

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL OUED

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

DU MASTER EN GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

THEME

**FORMULATION ET CARACTÉRISATION D'UN
BÉTON DE SABLE À BASE DE FIBRE DE VERRE**

Dirigé par :

AMMARI Mohammed Seghir

Présenté par :

**- BOUTA Mohammed Kamel
- DRIHEM Boubaker**

----- Promotion : Septembre 2019 -----

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier **ALLAH** le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions très sincèrement notre promoteur Monsieur **AMMARI Mohammed Seghir** pour tous les efforts qu'il a fourni pour faciliter notre travail et nous aider à accomplir ce mémoire.

Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de notre thèse.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur **REDOUANE Abdelaziz**, directeur de Laboratoire et Bureau des Travaux Publics et tous les membres du laboratoire qui ont participé indirectement ou directement au bon déroulement de ces travaux de recherche et à leur finalité.

Nous remercions aussi nos collègues de travail pour leurs aides, leurs compréhensions et leurs encouragements.

Enfin, nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail,

A Les deux personnes les plus chères à mon cœur,

mon père et ma mère.

A mon cher frère et mes chères sœurs.

A ma chère femme, qui m'a apportée beaucoup de réconfort et

d'aide sur le plan moral.

A mes 02 filles, et mon garçon.

A tous ceux qui sont dans mes pensées et que Je n'ai pas cité.

Bouta Mohammed Kamal



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À ma très chère mère, source de tendresse

À mon très cher père, qui m'encourage

dans les instants délicats

À ma partenaire dans la vie, Ma chère femme

À mes chers enfants : M^{ed} Sighir, Miessonn

À mes chers frères : Ahmed Yacine, Thabet et Mohamed Akram

À mes chères sœurs : Khawla et Djana

À mes tantes et oncles

À toute ma famille

À tous mes amis et surtout : Djafar, Chouaib et Mohamed.

DRICHEM Boubaker

SOMMAIRE

Résumés	
Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

I.1. Introduction	03
I.2. Béton de sable	03
I.2.1. Introduction.....	03
I.2.2. Historique.....	03
I.2.3. Constitution du béton de sable	04
I.2.3.1. Sables	04
I.2.3.2. Ciment	05
I.2.3.3. L'eau	05
I.2.3.4. Les fines d'ajouts	05
I.2.3.5. Les adjuvants	07
I.2.3.6. Autres ajouts	07
I.2.4. Propriétés essentielles du béton de sable.....	08
I.2.4.1. Granulométrie et maniabilité.....	08
I.2.4.2. Granulométrie et résistance.....	09
I.2.5. Domaines d'utilisation des bétons de sable.....	11
I.2.5.1. En raison de sa fluidité.....	11
I.2.5.2. En raison de sa faible tendance à la ségrégation.....	11
I.2.6. Les méthodes de formulation.....	11
I.2.6.1. Définition.....	11
I.2.6.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable.....	12
I.2.6.3. Méthode expérimentale de formulation.....	17
I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.....	19
I.4. Généralité sur les fibres et les bétons de fibres.....	20
I.4.1. Introduction.....	20
I.4.2. Les Fibres.....	20
I.4.3. Les fibres utilisées comme renfort dans les bétons.....	21
I.4.3.1. Les fibres métalliques.....	21
I.4.3.2. Les fibres minérales.....	21
I.4.3.3. Les fibres végétales.....	22
I.4.3.4. Les fibres synthétiques.....	23

I.4.4. Choix et rôles des fibres dans le béton.....	23
I.4.4.1. Choix des fibres.....	23
I.4.4.2. Rôles des fibres dans le béton.....	24
I.4.5. Effet du dosage et de l'orientation des fibres de verre dans le béton.....	25
I.4.5.1 Influence du dosage en fibres.....	25
I.4.5.2 Effet de l'orientation et de la distribution des fibres.....	25
I.4.6. Fonctionnement d'une fibre dans le béton.....	25
I.5. Conclusion.....	26

CHAPITRE II : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

II.1. Introduction.....	27
II.2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	27
II.2.1. Le sable.....	27
II.2.1.1. Analyse granulométrique.....	28
II.2.1.2. Caractéristiques physiques.....	31
II.2.1.3. Synthèse des résultats.....	33
II.2.2. Le ciment.....	33
II.2.3. Le filler calcaire.....	34
II.2.4. L'eau de gâchage.....	35
II.2.5. L'adjuvant.....	35
II.2.6. La fibre de verre.....	35
II.3. Techniques expérimentales.....	36
II.3.1. Malaxage et conservation.....	36
II.3.2. Caractérisation du béton frais.....	37
II.3.2.1. La maniabilité.....	37
II.3.2.2. Masse volumique apparente réelle.....	38
II.3.3. Caractérisation du béton durci.....	39
II.3.3.1. Masse volumique apparente.....	39
II.3.3.2. Essai de rupture par flexion.....	39
II.3.3.3. Essai de rupture par compression.....	40
II.3.3.4. Essai d'absorption d'eau par immersion.....	41
II.3.3.5. Analyse par diffraction de rayons X.....	42
II.4. Conclusion.....	43

CHAPITRE III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	44
III.2. Formulation des bétons de sable.....	44
III.2.1. Méthode expérimentale de formulation.....	44
III.2.1.1. Détermination d'une formule de base (sans fines d'addition).....	44
III.3. Caractérisation des bétons de sable à base des fibres de verre.....	50
III.3.1. Caractérisation du béton frais.....	50

Sommaire

III.3.1.1. Etude de la maniabilité.....	50
III.3.2. Caractérisation du béton durci.....	51
III.3.2.1. Masse volumique.....	51
III.3.2.2. Absorption d'eau par immersion.....	52
III.3.2.3. Relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau.....	53
III.3.2.4. Etude des propriétés mécaniques.....	53
III.3.2.4.1. Résistance à la flexion.....	53
III.3.2.4.2. Résistance à la compression.....	54
III.3.3. Effet de fibre de verre sur la ductilité et la ténacité.....	55
III.3.4. Analyse par diffraction de rayons X.....	56
III.4. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58
Références bibliographiques.....	60
Annexes	

RESUMES

RESUME

La présente étude entre dans le cadre de valorisation des matériaux locaux, la réutilisation des déchets industriels dans la construction et la poursuite des travaux antérieurs sur le béton de sable. Elle a pour objectif d'améliorer les propriétés physico-mécaniques du béton de sable à base de fibre de verre. Nous présentons dans ce travail une étude sur la formulation des bétons de sable à base des fibres de verre par la méthode expérimentale. Cette étude expérimentale porte sur le développement de composites étudiés avec des teneurs en fibre de verre de 0.15% à 0.60% (par pas de 0.15). Les résultats trouvés montrent que la fluidité et la masse volumique des bétons étudiés ont diminués en fonction de l'augmentation du dosage de fibre de verre. Les résultats mécaniques ainsi obtenus ont montré une amélioration intéressante. Des améliorations allant jusqu'à d'environ 27% en cas de la résistance à la flexion et d'environ 20% en cas de la résistance à la compression. Également, la fibre de verre améliore la ténacité et la ductilité du béton étudié. Enfin, il convient de noter que les résultats obtenus dans cette étude sont très encourageants pour le développement d'un nouveau béton de sable capable de répondre aux exigences de la construction locale.

Mots clés :

Matériaux locaux, déchets industriels, Béton de sable, fibre de verre, formulation, propriétés physico-mécaniques.

الملخص

هذا العمل يدخل ضمن إطار تثمين واستغلال المواد المحلية، إعادة استعمال النفايات الصناعية في مجال البناء ومتابعة أشغال سابقة أنجزت على الخرسانة الرملية. تهدف هذه الدراسة الى تحسين الخواص الفيزيو-ميكانيكية للخرسانة الرملية مضافة اليها الألياف الزجاجية. في هذا العمل نقدم دراسة عن تركيبة الخرسانات الرملية المضافة اليها الألياف الزجاجية من خلال الطريقة التجريبية. تتمثل هذه الدراسة التجريبية في تطوير التركيبة المدروسة مع نسب من الألياف الزجاجية من 0.15% الى 0.60% (بخطوة 0.15). النتائج المتحصل عليها تبين أن تشغيلية والكتلة الحجمية للخرسانات المدروسة تناقصت بتزايد نسبة الألياف الزجاجية. النتائج الميكانيكية التي تم الحصول عليها أظهرت تحسناً مهماً. تصل التحسينات إلى حوالي 27% فيما يخص مقاومة الانحناء وحوالي 20% فيما يخص مقاومة الضغط. أيضاً، تعمل الألياف الزجاجية على تحسين خاصية التشبث وخاصية السحب للخرسانة المدروسة. وأخيراً، تجدر الإشارة إلى أن النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة مشجعة جداً لتطوير خرسانة رملية جديدة قادرة على تلبية متطلبات البناء المحلي.

الكلمات المفتاحية:

المواد المحلية، النفايات الصناعية، الخرسانة الرملية، الألياف الزجاجية، التركيبة، الخواص الفيزيو-ميكانيكية.

ABSTRACT

This study is part of the valorization of local materials, the reuse of industrial waste in construction and the continuation of previous work on sand concrete. Its objective is to improve the physico-mechanical properties of sand concrete based on glass fiber. In this work, we present a study on the formulation of sand concretes based on glass fibers by the experimental method. This experimental study concerns the development of composites studied with glass fiber contents from 0.15% to 0.60% (in steps of 0.15). The results found show that the fluidity and density of the concretes studied decreased as the dosage of glass fiber increased. The mechanical results obtained in this way showed an interesting improvement. Improvements of up to about 27% in flexural strength and about 20% in compressive strength. Also, glass fiber improves the toughness and ductility of the concrete studied. Finally, it should be noted that the results obtained in this study are very encouraging for the development of a new sand concrete capable of meeting the requirements of local construction.

Keywords:

Local materials, industrial waste, sand concrete, glass fibers, formulation, physico-mechanical properties.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

E/C	: Rapport (eau / ciment).
d	: Dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire.
C	: Dosage en ciment.
A	: Dosage de l'addition en fines.
k₁	: Coefficient de prise en compte de la nature de l'addition.
G/S	: Gravillons sur sables.
A	: Addition en fines activées.
D_{max}	: Dimension de plus gros grain de l'étendue granulaire.
V	: Volume des vides du mélange granulaire.
V₀	: Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 .
Ps(V)	: Porosité du sable d'étendue 80µm et D _{max} .
e	: Volume d'eau.
v	: Volume de vide piégé.
f	: Surface spécifique exprimée en cm ² /g du constituant.
ρ	: Densité du constituant exprimée en g/cm ³ .
K	: Constante comprise entre 0,2 et 0,25.
E	: Dosage en eau.
K_f	: Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5.
R_c	: Classe vraie du ciment (MPa).
R_b	: Résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).
K₁	: Coefficient pouzzolanique.
K₂	: Coefficient d'activité du filler calcaire.
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).
V_{air}	: Volume d'air.
V_c	: Volume de ciment.
V_E	: Volume d'eau.
V_{adj}	: Volume d'adjuvant.
V_{sable}	: Volume de sable.
S	: Masse de sable.
MVAT	: Masse volumique apparente théorique du béton.
MVAR	: Masse volumique apparente réelle du béton.
MV_{sable}	: Masse volumique absolue du sable.
SA	: Sable alluvionnaire.

SD	: Sable de dune.
SAD	: Sable alluvionnaire-dunaire.
S_A	: Fraction massique du sable alluvionnaire.
S_D	: Fraction massique du sable de dune.
γ	: Masse volumique apparente.
M	: Masse du matériau.
V	: Volume total du matériau.
γ_s	: Masse volumique absolue.
M_s	: Masse du matériau solide.
V_s	: Volume total du matériau solide.
M_f	: Module de finesse.
C_p	: Compacité.
p	: Porosité.
h1	: Hauteur de sable propre + éléments fins.
h2	: Hauteur de sable propre seulement.
ES	: Equivalent de sable.
ES_v	: Equivalent de sable visuel.
ES_p	: Equivalent de sable au piston.
R_t	: Résistance à la flexion.
F_t	: Charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion.
L	: Longueur entre les axes des deux appuis.
B	: Largeur de la section transversale de l'éprouvette.
R_c	: Résistance à la compression.
F_c	: Force de compression.
A	: Surface transversale de l'éprouvette.
A%	: Coefficient d'absorption d'eau.
P_s	: Masse du matériau sec.
P_h	: Masse du matériau humide.
R	: Coefficient de corrélation.
DRX	: Diffraction de rayons X.
T	: Température.
HR	: Humidité relative.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Figure I.1.	Phare de Port Said réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte).....	03
Figure I.2.	Le pont de Brooklyn en blocs du béton aggloméré.....	04
Figure I.3.	Proportion du gravillon dans le béton.....	08
Figure I.4.	Influence de la nature du sable sur la maniabilité (fines d'addition calcaire). 09	
Figure I.5.	Effets du dosage et de la finesse de d'addition sur la résistance.....	09
Figure I.6.	Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance.....	10
Figure I.7.	Effet de la granularité sur la résistance.....	11
Figure I.8.	Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.....	13
Figure I.9.	Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable.....	14
Figure I.10.	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée.....	14
Figure I.11.	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).....	16
Figure I.12.	Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques.....	24
Figure I.13.	Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres...	26

CHAPITRE II : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Figure II.1.	Les sables utilisés.....	27
Figure II.2.	Courbe granulométrique des sables utilisés.....	30
Figure II.3.	Schémas de mesure d'équivalent de sable.....	32
Figure II.4.	Le filler utilisé.....	34
Figure II.5.	Superplastifiant « MEDAPLAST-SP40 »	35
Figure II.6.	Fibre de verre utilisée.....	36
Figure II.7.	Dispositif de mesure d'affaissement.....	37
Figure II.8.	Procédé de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	38
Figure II.9.	Schémas de l'essai de rupture par flexion.....	39
Figure II.10.	Procédé de l'essai de rupture par flexion.....	40
Figure II.11.	Schémas de l'essai de compression.....	41
Figure II.12.	Procédé de l'essai de rupture par compression.....	41
Figure II.13.	Procédé de l'essai d'absorption d'eau par immersion.....	42
Figure II.14.	Brukers D8 Advance.....	42

CHAPITRE III : Résultats et discussions

Figure III.1.	Affaissement en fonction du dosage en fines.....	47
Figure III.2.	Masse volumique apparente réelle en fonction du dosage en fines.....	47
Figure III.3.	La maniabilité des compositions étudiées.....	50
Figure III.4.	Influence des fibres sur la masse volumique à 28 jours.....	51
Figure III.5.	Absorption d'eau par immersion à 28 jours.....	52
Figure III.6.	La relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion...	53
Figure III.7.	Influence des fibres sur la résistance à la flexion.....	54
Figure III.8.	Influence des fibres sur la résistance à la compression.....	55
Figure III.9.	Fissuration de l'éprouvette après l'essai de flexion et compression.....	56
Figure III.10.	Diffractogramme du béton de sable.....	56

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Tableau I.1.	Le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.....	06
Tableau I.2.	Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.....	19
Tableau I.3.	Différents types de fibres.....	21
Tableau I.4.	Caractéristiques des différentes fibres de verre.....	22
Tableau I.5.	Propriétés physiques et mécaniques des fibres de verres.....	22
Tableau I.6.	Les principales caractéristiques physico-mécaniques des fibres les plus utilisées.....	23

CHAPITRE II : Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Tableau II.1.	Résultats d'analyse granulométrique du sable alluvionnaire (SA).....	28
Tableau II.2.	Résultats d'analyse granulométrique du sable de dune (SD).....	29
Tableau II.3.	Résultats d'analyse granulométrique du sable mélange (SAD).....	29
Tableau II.4.	Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.	33
Tableau II.5.	Caractéristiques physiques des sables SD, SA et SAD.....	33
Tableau II.6.	Propriétés physiques du ciment utilisé.....	34
Tableau II.7.	Propriétés mécaniques du ciment utilisé.....	34
Tableau II.8.	Analyse chimique du ciment utilisé.....	34
Tableau II.9.	Caractéristiques du superplastifiant.....	35
Tableau II.10.	Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre.....	36
Tableau II.11.	Classes de consistance du béton.....	38

CHAPITRE III : Résultats et discussions

Tableau III.1.	Composition et caractérisation de la formulation de base.....	47
Tableau III.2.	Composition et caractérisation finale de la formulation de base.....	47
Tableau III.3.	Composition et caractérisation de la formulation en Filler calcaire.....	50
Tableau III.4.	Correction de sable de la formulation en Filler.....	51
Tableau III.5.	Compositions des bétons étudiés.....	52
Tableau III.6.	La maniabilité des compositions étudiées.....	53
Tableau III.7.	Influence des fibres sur la masse volumique à 28 jours.....	54
Tableau III.8.	Absorption d'eau par immersion à 28 jours.....	55
Tableau III.9.	Influence des fibres sur la résistance à la flexion.....	56
Tableau III.10.	Influence des fibres sur la résistance à la compression.....	56

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau minéral, il se prête à toutes les constructions en répondant aussi bien à des exigences techniques de performances et de durabilité qu'à une recherche esthétique. En faisant varier la nature et les proportions de ses constituants, on obtient des propriétés et des caractéristiques adaptées aux divers usages. Ce qui permet d'utiliser les bétons pour réaliser des routes, des ponts, des tunnels, des fondations d'ouvrages, des tuyaux d'assainissement, des murs de soutènement, etc.

