		Air ambiant à 20 °C	
	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)
BSF	8,09	1,98	13,20	1,88	7,29	1,90
BSM	07,11	2,301	08,08	1,963	08,98	1,981
BSG	30,38	2,296	15,59	2,00	10,76	2,041

III.4.3 Résistances à la compression (Rc) à 28 jours

Tableau III.3 : Résistances à la compression (Rc) à 7 jours

Type de Béton	Conservation					
	Dans l'eau		Dans le four à 50 °C		Air ambiant à 20 °C	
	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)	Rc (MPa)	Densité (g/cm^3)

BSF	9,06	2,01	15,59	1,90	18,85	1,88
BSM	07,50	2,076	13,20	01,95	15,20	01,98
BSG	29,97	2,287	18,00	2,072	20,06	2,056

III.5. Résistances à la traction par flexion

Les résultats de la des résistances à la traction par flexion (Rt) des différents bétons réalisés sont résumées dans les tableaux et courbes suivantes

III.5.1 Résistances à la traction par flexion (Rt) à 7 jours

Tableau III.4 : Résistances à la traction par flexion (Rt) à 7 jours

Type de Béton	**Conservation**					
	Dans l'eau		**Dans le four à 50 °C**		**Air ambiant à 20 °C**	
	Rc (MPa)	**Densité (g/cm^3)**	**Rc (MPa)**	**Densité (g/cm^3)**	**Rc (MPa)**	**Densité (g/cm^3)**
BSF	00.00	1,93	00.00	2,073	1,63	2,290
BSM	00.00	1,86	00.00	1,934	00,13	2,078
BSG	00.00	1,80	00.00	1,970	00,00	2,012

III.5.2 Résistances à la traction par flexion (Rt) à 14 jours

Tableau III.5 : Résistances à la traction par flexion (Rt) à 7 jours

Type de Béton	**Conservation**					
	Dans l'eau		**Dans le four à 50 °C**		**Air ambiant à 20 °C**	
	Rc (MPa)	**Densité (g/cm^3)**	**Rc (MPa)**	**Densité (g/cm^3)**	**Rc (MPa)**	**Densité (g/cm^3)**
BSF	00.00	1,98	00.00	2,301	01,79	2,296
BSM	0,81	1,88	00.00	1,963	00,20	2,00
BSG	00.00	1,90	00.00	1,981	00,00	2,041

III.5.3 Résistances à la traction par flexion (Rt) à 28 jours

Tableau III.6 : Résistances à la traction par flexion (Rt) à 7 jours

Type de Béton	Conservation					
	Dans l'eau		Dans le four à 50 °C		Air ambiant à 20 °C	
	Rc (MPa)	Densité (g/cm³)	Rc (MPa)	Densité (g/cm³)	Rc (MPa)	Densité (g/cm³)
BSF	00,00	2,01	00,00	2,076	4,27	2,287
BSM	01,64	1,90	00,00	1,950	2,47	2,072
BSG	00,27	1,88	00,00	1,980	00,00	2,056