Selon les conditions réelles de la formulation du béton, le choix des constituants et de leurs caractéristiques présente souvent un handicap, du fait du manque voir la non disponibilité des matériaux, se répercutant sur l'ensemble des propriétés et qui influe davantage sur la résistance des bétons, plus particulièrement le phénomène du retrait qui est caractérisé par la propagation des fissures au sein de la matrice cimentaire.

En Algérie, la demande en matériaux de construction connaît une croissance considérable en rapport avec le développement du pays. Ce déséquilibre ne peut être surmonté qu'en assurant une exploitation rationnelle des matériaux locaux dont dispose notre pays. C'est dans cette optique que l'idée de la valorisation des matériaux locaux dans la construction est survenue.

La valorisation des matériaux locaux a touché même les déchets industriels et artificiels, ce qui conduit à non seulement un intérêt technologique, mais aussi économique et environnemental. Selon les différents travaux de recherche antérieurs, l'introduction de certains déchets dans les bétons et mortiers a pu quand même améliorer certaines propriétés de ces matériaux.

Dans ce cadre et dans un contexte d'épuisement progressif des gros granulats dans certaines régions, du coût élevé du transport et de l'abondance des sables, il était aisé d'entrevoir, dès l'origine, l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables locaux, peu ou pas exploités, pour la réalisation de béton dont les sables seraient le constituant principal. Il s'agit donc du béton de sable, qui a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 publiée en octobre 1987 par AFNOR [1]. Le béton de sable présente beaucoup d'avantages tels que : la petite granularité, l'absence de ségrégation, la bonne résistance, le bel aspect de surface, la facilité de la mise en œuvre, etc. Notons que parfois, les propriétés spécifiques de ce matériau lui permettent de remplacer et de résoudre certains problèmes mal assurés de béton ordinaire.

Par ailleurs et dans des travaux antérieurs plusieurs chercheurs ont trouvé que l'ajout des fibres de toutes natures au béton ou au mortier conduisent à amélioration une grande partie

des propriétés des bétons. Également, le béton de sable est un matériau présente quelques inconvénients tels que le faible des résistances mécaniques et à l'augmentation des résistances à la fissuration. Pour cela on ajoute des fibres, qui peuvent apporter une meilleure réponse au problème de la fragilité du béton et minimiser le risque de fissuration, ce qui permet d'améliorer sa durabilité et sa résistance mécanique. Il existe actuellement une grande variété de fibres. Parmi les plus utilisées, les fibres d'acier, de carbone, de verre, d'amiante et de polypropylène, etc.

Au fait, les bétons fibrés ont une conduite très différente comparativement aux bétons non fibrés, spécialement après la première fissuration où les fibres apportent leur contribution en essayant d'arrêter l'évolution et la propagation des microfissures au sein de la matrice en rendant le béton plus ductile.

L'objectif de notre travail est d'étudier une formulation de béton de sable et l'influence d'ajout des différents dosages en fibres de verre sur les propriétés étudiés.

Afin d'atteindre ces objectifs, notre travail est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le béton de sable et une généralité sur les fibres puisqu'on y a ajouté les fibres de verre.
- Le deuxième chapitre comporte une caractérisation générale des matériaux utilisés dans les différentes compositions du composite étudié, ainsi qu'une description détaillée des différentes techniques de mesures expérimentales employées dans cette étude.
- Le troisième chapitre présente la formulation de la composition optimale du béton de sable avec et sans des fibres de verre ainsi que l'influence de ces fibres sur les propriétés étudiés.

Enfin, une conclusion générale est présentée, suivie de quelques recommandations concernant les travaux futurs qui complètent notre étude.

CHAPITRE I :

Recherche

Bibliographique

I.1. Introduction

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques à travers différentes documentations concernant le constituant de base à savoir les bétons de sable aussi bien que les différentes méthodes de formulation de béton de sable. A la fin de ce chapitre, on évoque une généralité sur les fibres et les bétons de fibres, puisqu'on y a ajouté la fibre de verre à notre béton.

I.2. Béton de sable

I.2.1. Introduction

L'Algérie est un gros consommateur d'agréats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros agrégats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, et notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturelles et artificielles. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire [2].

Les bétons de sable sont une nouvelle gamme de matériaux de construction qui peuvent présentés une bonne alternative pour remplacer les bétons classiques dans la confection de certains éléments de construction. Les bétons de sable sont composés essentiellement de mélange en proportions convenables de sable (un ou plusieurs), de fines d'ajout, de ciment et d'eau. D'autres additions peuvent être incorporées : adjuvants, fibres, gravillons, etc. [3, 4].

I.2.2. Historique

En 1853, dans la perspective de réaliser des constructions monolithes, économiques et résistants, l'ingénieur COIGNET mit au point « le Béton Aggloméré » destiné à être moulé et pilonné en place et qui n'est autre que l'ancêtre du béton de sable.

Il s'agissait, en effet, d'un mélange sans caillou, de sables, de cendres, de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité. Il construisit ainsi en béton aggloméré banché une vaste maison, encore visible en France.

Cette composition fut par suite utilisée dans bon nombre de construction et réseau d'assainissement et après adaptation, servit notamment à réaliser un grand mur de soutènement de la place du Trocadéro à Paris en France.

En Egypte, le phare de Port-Saïd (h=52 m), fut construit, en 1869, en béton de sable de plage et chaux (**Figure I.1.**), ainsi qu'un pont à Brooklyn, édifié en 1871-1872 (**Figure I.2.**).



Figure I.1. Phare de Port Said réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte).



Figure I.2. Le pont de Brooklyn en blocs du béton aggloméré.

En 1918, en Union soviétique, une expérience très originale fut faite par Nicolas de Rochefort, à Saint Petersburg. Elle consistait à broyer ensemble sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable - ciment, beaucoup plus riche en (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Le professeur REHBINDER, soviétique eut repris cette expérience comme base de ses propres recherches sur le béton de sable et le mystérieux mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker.

L'Union soviétique, riche en sable, mais pauvre en gravillons et roches massives sur de vastes étendues, ne cessa, principalement depuis 1941, de faire du béton composé de sable et d'un ou deux liants (ciment et chaux), selon les opportunités. Les réalisations sont nombreuses. Citons parmi bien d'autres :

- Eléments de préfabrifications ;
- Tunnels et métros (ombrelles d'étanchéité) ;
- Mobilier urbain et éléments architecturaux ;
- Aérodromes, etc.

Dans les dernières décennies, et vu notamment l'insuffisance de connaissances dans son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau [5].

I.2.3. Constitution du béton de sable

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18 500 révisée en octobre 1987 par l'AFNOR, il y a lieu cependant de souligner que les constituants entrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton, produit normalisé. Les bétons de sable sont composés essentiellement des [3] :

I.2.3.1. Sables

Par sables on entend tous granulats 0/D (plus gros grains) conformes aux définitions des normes NF P 18 – 101 et NF P 18 – 301 ; Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou

détritique. D est inférieur ou égal à 4mm. Mais on peut admettre l'emploi d'un granulat à granulométrie continue de 0mm jusqu'à 8mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 4mm et les éléments inférieurs à 4mm reste inférieur à 0.7.

Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homo-métrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté ; si des études ont été faites sur des sables pollués, aucune expérimentation n'a été réalisée avec de tels sables. Autant que la nature de la pollution, c'est aussi sa variabilité à l'intérieur d'un gisement qui rend l'emploi de tels matériaux difficilement envisageables ; si on arrivait, en effet, par l'emploi d'adjuvants à rendre utilisable un sable du gisement, compte tenu de cette variabilité. Par ailleurs, les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau, ce qui entraîne une chute de résistance.

Dans cette étude, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sables propres, tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique.

I.2.3.2. Ciment

Le ciment habituellement utilisé pour la confection des bétons de sables doit être conforme à la norme NF P15-301. Les dosages en ciment sont proches des bétons ordinaires (300 à 400kg/m³) [6]. Il est à noter que pour un même usage, le dosage en ciment pour les bétons de sable est généralement plus élevé que les bétons classiques.

I.2.3.3. 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.2.3.4. Les fines d'ajouts

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [3] :

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

La différence entre un béton classique et un béton de sable réside principalement dans la granulométrie. L'optimisation de la compacité en relation avec la granulométrie obéit à certaines règles : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros. Dans le béton classique, on parle des éléments les plus gros (10 à 20 mm) ils créent des macro-vides que l'on peut remplir par du sable et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer que la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité (**Tableau I.1.**). Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle :

$$C = 550/\sqrt[5]{D} \text{ ou } C = 700/\sqrt[5]{D} \quad (\text{Selon l'usage du béton}) \quad (I.1.)$$

Tableau I.1. Le dosage minimum en ciment en fonction
du diamètre (D) du granulat employé.

	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	Granularité
BETON	1,904	290	370	0/25
	1,821	300	385	0/20
	1,741	315	400	0/16
	1,516	360	460	0/8
MORTIER	1,445	380	480	0/6,3
	1,320	415	530	0/4
	1,149	480	610	0/2
	1,000	550	700	0/1

Lorsque la valeur de D diminue (≤ 6 mm), et c'est le cas du béton de sable, le dosage en ciment devient très élevé (> 400 kg/m³). En effet, les vides d'un sable sont plus petits, plus nombreux et, globalement, plus importants que ceux d'un granulat d/D (D > 6 mm). Il faut donc davantage de ciment pour les remplir : techniquement et économiquement cette règle n'est plus applicable ; il n'y a plus concordance entre dosage en fine et en ciment. Dans le cas du béton de sable, on comble d'abord une partie des vides du sable par un filler, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels. Dans ces conditions, la règle en 5D peut encore s'appliquer, en première approximation, non plus au dosage en ciment seul mais à l'ensemble : ciment + fines. Cet aspect est pris en compte dans les normes actuelles qui introduisent la notion de liant équivalent :

$$C / K1.A \quad (I.2.)$$

Où

C : le dosage en ciment ;

A : le dosage de l'addition en fines ;

k1 : le coefficient de prise en compte de la nature de l'addition.

On peut ainsi parler, non plus de E/C (rapport eau /ciment), mais de :

$$E/C+k1.A \quad (I.3.)$$

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 kg/m³ et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influencer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. Pour un dosage constant en fine d'addition :

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente ;
- Pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 µm, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de

remplir les vides entre les sables. L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable, les fillers peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [7, 8].

I.2.3.5. Les adjuvants

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage de plastifiants ou de superplastifiants : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins [3]. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme EN 934-2.

I.2.3.6. Autres ajouts

I.2.3.6.1. Les fibres

Le béton durci, souffre d'une dissymétrie de comportement entre la compression et la traction, à laquelle il résiste 10 à 15 fois moins bien. Pour corriger ce défaut, une idée naturelle consiste à noyer dans le matériau frais des inclusions linéaires fibreuses [9].

Généralement, le contenu en fibres est exprimé en pour cent (%) par rapport au volume du béton. Leur quantité incorporée dans le béton dépend de la composition et la maniabilité du béton à l'état frais et des propriétés des fibres à savoir la nature, les caractéristiques géométriques, la densité, etc. En pratique le taux de fibres utilisé varie de 0,5 à 3% pour les fibres en acier et peut être plus ou moins important pour d'autres types de fibres, comme les fibres de verre, dont le taux d'incorporation peut aller au-delà de 6% et les fibres à base de polymères qui sont le plus souvent appliquées (0,1 à 1% en volume de fibres) [10].

I.2.3.6.2. Les gravillons

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable (**Figure I.3.**). En admettant que les gravillons sont dispersés dans le sable et ne constituant pas un squelette structure, le comportement reste le même : l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement certaines caractéristiques : fluage, retrait, résistance, maniabilité. D'une façon pratique on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sables) reste inférieur à 0.70 [3].

$$G/S < 0,70 \quad (I.4.)$$

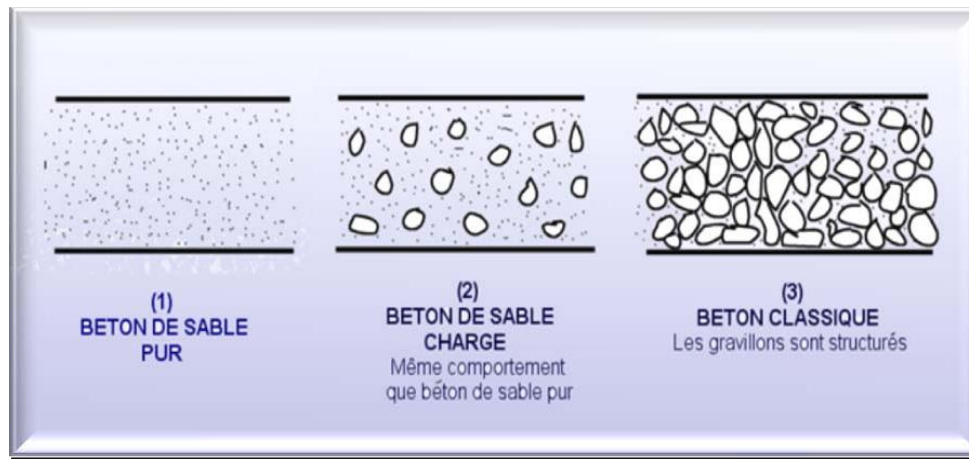


Figure I.3. Proportion du gravillon dans le béton.

I.2.3.6.3. 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 [3].

I.2.4. Propriétés essentielles du béton de sable

I.2.4.1. Granulométrie et maniabilité

Le béton de sable nécessite plus d'eau de gâchage que les bétons traditionnels ; ceci se traduit par des valeurs E/C (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5. Ce rapport se situe entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange ; d'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport E/C+A (A= addition en fines activées), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels [3].

La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau, plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité : l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de maniabilité.

Pour chacun des sables l'augmentation de la teneur en fine (diminution du module de finesse) entraîne une maniabilité moins bonne. Le phénomène n'a pas un caractère systématique.

Il dépend de la nature des fines incorporées : logiquement l'ajout des fines de type sphérique en diminuant la quantité des vides devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

La relation dosage en fines-maniabilité peut dépendre aussi de la nature du sable. On constate en effet :

- Un comportement différent selon la granulométrie du sable, la **Figure I.4.**, montre l'effet de différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune, à teneur en eau constante.
- Pour le sable de dune, l'ajout de fines entraîne, jusqu'à 200 kg/m³ une chute de maniabilité ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact).

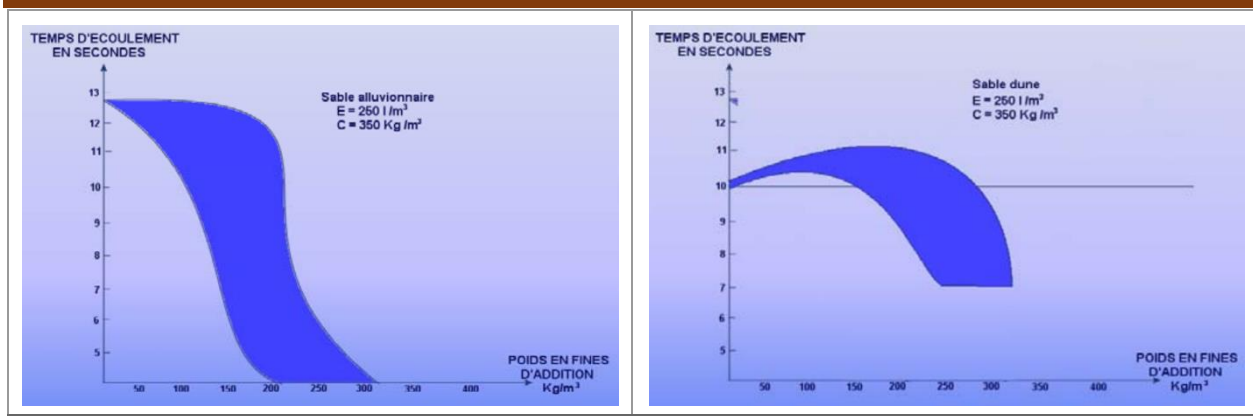


Figure I.4. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (fines d'addition calcaire) [3].

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.

I.2.4.2. Granulométrie et résistance

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres et en particulier :

- **La finesse de l'addition :**

Plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité (et donc du gain en résistance) ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable ; on le constate avec des fines calcaires aussi bien sur un sable alluvionnaire (**Figure I.5. a**) que sur un sable de dune (**Figure I.5. b**).

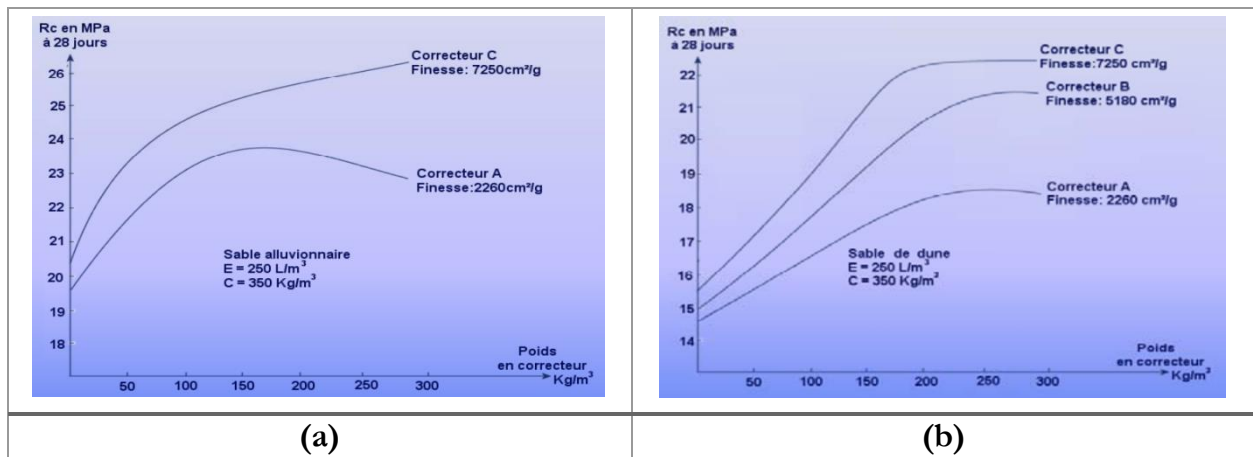


Figure I.5. Effets du dosage et de la finesse de d'addition sur la résistance [3].

- **La nature de l'addition :**

A même dosage, la **Figure I.6.**, permet de constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.

La différence est encore plus considérable si l'on se place à maniabilité constante. Les fillers les plus efficaces sont ceux qui, hydrauliquement actifs, entraînent également une réduction d'eau.

Il convient de noter que ces résultats ont été obtenus sans adjuvant et que l'emploi d'un plastifiant permettrait d'augmenter l'efficacité de certains fillers hydrauliquement actifs mais nécessitant un besoin en eau important.

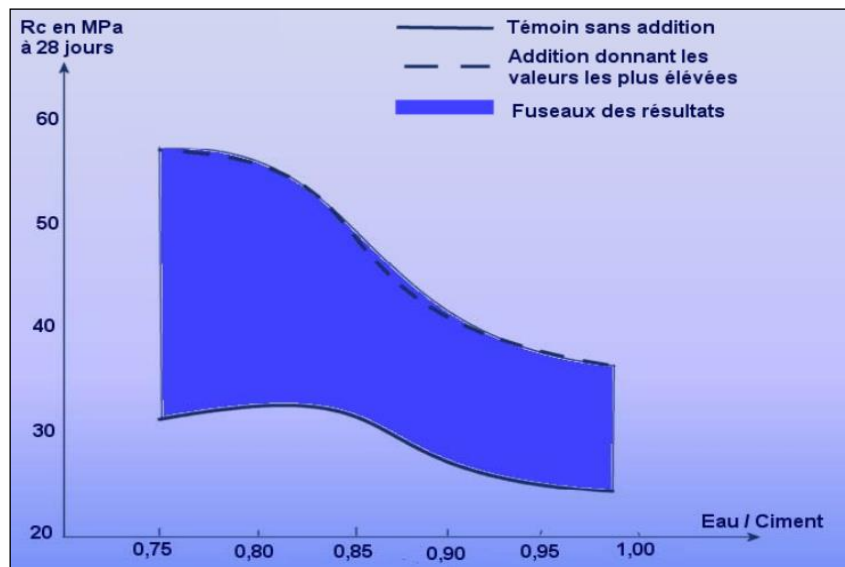


Figure I.6. Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [3].

- **La dimension du $D_{\max}$:**

La Figure I.7., montre l'effet de la granulométrie sur la résistance :

- Pour des rapports E/C (eau/ciment) constants, on constate que l'effet du diamètre du plus gros granulat $D_{\max}$ est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sables [3].

Cependant on constate que la maniabilité est très différente selon le type de sable. A titre d'exemple pour un $D_{\max}$ égal à 20 mm, le béton de sable est très maniable, ce qui n'est pas le cas pour un diamètre $D_{\max}$ égal à 1,6 mm. Ce dernier cas nécessite une quantité d'eau supplémentaire, et par conséquent une chute de résistance plus ou moins importante.

- L'effet de la granulométrie sur la résistance apparaît plus clairement à des dosages en ciment constants.
- Chaque fois que le diamètre maximal $D_{\max}$ diminue, il faut plus d'eau pour garder la même maniabilité ce qui fait chuter implicitement la résistance. Dans le cas du béton de sable ($D_{\max} < 5\text{mm}$), et pour minimiser la chute de résistance, on prévoit l'utilisation d'un adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

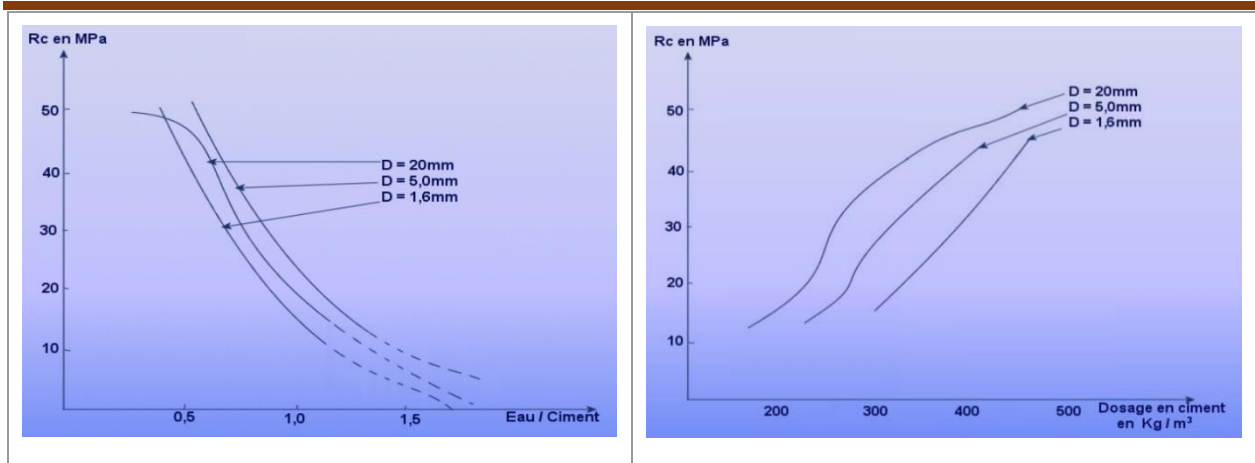


Figure I.7. Effet de la granularité sur la résistance [3].

I.2.5. Domaines d'utilisation des bétons de sable

Les applications qui ont concerné des domaines aussi larges que le bâtiment et le génie civil ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation du béton de sable, tant techniquement qu'économiquement [11].

Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable :

I.2.5.1. En raison de sa fluidité

- A la fabrication des pieux forés ;
- A la réalisation de dallages autonivelants ;
- Au renforcement de structure par projection.

I.2.5.2. En raison de sa faible tendance à la ségrégation

- A une facile mise en œuvre sous l'eau ;
- A la réparation de fondations ;
- Au comblement de cavités.

I.2.6. Les méthodes de formulation

I.2.6.1. Définition

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants, afin 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.2.6.2. 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 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 ($d/D_{\max}$) [12].

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

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

Où :

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.2.6.2.1. 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 80 μ m et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable .

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

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

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D_{\max})^{1/5} \quad (I.6.)$$

Où :

$P_s(V)$: Porosité du sable d'étendue 80 μ 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 (0.8 ; 0.7).

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 à 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.

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.08/D_{\max})^{1/5} \quad (\text{I.7.})$$

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 (**Figure I.8.**).

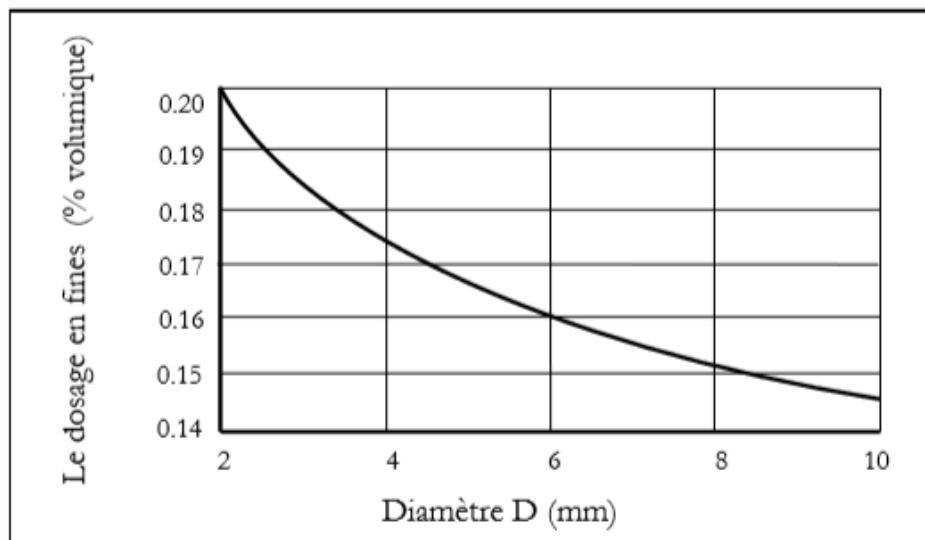


Figure I.8. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [12].

I.2.6.2.2. 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

$$(e + v)_{\min} = 0.8 (d/D_{\max})^{1/5} \quad (\text{I.8.})$$

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 :

$$d = (60 / (f)) \text{ mm} \times \rho \quad (\text{I.9})$$

Où :

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

ρ : 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 comme la **Figure I.9.**

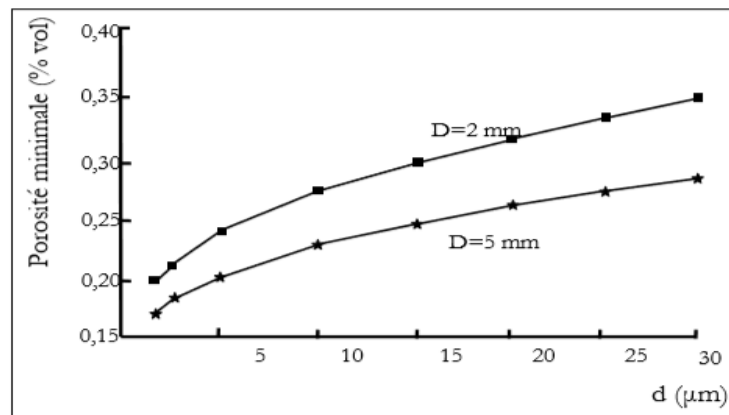


Figure I.9. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [12, 13].

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.10.**, nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

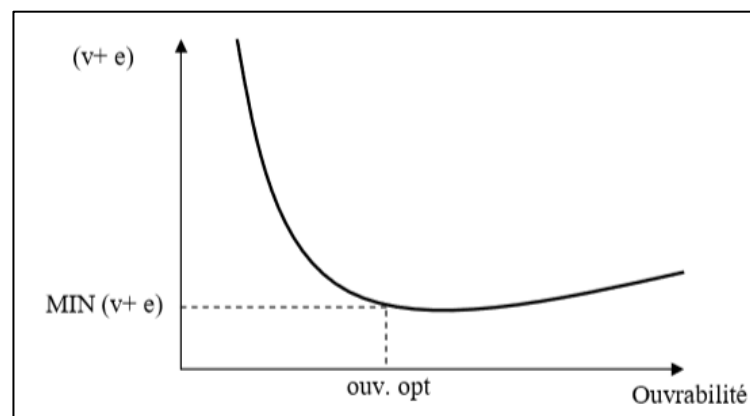


Figure I.10. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée.

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 quel que 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%.

$$[\text{Vides}] = K [\text{eau}] \quad (\text{I.10.})$$

Avec :

K : constante comprise entre 0,2 et 0,25.

I.2.6.2.3. 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).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \quad (\text{l/m}^3) \quad (\text{I.11.})$$

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à $80\mu\text{m}$, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

I.2.6.2.4. 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 a été proposée récemment [14].

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad (\text{I.12.})$$

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).

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

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

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

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

K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire (**Figure I.11.**).

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

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m³).

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 [14], alors que d'autres paramètres pourraient influencer 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.