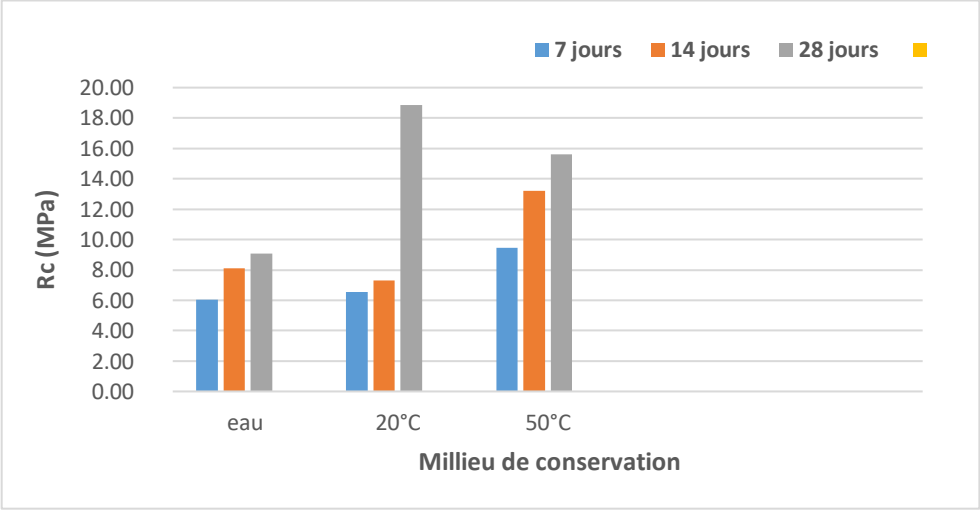


Figure III.7 : Effet du facteur temps et du milieu de conservation sur la résistance A la compression du BSF

Commentaire& Interprétation des résultats ;Les résultats montrent que la résistance du BSF est maximale lors d'une cure dans l'eau, car l'humidité favorise une hydratation complète du ciment. À 20°C (température ambiante), la résistance suit une progression standard. En revanche, à 50°C, la chaleur accélère la prise initiale mais peut provoquer une évaporation prématurée de l'eau, limitant l'hydratation à long terme et réduisant ainsi la résistance finale. Cela explique pourquoi la performance est meilleure en milieu immergé qu'à haute température.

(4 lignes clés : hydratation optimale dans l'eau, progression standard à 20°C, effet négatif de la chaleur à 50°C, logique cohérente avec les mécanismes de durcissement du béton.

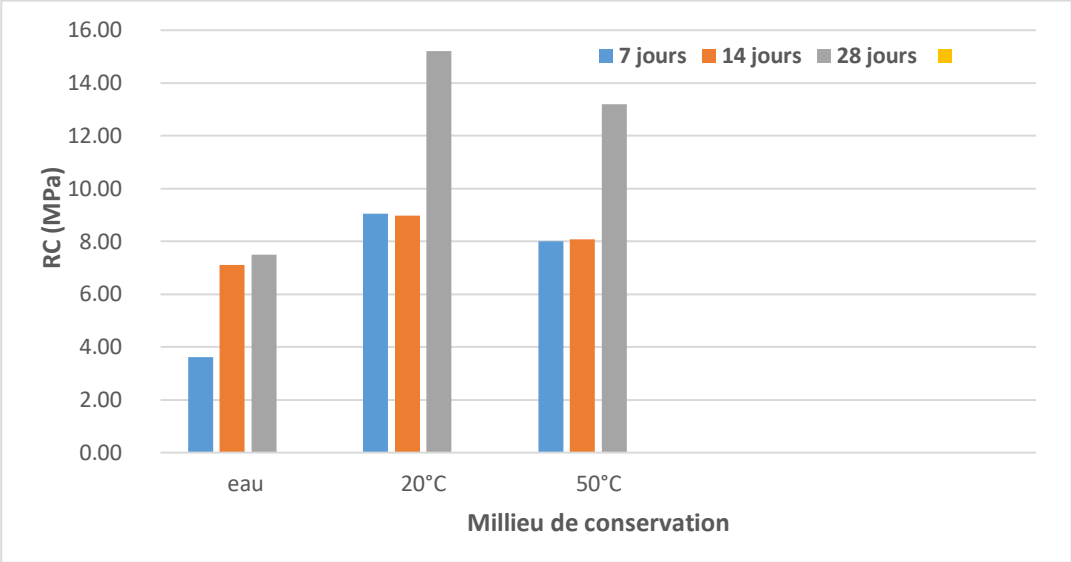


Figure III.8 : Effet du facteur temps et du milieu de conservation sur la résistance A la compression du BSM

Commentaire& Interprétation des résultats ;Les résultats montrent que la résistance à la compression (RC) du béton de sable augmente avec le temps, quel que soit le milieu de conservation. La conservation à 20 °C donne les meilleures performances à 28 jours, atteignant environ 15 MPa. À 50 °C, la résistance est légèrement inférieure mais reste significative, suggérant une accélération de l'hydratation. En revanche, la conservation dans l'eau donne les plus faibles résistances, surtout à 7 jours, indiquant un retard dans le développement des résistances mécaniques.

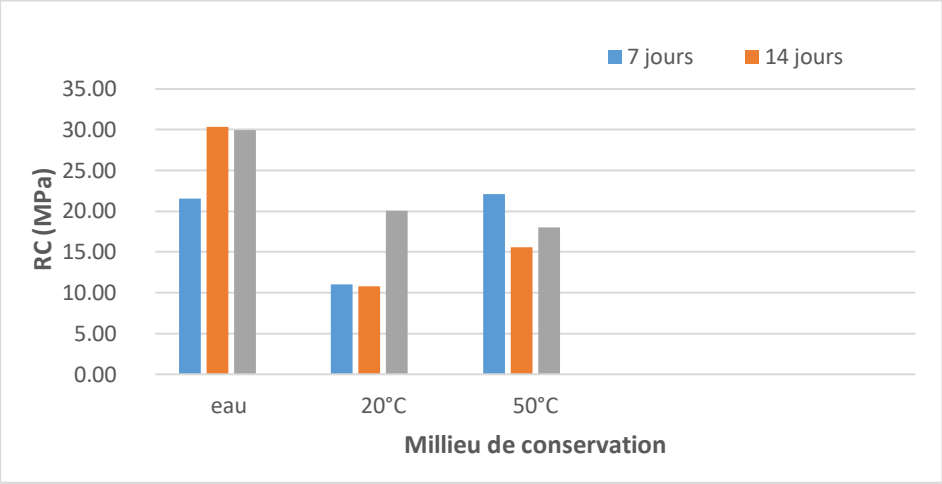


Figure III.9 : Effet du facteur temps et du milieu de conservation sur la résistance A la compression du BSG

Commentaire& Interprétation des résultats ;Les résultats montrent que la résistance à la compression (RC) du béton de sable grossier (BSG) évolue différemment selon la durée de cure et le milieu de conservation. Après 28 jours, la RC est plus élevée à 20°C qu'à 50°C, ce qui suggère qu'une température modérée favorise une meilleure résistance à long terme. Les valeurs initiales (7 et 14 jours) indiquent un gain de résistance rapide, mais la différence entre les milieux devient plus marquée avec le temps. Ces observations soulignent l'importance des conditions de cure pour optimiser les performances du BSG. Des analyses complémentaires pourraient préciser l'impact des paramètres environnementaux sur la durabilité

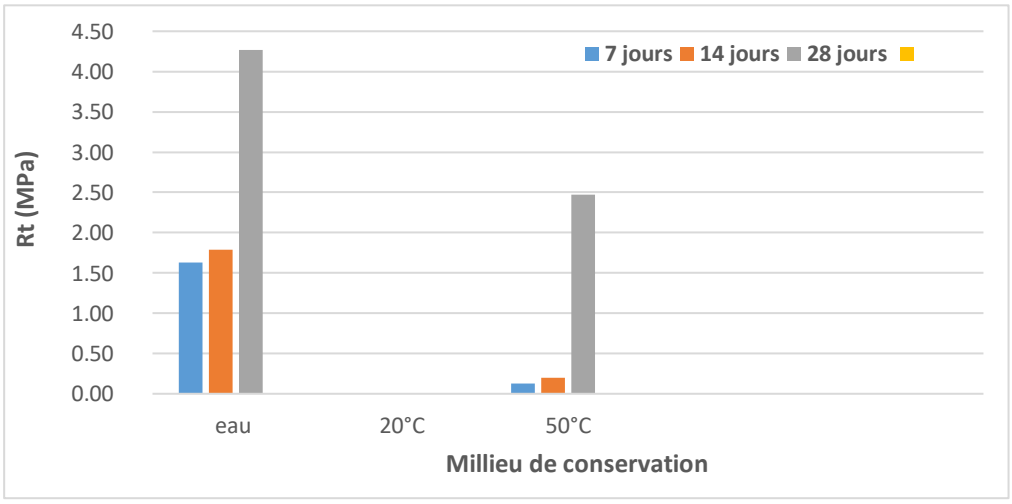


Figure III.10: Effet du facteur temps et du milieu de conservation sur la résistance à la traction du BSG

Commentaire & Interprétation des résultats ;Les résultats de résistance à la traction montrent que le BSG surpasse nettement le BSM et le BSF, grâce à sa granulométrie grossière qui améliore la cohésion de la matrice. Les bétons à sable fin (BSF) et moyen (BSM) présentent des performances plus faibles, avec une sensibilité accrue aux températures élevées (50°C). Cet écart persiste sur 28 jours, confirmant l'avantage mécanique du sable grossier. Ces données soulignent l'importance du choix granulométrique pour optimiser la résistance à la traction, surtout en conditions exigeantes.