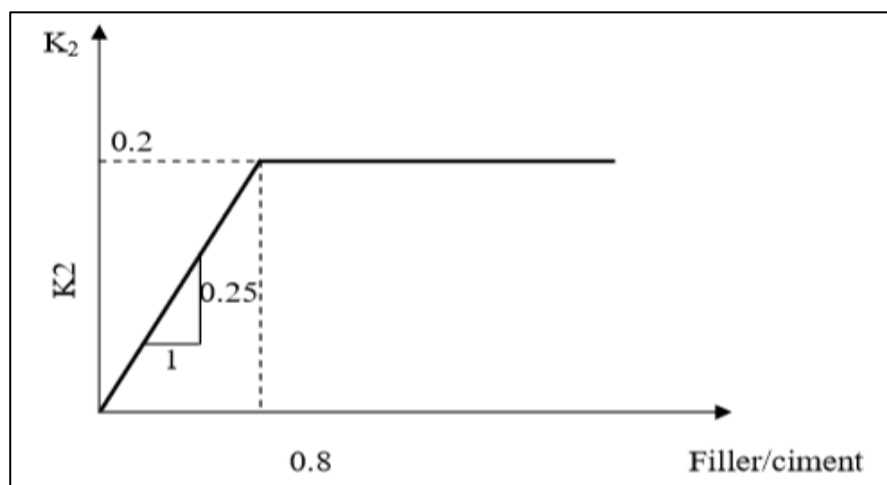


Figure I.11. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en termes 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 système de deux équations simples

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

Il en résulte de tout ce qui précède 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.2.6.3. Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente, dans cette étude on utilise un seul essai disponible au niveau de laboratoire pour optimiser et caractériser la consistance de notre béton :

-  Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS, pour mesurer la masse volumique du béton frais on utilise ;
-  Un récipient cylindrique en acier rigide et étanche à l'eau.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction [12].

I.2.6.3.1. Les différentes étapes de la formulation

I.2.6.3.1.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule d'un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvant, 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/m³).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m³), 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 :

$$V_{air} + V_c + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \text{ (En litre).} \quad (I.13.)$$

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/m³).

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 d'affaissement au cône d'ABRAMS ;
- La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

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

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm V \times MV_{sable} \quad (I.14.)$$

Tel que : MVAT, MVAR et MV_{sable} représentent respectivement la masse volumique apparente théorique, la masse volumique apparente réelle du béton et la masse volumique absolue du sable.

Si l'affaissement au cône d'ABRAMS est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si l'affaissement 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.2.6.3.1.2. 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 d'un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un affaissement 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 :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (I.15.)$$

I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire

Le **Tableau I.2.**, qui donne comparaison de quelques caractéristiques de béton de sable et béton ordinaire.

Tableau I.2. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.

Béton de sable	Béton ordinaire
<u>Composants [3]</u> - Ciment ; - Sable ; - Filler ; - Eau : plus quantité d'eau.	<u>Composants</u> - Ciment ; - Sable ; - Gravier ; - Eau : moins quantité d'eau.
<u>Qualités essentielles</u> - Ouvrabilité moins : le module de finesse de mélange est plus faible. - Résistance faible : due à l'utilisation davantage de quantité d'eau dans la composition du béton de sable pour mouiller toutes les particules fines.	<u>Qualités essentielles</u> - Ouvrabilité plus : le module de finesse de mélange est plus grand. - Résistance forte : due à l'effet de présence de gravier dans la composition des bétons ordinaires.
<u>Méthodes de formulations</u> - Méthode théorique et méthode expérimentale [3] ; - Méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées [15].	<u>Méthodes de formulations [7]</u> * Méthodes basées sur des considérations théoriques ou des essais : - Méthode à granularité continue de Bolomey ; - Méthode de Vallette ; - Méthode de Faury. * Méthodes générales du C.E.S (centre d'essai des structures) : - Evaluation de l'humidité des granulats ; - Utilisation d'abaque (méthode Dreux).
<u>Particularité du béton [3]</u> - Retrait plus que le béton ordinaire ; - Fluage plus faible, voisin de celui d'un béton ordinaire ; - Elasticité : module d'élasticité : les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faibles que ceux des bétons classiques.	<u>Particularité du béton</u> - Retrait moins que le Béton de sable ; - Fluage voisin de celui d'un béton de sable ; - Elasticité : les bétons ordinaires ont des modules d'élasticité plus forts que ceux des bétons de sable.

<u>Domaines d'emploi</u>	<u>Domaines d'emploi [7]</u>
- Bâtiments ; - Fondations ; - Voiries ; - Travaux des réparations ; - La projection des surfaces ; - La réhabilitation de collecteurs d'assainissement ; - Les travaux d'injection ; - Le comblement de cavités.	- Bâtiments ; - Fondations ; - Voiries ; - Aéroports ; - Ouvrages d'art ; - Travaux des réparations ; - Les ponts ; - La préfabrication.

I.4. Généralité sur les fibres et les bétons de fibres

I.4.1. Introduction

Le béton de fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Les microfibres peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc. Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soude ou ferrailage en acier.

Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment. Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus. Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement et la teneur en volume de fibre.

I.4.2. Les Fibres

Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, ils présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature, chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques [16].

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille ...), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques.

Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice et la mode de performance du composite (**Tableau I.3.**).

Tableau I.3. Différents types de fibres [17].

Fibres naturelles			Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Minérales	Organiques
- Lin ; - Chanvre ; - Coton ; - Celluloses ; - Sisal.	- Poil ; - Crin ; - Laine ; - Soie.	- Amiante de roches ; - Silico magnésiennes.	- Laitiers de haut fourneau ; - Laine de roche (basalte) ; - Carbone ; - Céramique ; - Métaux (acier, fonte) ; - Verres spéciaux.	Polymères longs dont les molécules sont orientées dans l'axe de fibre

I.4.3. Les fibres utilisées comme renfort dans les bétons

Les fibres ne sont pas considérées parmi les constituants de base du béton et sont utilisés dans sa composition pour un meilleur contrôle de fissuration, par un renforcement de la contrainte de traction du béton, considérée comme faible [18].

Plusieurs catégories de fibres sont actuellement présentes sur le marché à savoir : les fibres synthétiques (carbone, polyester, nylon, polypropylène...), de verres (sodo-calcique, borosilicaté...), végétales (sisal, jute, noix de coco, palmier et bambou...) et métalliques (fil étiré à froid, inoxydable, galvanisé, ruban en fonte amorphe, tréfilé, tôle découpée ...).

La nature et l'aspect divers des fibres, fait que ces dernières présentent des propriétés distinctes. Selon les objectifs recherchés, on peut faire la distinction entre les fibres possédant des résistances élevées (fibres de verres, d'acier, de carbone...) et les fibres ayant des résistances faibles (fibres végétales, propylène ...).

I.4.3.1. Les fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et modes d'opérations [8].

I.4.3.2. Les fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine, verre...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles.

Les fibres de verre

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé notamment de silice, alumine, chaux et magnésie. Suivant leurs compositions, différents types de verre filables peuvent être obtenus. Le procédé de fabrication se déroule en cinq étapes : (1) la mixture est chauffée à 1500°C jusqu'à devenir liquide homogène ; (2) le verre en fusion est filé par étirement ; (3) les fibres sont ensimées d'un revêtement protecteur pour rassembler durablement les centaines de filaments en un fil, (4) les fils sont ensuite bobinés ou coupés selon finalités ; (5) les fils sont finalement séchés à des températures de 700 à 800 °C. Dans la pratique toutefois, le verre E constitue environ 99% de la production et les autres verres sont réservés à des applications spécifiques (**Tableau I.4.**).

Tableau I.4. Caractéristiques des différentes fibres de verre

Type de verre	Caractéristiques générales
E	Usage général ; bonnes propriétés électriques
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R, S	Haute propriétés mécaniques

Ces fibres sont utilisées dans la confection des panneaux préfabriqués, murs rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton et enduit pour bloc de béton. Le **Tableau I.5.**, montre les différentes propriétés des fibres de verre [19].

Tableau I.5. Propriétés physiques et mécaniques des fibres de verres [19].

Fibre	Diamètre (µm)	Densité (kg/m ³)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (GPa)
Verre	5-500	2,4	2-3,5	80	2-3

I.4.3.3. Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des matériaux de type organique, elles sont apparues sur le marché du génie civil il y a une dizaine d'année. Avant, on les utilisait comme isolant thermique et acoustique. Progressivement, on les a introduites dans les bétons fibrés pour améliorer leur résistance à la fissuration due au retrait plastique et pour améliorer leur résistance à la compression. Les fibres végétales sont aujourd'hui très utilisées par la filière textile et automobile. Cependant on note que malgré les avantages économiques et écologiques qu'elles présentent, leur introduction dans le bâtiment demeure timide notamment en France contrairement à d'autres pays comme le Japon et le Canada. Parmi les fibres végétales les plus utilisées on cite le chanvre, la paille, le sisal, le coco, le jonc de mer, le lin, le bambou, etc. [20].

I.4.3.4. Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques proviennent des polymères organiques et sont le résultat de recherches et des développements de l'industrie pétrochimique et du textile. Les fibres reconnues comme les plus résistantes sont : les polyoléfines, les polypropylènes, les polyéthylènes, le nylon et le carbone.

Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques, qui est de 15 à 20 %, favorise la ductilité du béton. Les fibres synthétiques tirées des matières plastiques sont, par contre, peu résistantes au feu. La température de fusion ou température à laquelle les fibres deviennent très molles et perdent leurs propriétés est d'environ 160°C. Les fibres synthétiques en deux catégories selon leur dimension : les microfibres et les macros fibres synthétiques [21]. Le **Tableau 1.6.**, montre que les caractéristiques physico-mécaniques des fibres les plus utilisées [22].

Tableau I.6. Les principales caractéristiques physico-mécaniques des fibres les plus utilisées.

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	Densité (kg/m³)	Rt (MPa)	E 10³ (MPa)	Allongement à la rupture en %	Coeff. De Dilatation (µ/m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5-500	20-80	7,8	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36 x 2600 de section	50-60	7,8	2500	140	1	-	1500
Verre	5-20	40-70	2,6	1500-3000	80	2-3,5	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0,9	400-750	5-10	15-25	90	150
Polyester	-	-	1,4	700-850	8	11-13	-	-
Amiante	0,02-20	5	2,5-3,4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbonne	5-9	Varia-ble	1,7-2	2000-3000	250-400	0,5-1,5	-	400-1500
Sisal	10-50	1,50	1,5	-	130	3	-	-

I.4.4. Choix et rôles des fibres dans le béton

I.4.4.1. Choix des fibres

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces massives, renforcement de pâte pure de matériau de béton, réparation de structures ...), de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés, adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leur prix.

Actuellement plusieurs natures de fibres sont utilisées, les qualités indispensables qu'elles doivent présenter sont les suivantes [14] :

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment ;
- Avoir une bonne résistance à la traction ;
- Ne pas risquer d'être attaquées par le milieu basique du ciment ;
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres ;
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre qui les manipule ;
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le cout du béton.

I.4.4.2. Rôles des fibres dans le béton

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité.

Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets (**Figure I.12.**) :

- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes ;
- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.

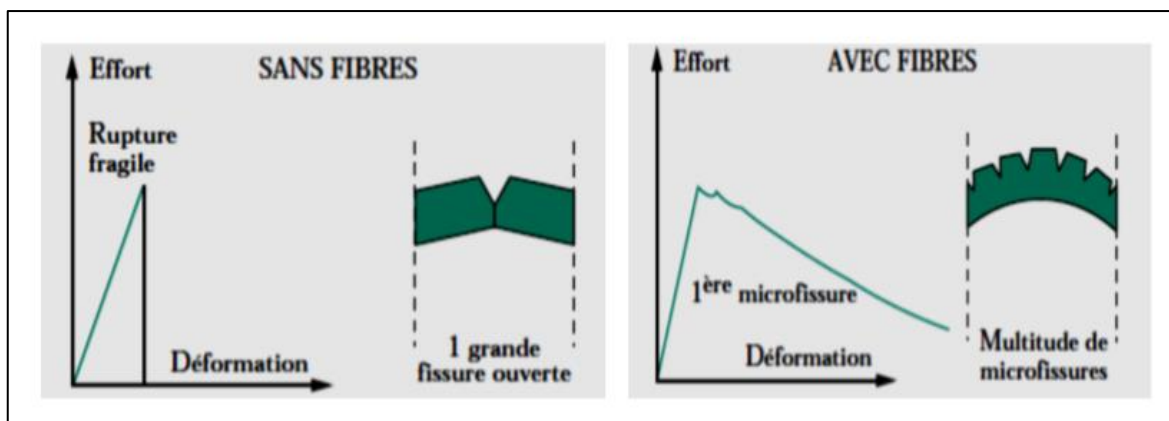


Figure I.12. Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques [23].

Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- L'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire ;
- L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration ;
- La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge ;
- La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur) ;
- L'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;
- L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion [24].

I.4.5. Effet du dosage et de l'orientation des fibres de verre dans le béton

I.4.5.1 Influence du dosage en fibres

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation préférentielle.

La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.

La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élanement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affectée. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante [25].

I.4.5.2 Effet de l'orientation et de la distribution des fibres

Les propriétés du béton de fibres dépendent beaucoup de l'orientation et de la distribution des fibres par rapport aux directions de sollicitation qui peuvent être triaxiales, biaxiales, ou uni-axiale. On parle d'orientation préférentielle des fibres lorsque qu'une quantité de fibres est orientée dans une même direction. Cet effet est généralement dû à la mise en place du béton dans son moule, les fibres s'orientant parallèlement à l'axe d'écoulement [27]. La vibration du béton peut aussi conduire à la ségrégation et à une orientation préférentielle des fibres en fonction des axes de vibration qui, sous l'effet de leur poids propre, vont avoir tendance à descendre dans le fond du moule. L'utilisation de l'aiguille vibrante, peut conduire à des effets de cheminée. Lorsque l'on retire l'aiguille, le béton s'écoule afin de se remettre en place mais les fibres ne suivent pas. Ceci crée des zones sans fibres dans le béton.

I.4.6. Fonctionnement d'une fibre dans le béton

Les fibres dans une matrice cimentaire ont un rôle analogue à celui des armatures dans le béton, c'est-à-dire reprendre les efforts de traction. Les fibres (macro ou micro) limitent la déformation, la propagation et la coalescence des microfissures au sein de la matrice cimentaire. Les fibres cousent à la fois les fissures existantes en empêchant leur développement et limitent la formation d'autres fissures en renforçant la matrice cimentaire.

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renforts, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement et ponts de matière. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises, comme le montre la courbe de comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0% sur la **Figure I.13. [27]**.

Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton. Les fibres, en cousant la fissure, assurent une continuité structurale et permettent au béton d'avoir un comportement ductile en lui conférant une capacité portante post-fissuration.

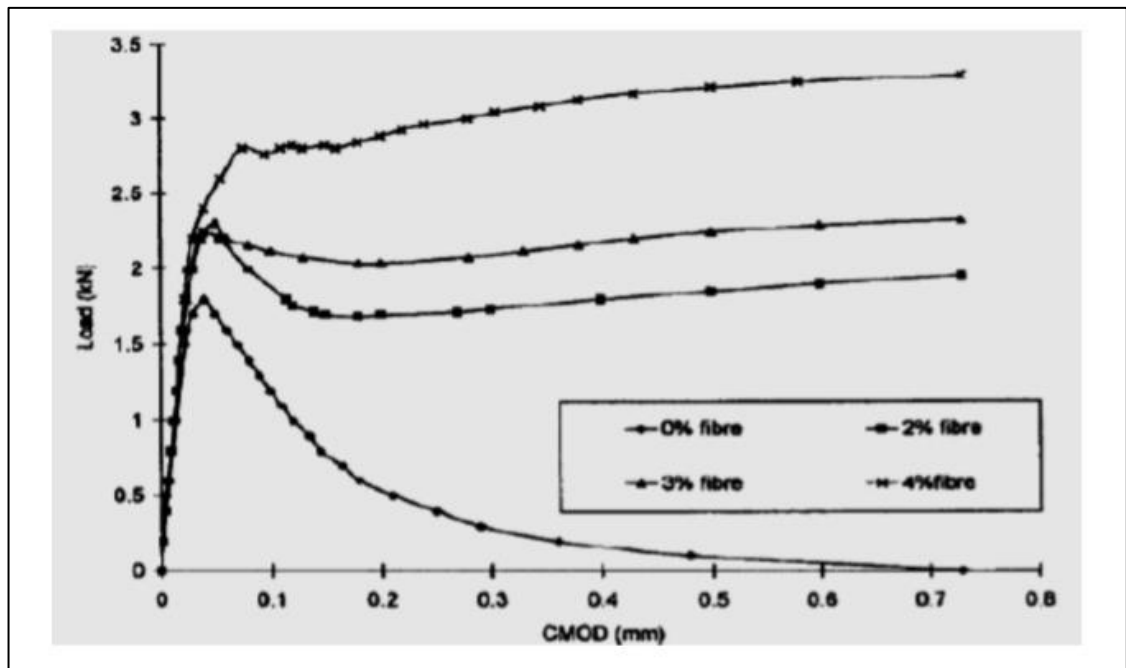


Figure I.13. Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres [27].