III.6 – Effet combiné des différents paramètres sur la l'évolution de la Résistance de compression du béton de sable ;

Les différents bétons sont Conservé dans trois différentes conditions (dans l'eau à 20 °C ± 2, dans l'air à température ambiante de 20 °C ± 2 et dans le four à une haut température 50°C). Afin de faciliter la lecture des résultats présentés sur les courbes suivantes, la légende suivante est utilisée.

	Conservé dans leau	Conservé dans	Conservé dans l'air ambiant à
BSF	S1	S4	S7
BSM	S2	S5	S8
BSG	S3	S6	S9

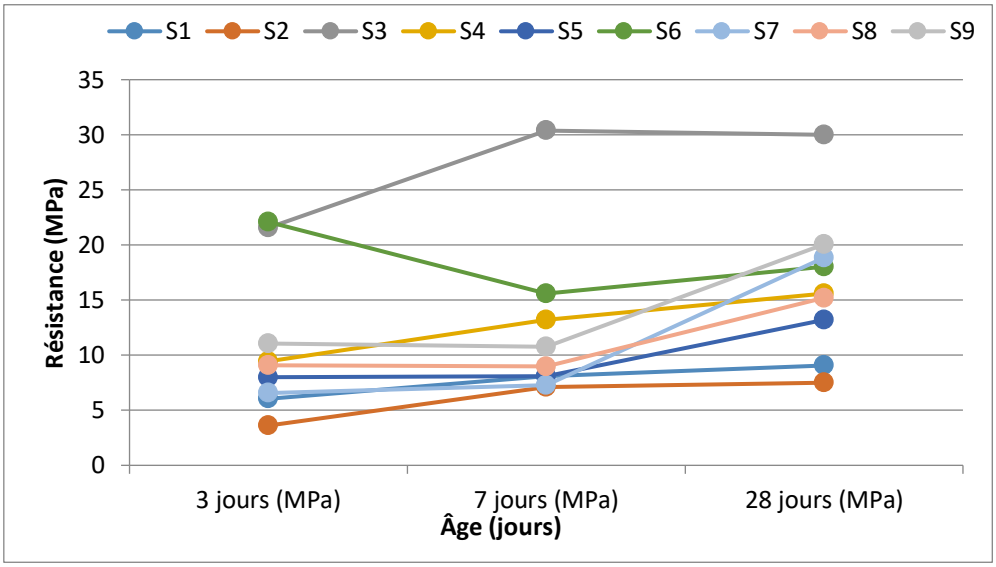


Figure III.11 : Effet combiné des différents paramètres sur la l'évolution de la Résistance de compression du béton de sable

III.7 Les courbes de la Résistance de traction par flexion du béton de sable ;

Conservé dans les Trois Conditions, Dans l'eau et dans la température ambiante de 20°C et dans haut température 50°C

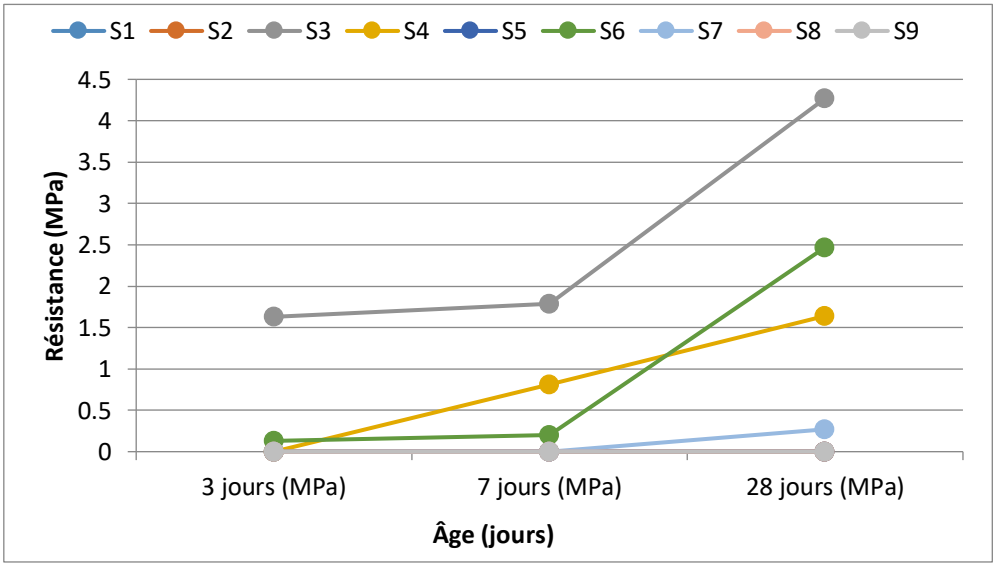


Figure III.12 : Effet combiné des différents paramètres sur la l'évolution de la Résistance à la traction du béton de sable

III.8 -Taux d'absorption d'eau

L'Évolution du taux d'absorption d'eau (%) des différents bétons réalisés est résumées dans le tableau III.7 suivant.

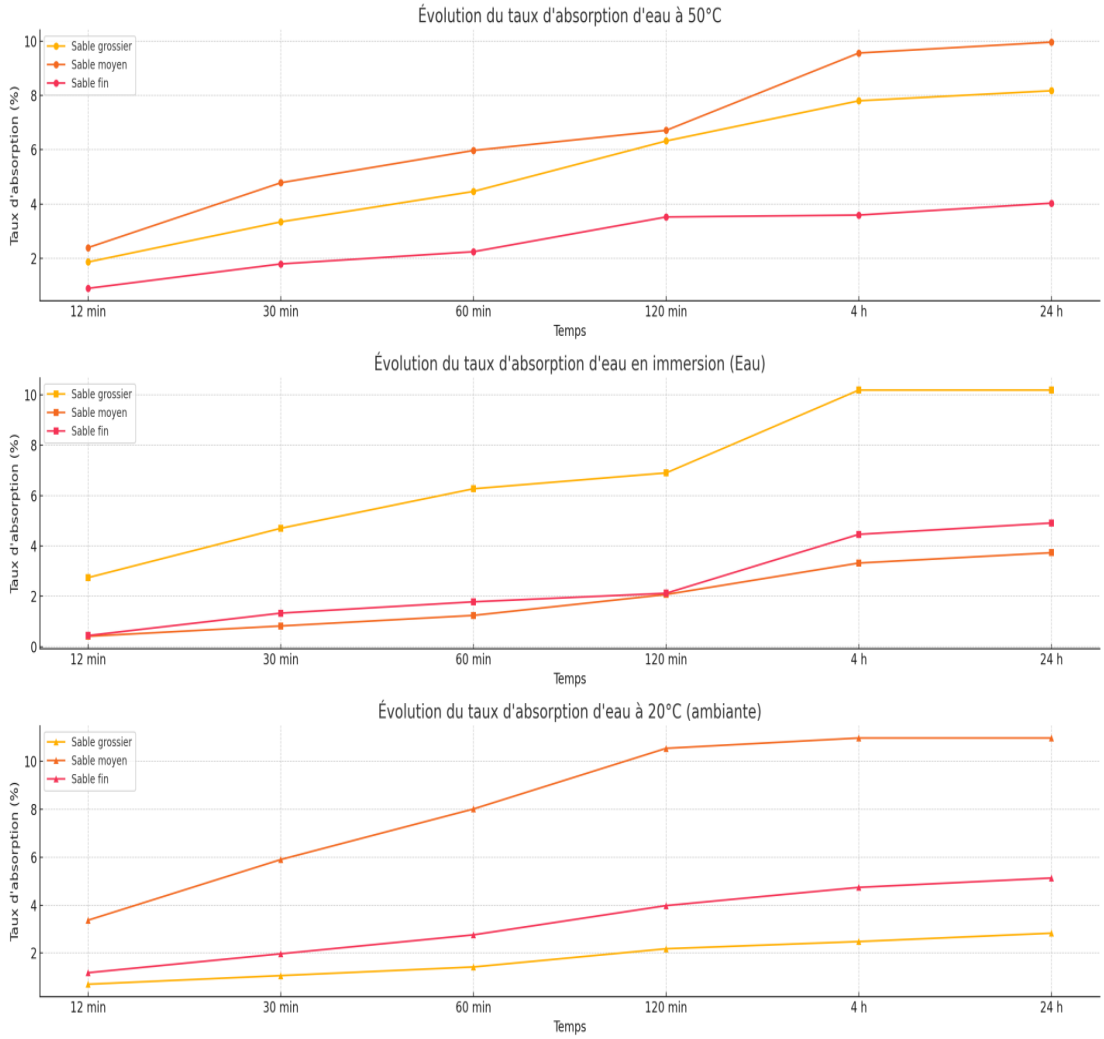
Tableau III.7 : Évolution du taux d'absorption d'eau (%) en fonction du temps, du type de sable et de la condition de conservation