I.5. Conclusion

D'après l'étude bibliographique, on peut conclure que :

- Les bétons de sable pourraient remplacer les bétons ordinaires dans certains domaines d'applications. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès ;
- D'un point de vue générale et simple, le béton de fibres est constitué en trois phases :
 - . La matrice cimentaire ;
 - . Les fibres ;
 - . La zone de transition (interface) fibres- matrice.
- Le rôle des fibres dans la matrice cimentaire sur les différentes phases de comportement du matériau est fonction de différents paramètres ;
- Les fibres limitent les phénomènes de propagation rapide et instable de la rupture du béton. Elles modifient les cheminements des fissures dans les structures ;
- La ténacité des éprouvettes est nettement augmentée par la présence des fibres. Elle est caractérisée principalement par des mesures énergiquement globales de l'élément de structure que constitue l'éprouvette ;
- Les caractéristiques des fibres et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.

CHAPITRE II :

Matériaux utilisés et techniques expérimentales

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions les caractéristiques physico-chimiques des différents matériaux utilisés durant ce projet de recherche (sables, ciment, filler calcaire, superplastifiant et fibre de verre). Ensuite, nous exposons les différents essais expérimentaux utilisés pour caractériser les mélanges à l'état frais et durci.

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés

II.2.1. Le sable

Le sable (SAD) utilisé dans cette étude est un mélange de deux sables, Le premier est un sable dunaire (SD) provenant de la région Sud de la ville d'El Oued qui présente un diamètre de grain maximum d'environ 0,63 mm (**Figure II.1. a**). Le deuxième est un sable alluvionnaire (SA) provenant de la région Nord-Ouest de la ville d'El Oued (Baadij) et ayant un diamètre maximum de 5 mm (**Figure II.1. b**). Les proportions de ce mélange sont préparées selon un rapport massique déterminé en corrigeant la courbe granulométrique du sable alluvionnaire, dans sa partie fine, par ajout de sable de dune. Ce rapport est défini comme suit [28] :

$$\frac{S_A}{S_D} = 1,7 \quad (\text{II. 1.})$$

Où :

SA : fraction massique du sable alluvionnaire dont le diamètre maximum de 5 mm ;

SD : fraction massique du sable de dune dont le diamètre maximum d'environ 0,63 mm.

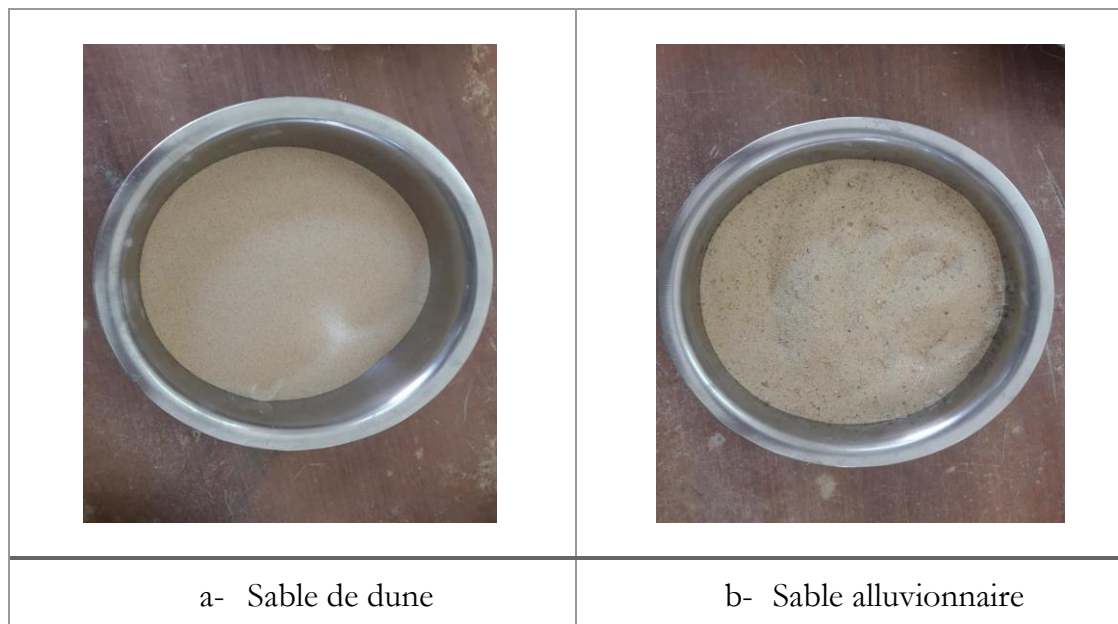


Figure II.1. Les sables utilisés.

II.2.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme **NF P 18 560**. Les résultats de l'analyse granulométrique des deux sables ainsi que leur mélange sont présentés par les **Tableaux II. 1, 2, 3.**, et par les courbes granulométriques de la **Figure II.2. (Photo N° 01 dans l'annexe).**

- **Sable alluvionnaire**

Tableau II.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable alluvionnaire (SA).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
5	0	0	0,00	100,00
4	2,6	2,6	0,13	99,87
3,15	4,5	7,1	0,36	99,65
2,5	23	30,1	1,51	98,50
2	22,5	52,6	2,63	97,37
1,6	25,6	78,2	3,91	96,09
1,25	39,1	117,3	5,87	94,14
1	40	157,3	7,87	92,14
0,8	57,2	214,5	10,73	89,28
0,63	133,5	348	17,40	82,60
0,5	206,8	554,8	27,74	72,26
0,4	253,1	807,9	40,40	59,61
0,315	392	1199,9	60,00	40,01
0,25	244,8	1444,7	72,24	27,77
0,2	242,4	1687,1	84,36	15,65
0,16	270,7	1957,8	97,89	2,11
0,125	23,5	1981,3	99,07	0,93
0,1	11,5	1992,8	99,64	0,36
0,08	4,3	1997,1	99,86	0,14
Fond	2,9	2000	100,00	0,00

- Sable de dune

Tableau II.2. Résultats d'analyse granulométrique du sable de dune (SD).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refuse cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisâtes cumulés (%)
0,63	0	0	0,00	100,00
0,5	8,3	8,3	2,37	97,63
0,4	21,5	29,8	8,51	91,49
0,315	35,1	64,9	18,54	81,46
0,25	37,4	102,3	29,23	70,77
0,2	77,6	179,9	51,40	48,60
0,16	155,4	335,3	95,80	4,20
0,125	8	343,3	98,09	1,91
0,1	3,6	346,9	99,11	0,89
0,08	2,2	349,1	99,74	0,26
Fond	0,9	350	100,00	0,00

- Sable mélange

Tableau II.3. Résultats d'analyse granulométrique du sable mélange (SAD).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
5	0	0	0,00	100,00
4	2	2	0,10	99,90
3,15	4,3	6,3	0,32	99,69
2,5	17	23,3	1,17	98,84
2	21,1	44,4	2,22	97,78
1,6	33,8	78,2	3,91	96,09
1,25	20,8	99	4,95	95,05
1	26,6	125,6	6,28	93,72
0,8	39,4	165	8,25	91,75

0,63	90,6	255,6	12,78	87,22
0,5	101,8	357,4	17,87	82,13
0,4	162,2	519,6	25,98	74,02
0,315	320,3	839,9	42,00	58,01
0,25	299,7	1139,6	56,98	43,02
0,2	494,8	1634,4	81,72	18,28
0,16	301	1935,4	96,77	3,23
0,125	30,6	1966	98,30	1,70
0,1	20,2	1986,2	99,31	0,69
0,08	10,8	1997	99,85	0,15
Fond	3	2000	100,00	0,00

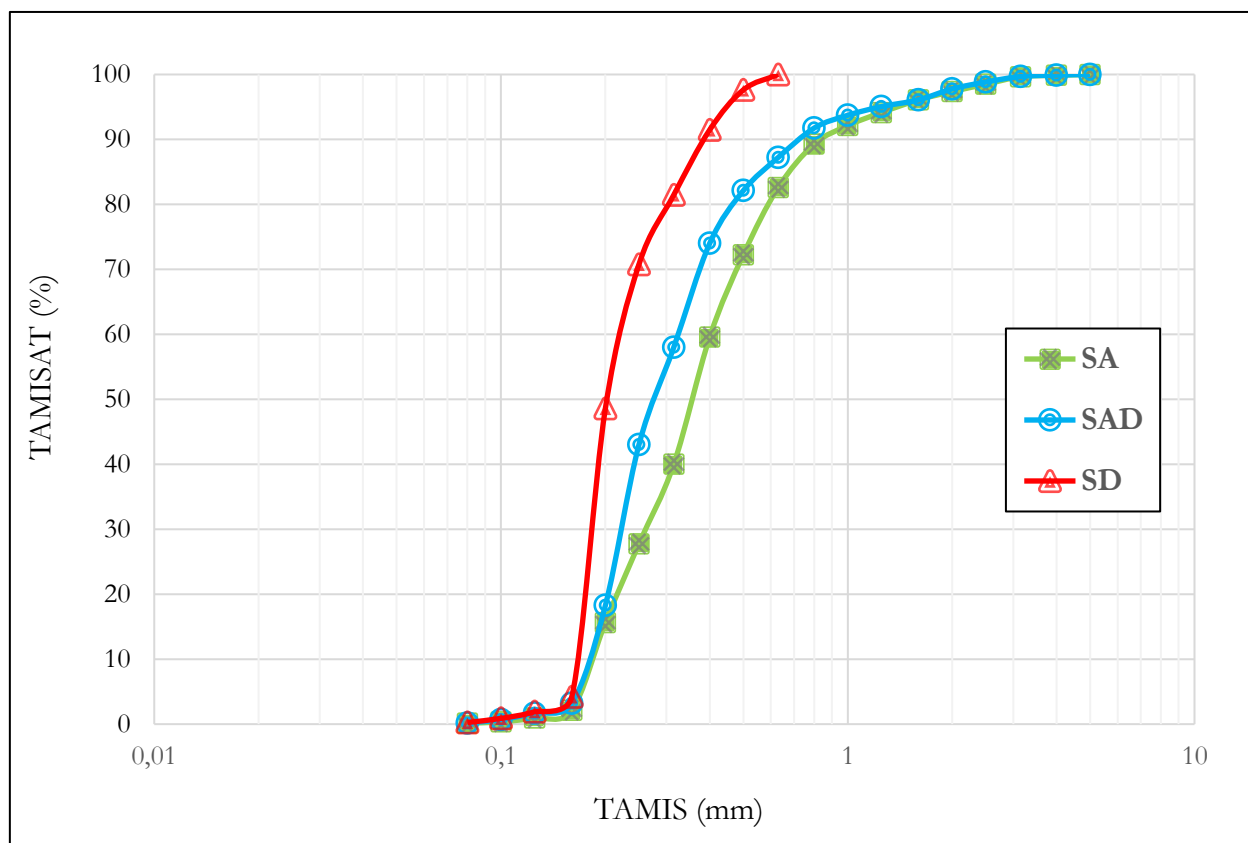


Figure II.2. Courbe granulométrique des sables utilisés.

D'après les courbes granulométriques des deux sables sont toutes continues et montrent clairement que la granulométrie du sable de dune est serrée, par contre les granulométries des deux autres sables sont étalées. Néanmoins la granulométrie du sable alluvionnaire-dunaire paraît mieux inscrite dans le fuseau recommandé pour les bétons.

II.2.1.2. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

1) Masses volumiques

- *Masse volumique apparente*

Cet essai est régi par la norme **NFP 18-554**, elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{II. 2.})$$

Où

γ : Masse volumique apparente ;

M : est la masse du matériau ;

V : est le volume total du matériau.

- *Masse volumique absolue*

Cet essai est régi par la norme **NFP 18-301**, 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.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{II. 3.})$$

Où

γ_s : Masse volumique absolue ;

M_s : est la masse du matériau ;

V_s : est le volume total du matériau solide.

2) Module de finesse

Il est défini comme étant la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série 0,16. 0,315. 0,63. 1,25. 2,5 et 5 mm, à noter que plus le module de finesse est élevé plus le sable est grossier.

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus (en \%)} \text{ sur les tamis } 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 \text{ et } 5}{100} \quad (\text{II. 4.})$$

3) Compacité et porosité

La compacité (C_p) est le rapport du volume de la matière solide au volume total. Elle est définie par :

$$C_p = \frac{V_s}{V} = 1 - p = \frac{\gamma}{\gamma_s} \quad (\text{II. 5.})$$

Où p : est la porosité.

4) Equivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme **NF P18 598**, est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants (**Figure II.3.**) :

- La hauteur h_1 : sable propre + éléments fins ;
- La hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$ES = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \times 100 \quad (\text{II. 6.})$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine : équivalent de sable visuel ES_v et équivalent de sable au piston ES_p (**Photo N° 02 dans l'annexe**).

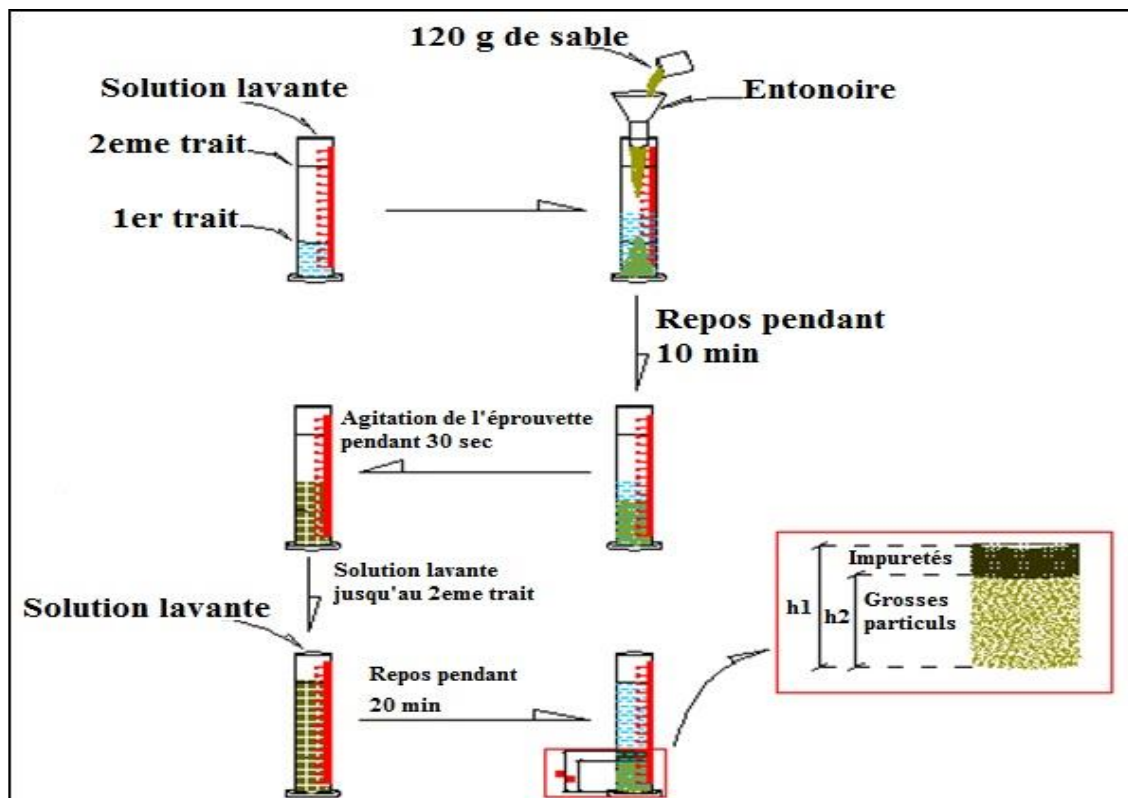


Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Selon la norme **NF P18 598**, les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons sont indiquées sur le **Tableau II.4**.