Temps	**50 °C - BSG**	**50 °C - BSM**	**50 °C - BSF**	**Eau - BSG**	**Eau - BSM**	**Eau - BSF**	**20 °C - BSG**	**20 °C - BSM**	**20 °C - BSF**
12 min	1.86	2.39	0,89	2,74	0,41	0,44	0,70	3,37	1,18
30 min	3,34	4,78	1,79	4,70	0,82	1,33	1,06	5,90	1,97
60 min	4,46	5,97	2,24	6,27	1,24	1,78	1,42	8,01	2,76
120 m	6,32	9,56	3,13	8,62	2,07	3,12	2,12	10,54	3,55
4 h	7,80	9,56	3,59	10,19	3,32	4,46	2,48	10,97	4,74
24 h	8,17	9,96	4,03	10,19	3,73	4,91	2,83	10,97	5,13

III.9-Évolution du Taux d'absorption d'eau (%)

Ce graphique suivante présente l'évolution du taux d'absorption d'eau (%) pour trois types de sable (grossier, moyen, fin) selon trois conditions de conservation :
- 50 °C (séchage au four)
- Immersion dans l'eau
- Température ambiante (20 °C)

Les résultats sont issus d'un suivi à différents temps (12 min à 24 h)



Commentaire; Les résultats montrent que le sable grossier présente la plus forte absorption d'eau à 50 °C et en immersion, tandis que le sable moyen absorbe davantage à température ambiante. Le sable fin reste globalement le moins absorbant, en raison de sa compacité. Ainsi, la nature du sable et la température influencent fortement son comportement hydrique.

III.10- Conclusion

L'étude expérimentale menée dans ce chapitre a permis d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement du béton de sable : la nature du sable (fin, moyen, grossier), l'ajout de filler de marbre, et les conditions de conservation (eau, ambiance à 20 °C, four à 50 °C). Les résultats montrent que :

Le type de sable joue un rôle déterminant sur les résistances mécaniques : le sable grossier offre globalement les meilleures performances, notamment en compression, tandis que le sable fin présente des résistances plus faibles.

Les conditions de cure influencent fortement les résultats. Le séchage à 50 °C a permis un gain de résistance significatif à court terme, mais c'est la conservation à l'eau qui donne les meilleures résistances à long terme (28 jours), notamment pour le sable grossier.

La résistance à la traction par flexion reste globalement faible pour les sables fin et moyen, mais montre une nette amélioration avec le sable grossier, surtout à 28 jours en immersion.

Le taux d'absorption d'eau est plus élevé pour les bétons conservés à 20 °C, particulièrement pour le sable moyen, ce qui peut s'expliquer par une porosité plus ouverte.

L'utilisation d'un ajout minéral comme le filler de marbre semble avoir un effet positif sur les performances globales, en synergie avec une bonne formulation granulaire.

Ces résultats confirment l'importance du choix de la nature du sable et des conditions de cure dans la conception d'un béton de sable performant, notamment en milieu

désertique. Ils serviront de base pour la modélisation future et les recommandations pratiques dans le cadre de l'optimisation du béton de sable.

Conclusions et Recommandations

Conclusion générale

Cette étude a démontré que le béton de sable, optimisé par la nature du sable, les ajouts comme l'ajout de filler de marbre et des conditions de cure adaptées, offre des performances mécaniques et une durabilité prometteuses. Le sable grossier (BSG) a donné les meilleurs résultats en compression, tandis que les températures modérées (20°C) et l'immersion dans l'eau ont favorisé un durcissement optimal à long terme. L'ajout de filler de marbre a amélioré la compacité et réduit la porosité, tout en valorisant un déchet industriel.

Les essais ont confirmé que le béton de sable peut rivaliser avec le béton traditionnel dans des contextes où les granulats grossiers sont rares. Cependant, son comportement varie significativement selon la granulométrie du sable et les conditions environnementales. Ces résultats ouvrent des perspectives pour des applications durables en construction, notamment dans les régions désertiques.

Pour aller plus loin, des études sur d'ajouts alternatifs et des modélisations numériques seraient bénéfiques. En somme, ce travail contribue à une approche écoresponsable de la construction, alliant performance technique et valorisation des ressources locales

Recommandations

Pour des études futures Pour approfondir cette thématique, il serait pertinent d'étendre l'étude à d'autres types d'ajouts minéraux et organiques, d'explorer des sables recyclés ou locaux non exploités, ainsi que d'évaluer le comportement à long terme du béton de sable sous des conditions environnementales extrêmes. Une modélisation numérique pourrait également compléter les résultats expérimentaux pour une meilleure prédiction du comportement du matériau.

Liste Bibliographique

[**1**] BENAISSA, A. (nov. 1992) : Déformations différées d'un béton de sable – Thèse de doctorat, Université de bordeaux; Laboratoire régional des ponts et chaussées

[**2**] BADERINA .M :caractérisation mécanique et physique des béton de sable a base de déchets de bois , thèse de doctorat, ENP 2007

[**3**] KETTAB .R :valorisation du sable de dune, thèse de doctorat ENP 2007

[4] CHAUVIN jj 1991, le béton de sable en union soviétique, bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées N°174 juillet août

[**5**] GUENNOUN R., Etude et formulation d'un béton de sable de dune, P.F.E., ENP, Alger—Algérie juin 2003

[**6**] MICHEL M. : Valorisations des déchets et des sous-produits industriels, Ed, Massion, Paris (1981)

[**7**] SABLOCRETE, (1994), Béton de sable, Presse de l'école nationale des ponts et

chaussées, Paris, France.

[**8**] GHRIEB.A, Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques, thèse de magister, ENP 2003.

[**9**] DREUX G. et FESTA J.: Nouveau guide du Béton et de ses constituants , Eyrolles Huitième édition, Paris 1998.

[**10**] KETTAB .R :Valorisation du sable de dune, thèse de doctorat ENP 2007

11] KOLLER E., Traitement des pollutions industrielles , Ed, Dunod, avril 2004.

[**12**] BADERINA .M, Caractérisation mécanique et physique des béton de sable à base de déchets de bois, thèse de doctorat, ENP 2007

[**13**] LVOVICHE M. 1991- Utilisation des bétons de sable à Moscou, recueil des communications du séminaire Franco soviétique sur les bétons de sable, bordeaux le 6 et 7 November [1991].

[**14**] KETTAB, R., BALI, A. ALLICHE (2007). Rubber modified sand concrete for waste management; International Journal of Nuclear Energy Science and Technology (IJNEST), Volume 3 N°1 pp 63-75.

Revue générale des routes et aérodromes. (1998). Utilisation du caoutchouc recycle dans les revêtements routiers; N°763; Juin 1998

[**15**] AYACHI, Amor Mohamed, 2011. Etude des propriétés mécaniques du béton de sable

de dunes ; mémoire mastère ; Université Ouargla.

[**16**] CHABIA, Raihana, 2016. Contribution à l'étude des caractéristiques physico mécaniques de béton se sable de dunes et l'influence de milieux de coacervation, mémoire mastère, Université Ouargla.

[**17**] GUERMITI, L, 2013, Contribution à l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques, Thèse de Magister, Université de Ouargla.