Tableau II.4. Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.

N°	Equivalent de sable (%)	Observations
1	ESV < 65 ESP < 60	Sable argileux ; risque de retrait ou de gonflement de béton.
2	65 < ESV < 75 60 < ESP < 70	Sable légèrement argileux ; de propreté admissible.
3	75 < ESV < 85 70 < ESP < 80	Sable propre, convenant au béton à haute qualité.
4	ESV > 85 ESP > 80	Sable très propre ; absence de plasticité de béton.

II.2.1.3. Synthèse des résultats

Le **Tableau II.5.**, regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur les sables utilisés.

Tableau II.5. Caractéristiques physiques des sables SD, SA et SAD.

Caractéristiques	D _{max} (mm)	γ (kg/m³)	γ _s (kg/m³)	M _f	C _p (%)	ES _v (%)	ES _p (%)	p (%)
Sable de dune (SD)	0.63	1600	2710	1,14	59	95,05	86.31	41
Sable alluvionnaire (SA)	5	1680	2650	1,83	63	89,47	80.43	37
Sable mélange (SAD)	5	1650	2690	1,58	61	90.09	82.13	39

Le tableau ci-dessus montre que les trois sables utilisés sont très propres si l'on se réfère aux valeurs de l'équivalent de sable préconisées par la norme **NF P18 598**. Nous constatons aussi que les modules de finesse des trois sables sont faibles ce qui montre que les sables utilisés sont riches en éléments fins, rappelons ici que pour un sable à béton traditionnel, ce module est compris entre 2,20 et 2,80 [14]. On remarque que le diamètre maximal est plus petit dans le cas des granulats d'un béton de sable par rapport les granulats d'un béton traditionnel (gravier + sable), d'où le pourcentage des vides est assez élevé, ce qui impose l'utilisation l'ajout des fillers pour éviter un surdosage en ciment et combler les vides [30].

II.2.2. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ-CEM II/A - L 42.5N selon la norme

NA 442, le ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA), Ain Touta-Batna, Algérie.

Les principales propriétés physiques et mécaniques du ciment utilisé sont présentées dans respectivement dans les **Tableaux II.6., II.7.**

Tableau II.6. Propriétés physiques du ciment utilisé.

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Densité spécifique (kg/m ³)	Blaine surface spécifique (m ² /kg)	Consistance normale (%H ₂ P)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
730	3080	446,5	27.4	02h05	03h05

Tableau II.7. Propriétés mécaniques du ciment utilisé.

Propriétés	Age (J)		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	23.19	35.24	44.64
Résistance à la flexion (MPa)	4.99	6.78	7.80

Les analyses chimiques du ciment utilisé sont montrées dans le **Tableau II.8.**

Tableau II.8. Analyse chimique du ciment utilisé.

Elément	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Cl	Na ₂ O	Free CaO	PAF	Ins
Quantité (%)	18.47	61.08	1.16	4.63	3.34	2.64	0.71	0.017	0.4	0.87	6.69	2.15

II.2.3. Le filler calcaire

On utilise le filler pour compléter la courbe granulométrique du sable dans la partie fine et à combler les vides. Les fillers utilisés dans notre étude sont de nature calcaire obtenus par tamisage des restes de concassage (au tamis 80 μm) d'une carrière située à la sortie nord de la ville de HASSI MESSAOUD (**Figure II.4.**). La masse volumique absolue et apparente du filler utilisé sont respectivement 2520 kg/m³ et 880 kg/m³.



Figure II.4. Le filler utilisé.

II.2.4. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage pour les bétons de sable, comme tous les bétons ordinaires, doit être potable, dépourvue des sels minéraux. L'eau de gâchage (l'eau de robinet) utilisée dans cette étude provenant du château d'eau d'El Oued (centre-ville, cité El Rimel). L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme **NF P18 303 (Photo N° 03 dans l'annexe)**.

II.2.5. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant algérien du type « MEDAPLAST-SP40 » produit par la société « GRANITEX », Oued Smar (Wilaya d'Alger) (**Figure II.5.**). C'est une solution liquide se diluant facilement dans l'eau de gâchage et d'un couleur marron, conforme à la norme **EN 934-2**. Le dosage utilisé est 2% du poids de ciment. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont présentées dans le **Tableau II.9. [29] (Photo N° 04 dans l'annexe)**.



Figure II.5. Superplastifiant « MEDAPLAST-SP40 ».

Tableau II.9. Caractéristiques du superplastifiant.

Type	MEDAPLAST-SP40
Aspect	Liquide
Couleur	Marron
Densité	$1,20 \pm 0,01$
PH	8,2
Teneur en chlore	<1g/l

II.2.6. La fibre de verre

C'est une fibre normalisée et commercialisée extraite des mats à fils coupés (50 mm), le mat se présente sous forme planaire comme un tissu mais l'orientation des fibres est aléatoire.

L'utilisation des fibres de verre sont conçus spécialement pour l'amélioration des propriétés du béton et de mortier tel que la résistance.

Également, l'introduction de fibres de verre dans un béton en modifie le comportement. Ces ajouts permettent de "coudre" la matrice pour limiter l'apparition et surtout le développement de fissures. Les fibres de verre utilisées sont présentées dans la **Figure II.6**.

Les principales propriétés physiques et mécaniques de la fibre de verre utilisée sont présentées dans le **Tableau II.10**.



Figure II.6. Fibre de verre utilisée.

Tableau II.10. Propriétés physico-mécaniques de la fibre de verre.

Fibre	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Densité (kg/m^3)	Rt (MPa)	$E \times 10^3$ (MPa)	Allongement à la rupture en %
Verre	5-20	50	2,6	1500 - 3000	80	2-3,5

II.3. Techniques expérimentales

II.3.1. Malaxage et conservation

Afin de mieux homogénéiser le mélange, ce qui contribue à une bonne qualité du béton et par conséquent le bon contrôle des différentes propriétés du produit fini, le mélange est effectué par une " Bétonnière Électrique en Acier 140L 650W Orange ", selon le mode opératoire suivant :

Un mélange à sec de ciment, le sable et le filler calcaire pendant trois minutes à une vitesse lente (**Photo N° 05 dans l'annexe**).

Une fois que le mélange est devenu parfaitement homogène, l'eau de gâchage est ajoutée progressivement au mélange (70%), sans discontinuité, en vue d'assurer l'homogénéisation du mélange pendant 2,5 minutes à vitesse lente.

Enfin on ajoute 30% de l'eau de gâchage mélangé avec la quantité de l'adjuvant, sans discontinuité, puis la fibre de verre pendant 2,5 minutes à vitesse lente.

Après malaxage, le matériau est introduit dans des moules de $(40 \times 40 \times 160)$ mm³ pour les essais de la masse volumique, résistance à la flexion et l'absorption d'eau par immersion, et des moules de $(100 \times 100 \times 100)$ mm³ pour l'essai de résistance à la compression.

La mise en place du mélange se fait par coulage de presque la moitié du moule avec une légère vibration et une frappe de 30 coups. Ensuite on continue le coulage de la deuxième moitié du moule avec une vibration de 30 coups. L'excès de béton est éliminé par arasement. Les éprouvettes sont démoulées après 24 h et les échantillons sont conservés jusqu'au jour de l'essai dans la même salle où la température est maintenue à $(25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C})$ et l'humidité relative à $(50\% \pm 10\%)$.

II.3.2. Caractérisation du béton frais

II.3.2.1. La maniabilité

La maniabilité d'un béton est une qualité aussi importante que sa compacité. Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps dicté par la particularité du mélange (c'est-à-dire le diamètre maximal des grains).

Pour apprécier cette caractéristique nous avons utilisé le cône d'Abrams pour déterminer la maniabilité du béton de sable.

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est le plus couramment utilisé et le plus répandu sur les chantiers et les laboratoires du monde entier. L'appareillage est complètement décrit dans la norme **NF P18 451 (Photos N° 06 dans l'annexe)**.

Les principes essentiels de l'essai (**Figure II.7.**) :

- On remplit le cône en béton ;
- Le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige (25 coups pour chaque couche) ;
- On soulève ensuite le moule avec précaution.

Après démoulage, le béton n'étant plus maintenu, s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton, dans la minute qui suit le démoulage (**Figure II.8.**).

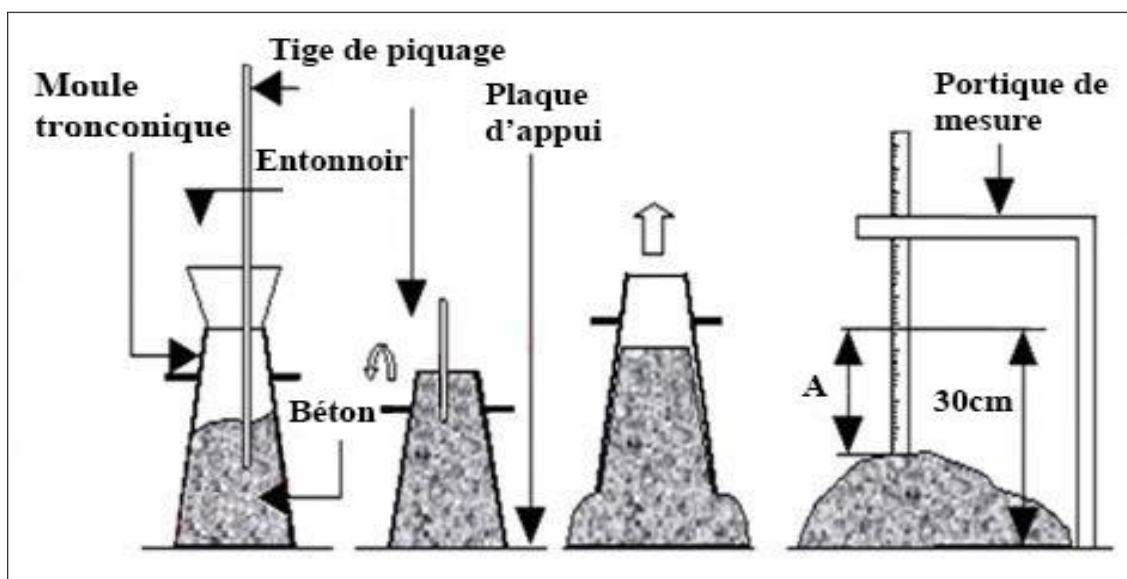


Figure II.7. Dispositif de mesure d'affaissement.

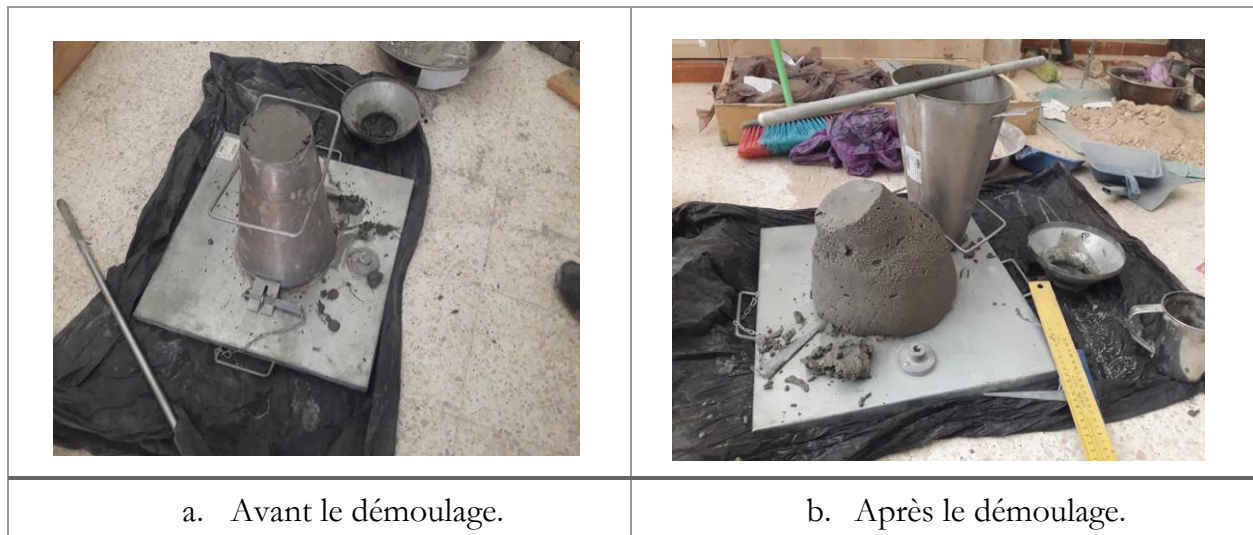


Figure II.8. Procédé de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Afin de définir la classe d'affaissement, la norme **NF P18 305** définit les classes d'affaissement indiquées sur le **Tableau II.11**.

Plus l'affaissement est important et plus le béton est mou ou fluide.

Tableau II.11. Classes de consistance du béton [31].

Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
$1 \text{ cm} \leq A \leq 4 \text{ cm}$	Ferme
$5 \text{ cm} \leq A \leq 9 \text{ cm}$	Plastique
$10 \text{ cm} \leq A \leq 15 \text{ cm}$	Très Plastique
$\geq 16 \text{ cm}$	Fluide

II.3.2.2. Masse volumique apparente réelle

Cet essai est réalisé pour la détermination de la formulation de base de béton de sable (sans fins d'ajouts). La mesure de la masse volumique du béton frais consiste à [29] :

- Prendre le poids de récipient à vide, soit M_0 (kg).
- Remplir un récipient d'un échantillon de volume V (m^3) et de poids M_0 (kg) connu par un échantillon du béton frais, qui a subi vibration.
- Araser et lisser les surfaces et prendre le poids de ce récipient du béton soit M_1 (kg).

La masse volumique (kg/m^3) de béton frais est :

$$\text{MVAR} = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (\text{II. 7.})$$

II.3.3. Caractérisation du béton durci

II.3.3.1. Masse volumique apparente

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient **NF EN 12390-7**. Elle est déterminée par pesée de l'échantillon et mesure de son volume.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{II. 8.})$$

Avec :

γ : la masse volumique, en kilogrammes par mètre cube ;

M : la masse de l'échantillon, en kilogrammes ;

V : le volume de l'échantillon, en mètres cubes.

II.3.3.2. Essai de rupture par flexion

La résistance à la flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(40 \times 40 \times 160)$ mm³ à raison de trois éprouvettes par composition. Les éprouvettes sont soumises à un essai de flexion trois (3) points selon les normes **EN 13286-47**, (**Figure II.9.**), l'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion du type " CONTROLS " ayant une capacité maximale 50 kN, la vitesse de chargement a été réglée à 0,625 mm/min jusqu'à la rupture (**Figure II.10.**).

Si F_t est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion, le moment de rupture vaut $F_t \cdot L/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est (**Photo N° 07 dans l'annexe**):

$$R_t = \frac{1.5 F_t L}{B^3} \quad (\text{II. 9.})$$

Avec :

L : la longueur entre les axes des deux appuis ;

B : la largeur de la section transversale de l'éprouvette.

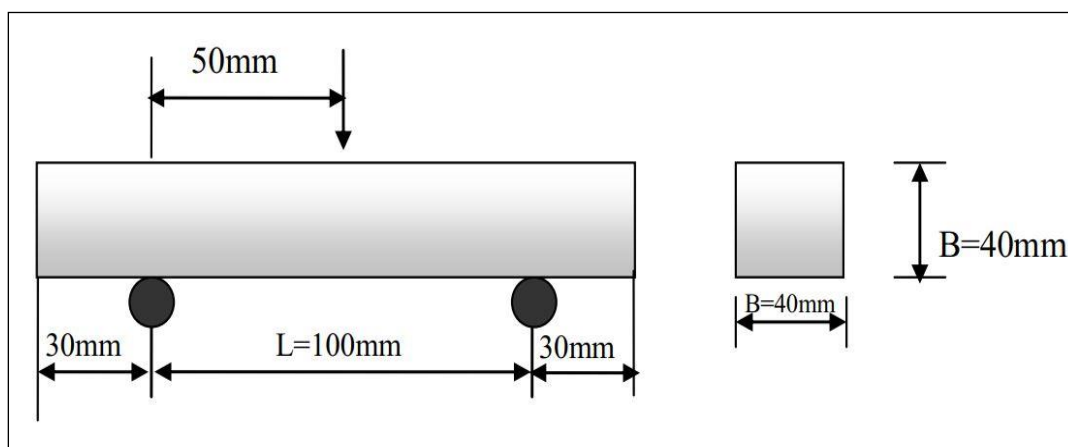


Figure II.9. Schémas de l'essai de rupture par flexion.

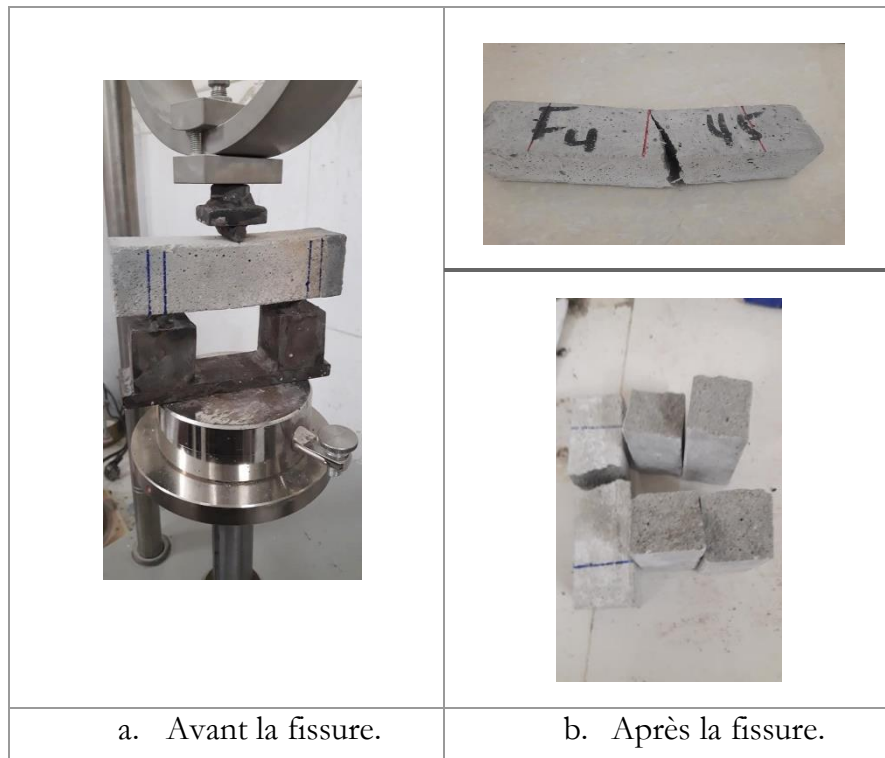


Figure II.10. Procédé de l'essai de rupture par flexion.

II.3.3.3. Essai de rupture par compression

Les deux parties des éprouvettes résultant de l'essai de traction par flexion sont soumises l'une après l'autre à l'essai de résistance à la compression (**Figure II.11.**).

Cet essai a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique du type « CONTROLS » à double quadrant ayant une capacité maximale de 2000 KN (**Figure II.12.**), les éprouvettes (100×100×100) mm³ ont été centrées entre les deux plateaux sur les faces latérales de moulage. Après la mise en marche de l'appareil, la charge augmente automatiquement à une vitesse constante de 0,5 MPa par seconde, permettant aux plateaux de comprimer l'éprouvette jusqu'à la rupture. L'essai a été réalisé conformément à la norme **NF P18 406 (Photo N° 08 dans l'annexe).**

La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{II. 10.})$$

Avec :

F_c : La force de compression ;

A : La surface transversale de l'éprouvette.

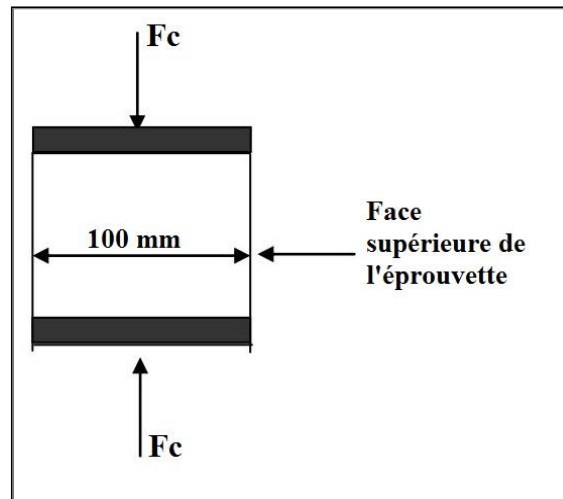


Figure II.11. Schémas de l'essai de compression.

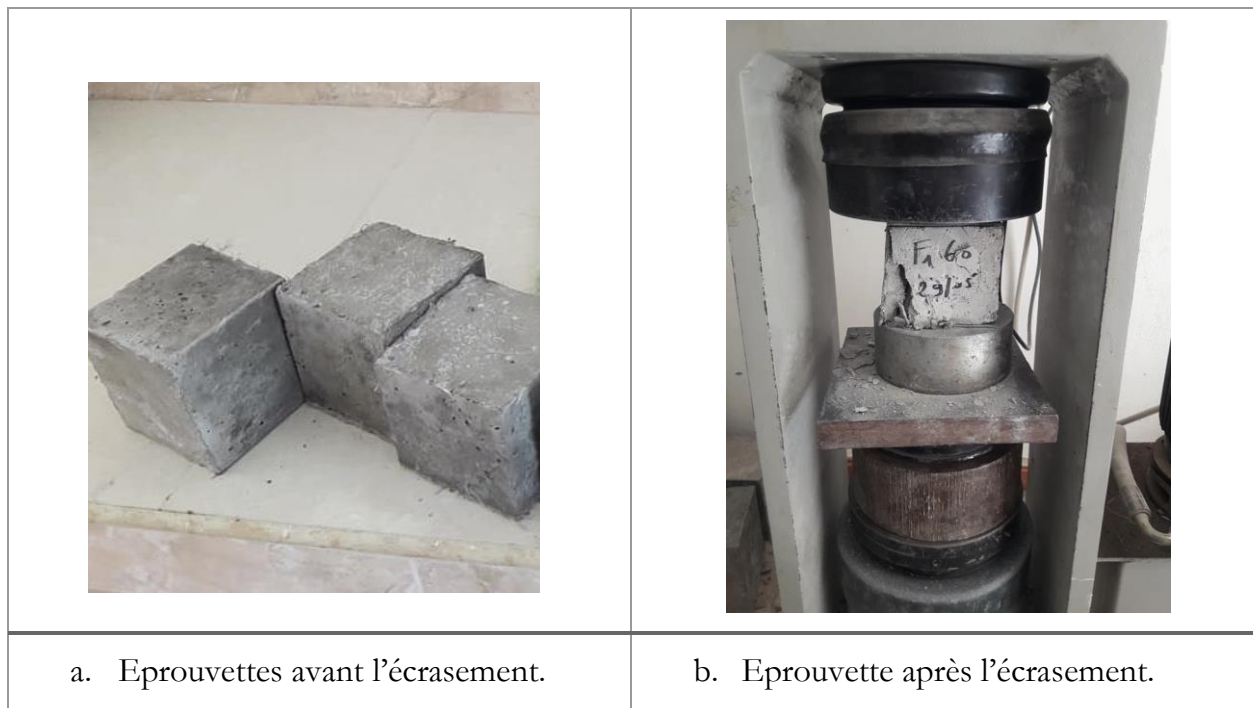


Figure II.12. Procédé de l'essai de rupture par compression.

II.3.3.4. Essai d'absorption d'eau par immersion

L'absorption par immersion consiste à déterminer le poids final après saturation et cela pour calculer le volume des vides (porosité) du béton durci.

Cet essai est effectué selon une méthode simple ; les éprouvettes de béton de sable sont pesées après leur passage à l'étuve à 48°C d'où elles ne sont retirées qu'après stabilisation de leur poids (soit P_s), ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau 20°C ± 5°C jusqu'à saturation du matériau, puis retirées et pesées, (soit P_h). Les valeurs sont prises par la moyenne de trois pesées par éprouvettes de chaque composition. La capacité d'absorption d'eau est donnée par la formule suivante :

$$A\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{II. 11.})$$



Figure II.13. Procédé de l'essai d'absorption d'eau par immersion.

II.3.3.5. Analyse par diffraction de rayons X

L'analyse par diffraction de rayons X (DRX) a été effectuée grâce à un diffractomètre de type « Brukers D8 Advance » (**Figure II.14.**) sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm . Les diffractogrammes sont des intensités de phases (pic) en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Le programme de diffraction de rayons X adopté est $2\theta : 10^\circ\text{-}70^\circ$ et est en fonction de la nature de l'échantillon.



Figure II.14. Brukers D8 Advance.

II.4. Conclusion

Généralement, on peut conclure que les différentes analyses physiques et chimiques menées sur les matériaux premiers nécessaires pour la fabrication des composites étudiés, montrent qu'il n'y a aucun risque qui peut affecter les propriétés des composites.

En deuxième partie de ce chapitre, les techniques expérimentales qui ont été utilisées pour la détermination des différents paramètres étudiés ont été présentées.

CHAPITRE III :

Résultats et discussions

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est alors d'améliorer les propriétés étudiées par l'incorporation des différents pourcentages des fibres de verre dans la composition de béton de sable. Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu les résultats expérimentaux, de la formulation d'un béton de sable avec et sans fibre de verre. En deuxième lieu, nous présentons les principales caractéristiques physico-mécaniques des compositions étudiées.

III.2. Formulation des bétons de sable

III.2.1. Méthode expérimentale de formulation

III.2.1.1. Détermination d'une formule de base (sans fines d'addition)

Elle consiste en la mise au point d'une formule sans fines non optimisée sur la base d'un dosage en ciment prédéterminé et d'une maniabilité en rapport avec la mise en œuvre, où le dosage en adjuvant sera très élevé. Cette phase est effectuée par approximations successives de façon à obtenir une masse volumique apparente théorique proche de la masse volumique réelle. Il est nécessaire donc de réaliser plusieurs gâchées.

- *Dosage en ciment*

Nous avons choisi de travailler avec un dosage de $M_c = 400 \text{ kg/m}^3$.

- *Dosage en eau*

Le béton étant destiné à la projection, on prendra $E/C = 0,625$; ce qui donne un dosage en eau de $M_{eau} = 250 \text{ l/m}^3$.

- *Dosage en adjuvant*

Puisque le module de finesse est faible c.-à-d., le sable est à majorité de grains fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau, mais si le dosage en eau est élevé, nous obtenons une faible résistance. Pour cela, nous choisissons un pourcentage élevé d'adjuvant. La plage fixée par le producteur se situe entre 0,6% à 2,5% du poids de ciment, nous prendrons 2% soit $M_{adj} = 8 \text{ kg/m}^3$.

- *Détermination du dosage en sable*

Après avoir déterminé les valeurs du ciment, de l'eau, de l'adjuvant et d'air, le volume du sable s'obtient en complétant la formule d'un mètre cube (I.13.) :

$$[\text{Ciment}] + [\text{eau}] + [\text{adj}] + [\text{air}] + [\text{sable}] = 1 \text{ m}^3$$

On a : $V_c = 0,129 \text{ m}^3$;

$V_{\text{eau}} = 0,25 \text{ m}^3$;

$V_{\text{adj}} = 0,008 \text{ m}^3$;

$V_{\text{air}} = 0,06 \text{ m}^3$.

Donc : $M_s = (1 - (0,129 + 0,25 + 0,008 + 0,06)) \times 2690$

$M_s = 1487,57 \text{ kg/m}^3$

La première formule est définie comme suite :

Ciment = 400 kg/m^3

Fines = 0 kg/m^3

Eau = 250 l/m^3

Sable = $1487,57 \text{ kg/m}^3$

Adjuvant = 8 kg/m^3

Cette formule est caractérisée par une :

- MVAT (masse volumique apparente théorique) = $2145,57 \text{ kg/m}^3$
- MVAR (masse volumique apparente réelle) = $2217,80 \text{ kg/m}^3$
- Affaissement = $7,5 \text{ cm}$

La maniabilité est bonne et le dosage en eau ne change pas ($V=0$). La correction du dosage en sable se fait à l'aide de la formule (I.14.) :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm V \times MV_{\text{sable}}$$

Les résultats obtenus jusqu'à l'égalité de la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle sont montrés dans le **Tableau III.1**.

Tableau III.1. Composition et caractérisation de la formulation de base.

Essai	Dosage des éléments (kg/m³)				Affaissement (cm)	MVAT (kg/m³)	MVAR (kg/m³)
	Ciment	Eau	Adjuvant	Sable			
01	400	250	8	1487,57	7,5	2145,57	2217,80
02				1559,80	5,5	2217,80	2209,09
03				1551,09	6	2209,09	2209,87

Après trois essais de correction de sable on trouve l'égalité entre MVAT et MVAR et bonne maniabilité. La formulation finale de base est montrée par le **Tableau III.2**.

Tableau III.2. Composition et caractérisation finale de la formulation de base.

Dosage des éléments (kg/m ³)				Affaissement (cm)	MVAT (kg/m ³)	MVAR (kg/m ³)
Ciment	Eau	Adjuvant	Sable			
400	250	8	1551	6	2209.09	2209.87

➤ **Détermination du dosage en fines d'addition**

On réalise des gâchées de béton de sable avec six dosages en fines (Filler calcaire), et on garde le rapport E/C constant, on diminue le même volume de sable que le volume de filler introduit et on cherche d'obtenir une formule d'un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle du béton et un affaissement adéquat.

Il faut maintenant introduire dans la formule les fines d'addition (filler calcaire) 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 sept dosages en filler calcaire dans la plage d'emploi usuel de ce filler (0 à 300 kg/m³). L'incorporation de filler calcaire permet d'augmenter la compacité du béton, en optimisant l'arrangement granulaire. De plus, l'ajout de filler calcaire est effectué par substitution avec le sable.

Pour chaque gâchée, on détermine l'affaissement ainsi que la MVAR que l'on compare avec la MVAT de la formule.

Le **Tableau III.3.**, représente les valeurs des maniabilités et les masses volumiques apparentes réelles pour chaque dosage en filler calcaire, on trace les courbes correspondantes (**Figure III.1.**, et **Figure III.2.**).

Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule (**I.15.**), jusqu'à obtenir l'égalité entre les masses volumiques :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1})$$

Tableau III.3. Composition et caractérisation de la formulation en Filler calcaire.

Dosage des éléments (kg/m ³)					Affaissement (cm)	MVAR (kg/m ³)
Ciment	Eau	Adjuvant	Filler	Sable		
400	250	8	0	1551	6	2209,87
			50	1497,63	15	2248,27
			100	1444,25	22	2283,54
			150	1390,88	24	2258,46
			200	1337,51	18,5	2270,21
			250	1284,13	13	2292,69
			300	1230,76	4	2258,19

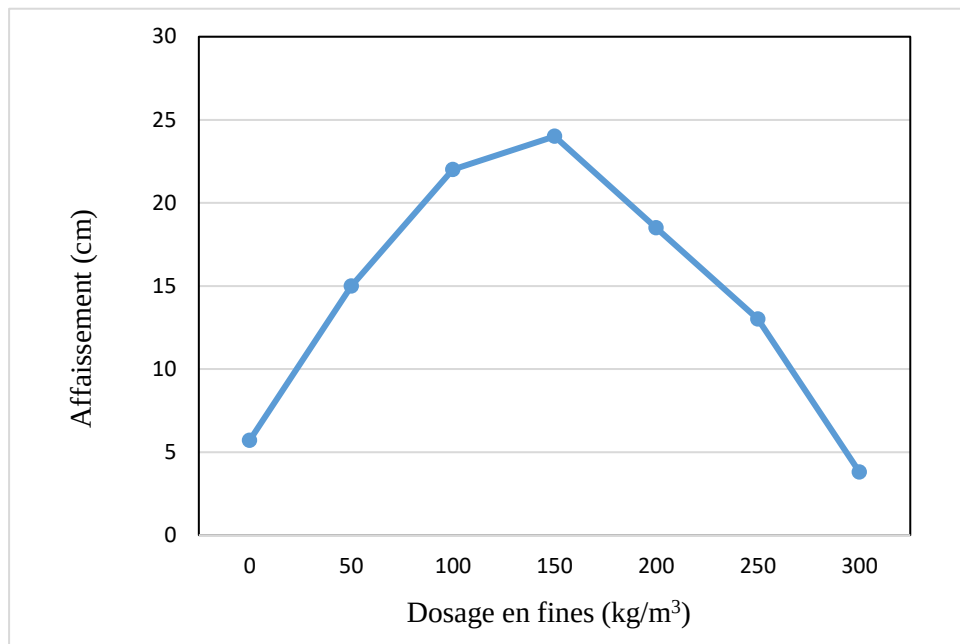


Figure III.1. Affaissement en fonction du dosage en fines.

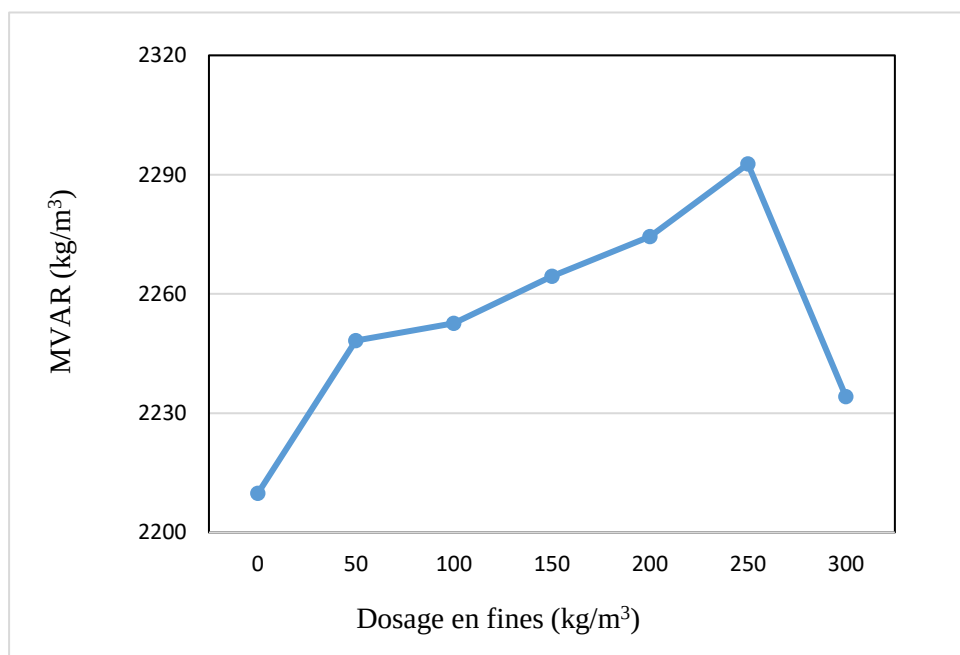


Figure III.2. Masse volumique apparente réelle en fonction du dosage en fines.

D'après la **figure III.1.**, ci-dessus nous remarquons que la maniabilité du béton de sable dépend du dosage en filler. La maniabilité augmente avec l'augmentation du dosage en filler au début, mais à partir d'un certain optimum (50 jusqu'à 150 kg/m³), ceci est du peut-être au fait qu'avant de combler complètement les vides, les grains de sable trouvent une facilité à circuler. Par contre une fois les vides sont totalement comblés, l'augmentation du dosage en filler leur difficulté le mouvement, c.-à-d., la maniabilité est diminuée.

La **Figure III.2.**, traduisant l'évolution de la masse volumique apparente réelle en fonction du dosage en filler calcaire met en évidence l'optimisation de l'arrangement granulaire par ajout

de filler. L'optimum de la teneur en filler calcaire est de 250 kg/m³ correspondant à la formule suivante :

Ciment = 400 kg/m³

Filler calcaire = 250 kg/m³

Eau = 250 l/m³

Sable = 1284,13 kg/m³

Adjuvant = 8 kg/m³

Cette formule est caractérisée par une :

- MVAT (masse volumique apparente théorique) = 2192,13 kg/m³
- MVAR (masse volumique apparente réelle) = 2292,69 kg/m³
- Affaissement = 13 cm

Puisque la MVAT n'est pas égale à la MVAR, on passe la correction de sable, le **Tableau III.4.**, montre les étapes de la correction de sable par la formule (I.15.) pour d'obtenir l'égalité entre MVAT et MVAR.

Tableau III.4. Correction de sable de la formulation en Filler.

	Dosage des éléments (kg/m ³)					Affaissement (cm)	MVAT (kg/m ³)	MVAR (kg/m ³)
Essai	Ciment	Eau	Adjuvant	Filler	Sable			
01	400	250	8	250	1284,13	13	2192,13	2292,69
02					1384,69	5	2292,69	2277,89
03					1369,89	6	2277,89	2277,07

D'après le tableau ci-dessus, la formule finale est définie comme suite :

Ciment = 400 kg/m³

Sable = 1370 kg/m³

Filler calcaire = 250 kg/m³

Eau = 250 l/m³

Adjuvant = 8 kg/m³

Caractérisée par un affaissement de 6 cm, une MVAT de **2277,89** kg/m³ et une MVAR de **2277,07** kg/m³.

➤ *Ajustement de la formule optimisée*

La maniabilité étant légèrement faible (l'affaissement est proche de la classe ferme), pour cela

on procède à un ajustement par l'ajout de dosage en eau (5 litres) ; on obtient la formule :

Ciment = 400 kg/m³

Sable = 1370 kg/m³

Filler calcaire = 250 kg/m³

Eau = 255 l/m³

Adjuvant = 8 kg/m³

Caractérisée par un affaissement de 7 cm, une MVAT de 2283 kg/m³ et une MVAR de 2283,11 kg/m³.

➤ **Détermination d'une formule de béton de sable à base de fibre de verre**

Différentes études ont montré l'effet des propriétés physiques des fibres sur le comportement des bétons, soit la longueur, l'épaisseur, la nature, etc. D'autre part, il faut aussi veiller à ce que la quantité de fibre de verre choisie soit significative vis-à-vis des résultats de maniabilité. Après des séries de test de la maniabilité du béton de sable avec différents dosages des fibres : 0,5% ; 1% et 2%, on trouve un béton très compact avec des consistances respectivement sont égales 5.5 cm, 4cm et 3.5 cm. C'est pour cette raison que le choix de la quantité de fibre dans notre étude n'a pas été fait au hasard. Donc on a limité le dosage de la fibre de verre par 0.6%. Rappelons que l'ajout de fibre de verre est effectué par substitution avec le sable.

Les mélanges sont préparés avec des fractions volumiques de 0,15% jusqu'au 0,60% d'un pas de 0,15% de fibres de verre (par rapport au volume total du béton). Donc cinq types de bétons ont été choisis pour déterminer l'influence du taux de fibres de verre. Ces bétons sont désignés comme suit:

- Béton de sable sans fibre de verre (**BSF**) ;
- Béton de sable avec 0.15% de fibre de verre (**BF1**) ;
- Béton de sable avec 0.30% de fibre de verre (**BF2**) ;
- Béton de sable avec 0.45% de fibre de verre (**BF3**) ;
- Béton de sable avec 0.60% de fibre de verre (**BF4**).

Le **Tableau III.5.**, donne les différentes valeurs des matériaux utilisés pour l'élaboration des bétons étudiés.

Tableau III.5. Compositions des bétons étudiés.

Matériaux	Filler calcaire (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Eau de gâchage (l/m ³)	Super-plastifiant * (%)	Fibre de verre (%)	Sable (SAD) (kg/m ³)
BSF	250	400	255	2	0	1370
BF1	250	400	255	2	0.15	1368
BF2	250	400	255	2	0.3	1367
BF3	250	400	255	2	0.45	1365
BF4	250	400	255	2	0.6	1364

* Le pourcentage du super-plastifiant est calculé, en masse, par rapport à la masse de ciment.

III.3. Caractérisation des bétons de sable à base des fibres de verre

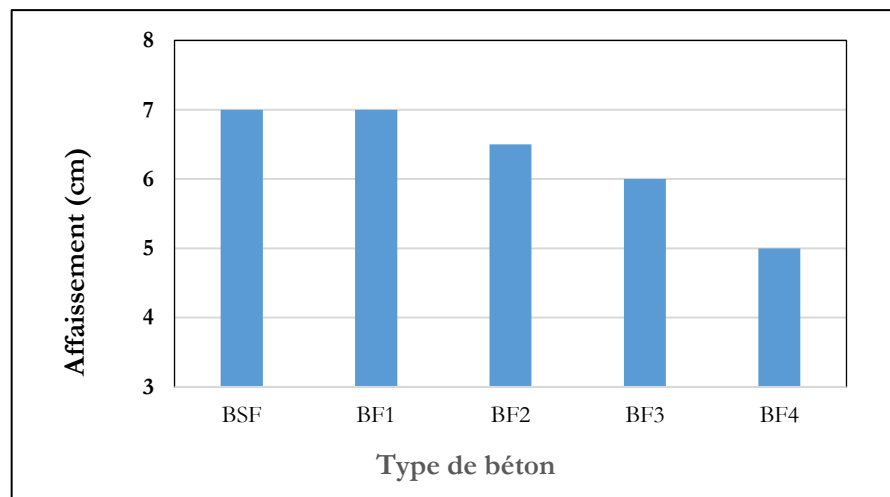
III.3.1. Caractérisation du béton frais

III.3.1.1. Etude de la maniabilité

Les résultats obtenus après l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, pour des différentes compositions, sont présentés par le **Tableau III.6.**, et la **Figure III.3.**

Tableau III.6. La maniabilité des compositions étudiées.

Type de béton	Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
BSF	7	Plastique
BF1	7	Plastique
BF2	6.5	Plastique
BF3	6	Plastique
BF4	5	Plastique

**Figure III.3.** La maniabilité des compositions étudiées.

D'après les résultats ci-dessus, on remarque que la maniabilité des différentes compositions étudiées est presque la même. La consistance est plastique pour tous les cas, ce qui montre que pratiquement les différents pourcentages des fibres de verre ne présentent pas un effet remarquable sur la maniabilité du béton de sable en comparaison avec le cas sans traitement. Généralement l'affaissement est diminué pour l'augmentation de fibre de verre.

III.3.2. Caractérisation du béton durci

III.3.2.1. Masse volumique

Les résultats de la masse volumique des différents types de bétons étudiés à 28 jours sont présentés dans le **Tableau III.7.**, et la **Figure III.4.**

Tableau III.7. Influence des fibres sur la masse volumique à 28 jours.

Type de béton	La masse volumique à 28 jours (kg/m ³)
BSF	2125,47
BF1	2112,78
BF2	2101,56
BF3	2093,75
BF4	2078,13

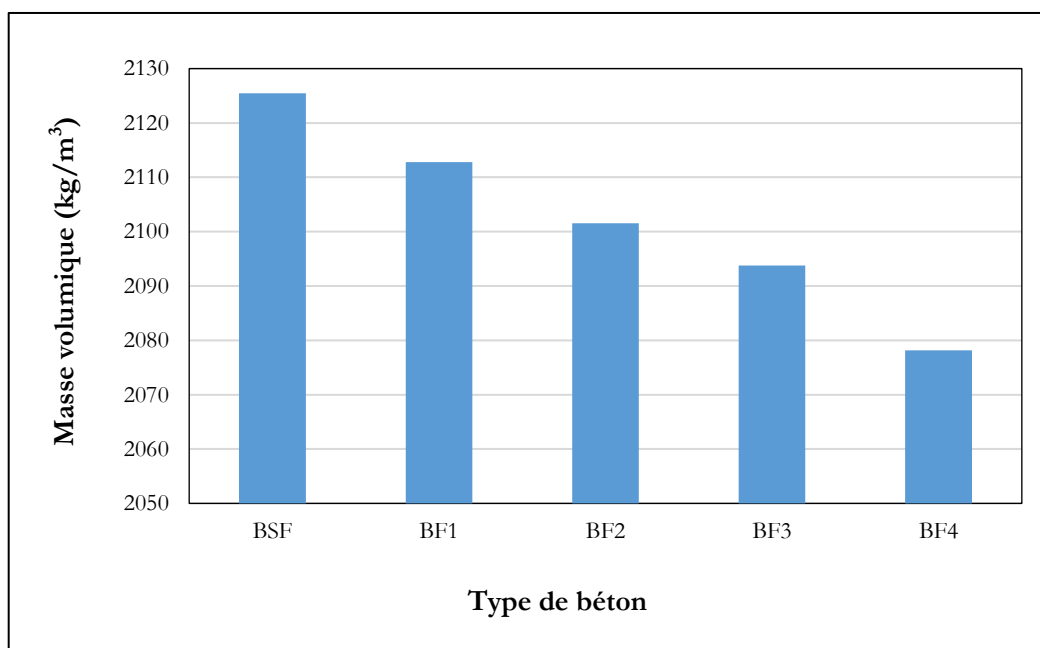


Figure III.4. Influence des fibres sur la masse volumique à 28 jours.

Il est clair que la masse volumique du béton a diminué si le pourcentage de fibre augmente par rapport au cas de béton sans fibre BSF. Les taux de diminution enregistrés varient de 0,60% (BF1) à 2,23% (BF4).

La principale raison de diminution des masses volumiques des bétons confectionnés avec des fibres de verre est bien la densité et la nature des fibres utilisées.

Selon la norme **NF EN 206-1**, la masse volumique de béton léger est supérieure ou égale à 800 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2000 kg/m³. Dans notre cas, nous constatons que la masse volumique du béton de sable est proche de la gamme des bétons légers.

III.3.2.2. Absorption d'eau par immersion

Nous sommes intéressés par cette caractéristique afin de connaître le comportement des bétons renforcés par des fibres de verre en présence d'eau. En effet il est très important de quantifier la présence des vides dans le béton.

Les valeurs de coefficient d'absorption d'eau par immersion à 28 jours des différents types de bétons étudiés sont rapportées dans le **Tableau III.8.**, et illustrés par la **Figure III.5.**

Tableau III.8. Absorption d'eau par immersion à 28 jours.

Compositions	BSF	BF1	BF2	BF3	BF4
A_b (%)	9.30	9.02	8.74	8.44	8.19

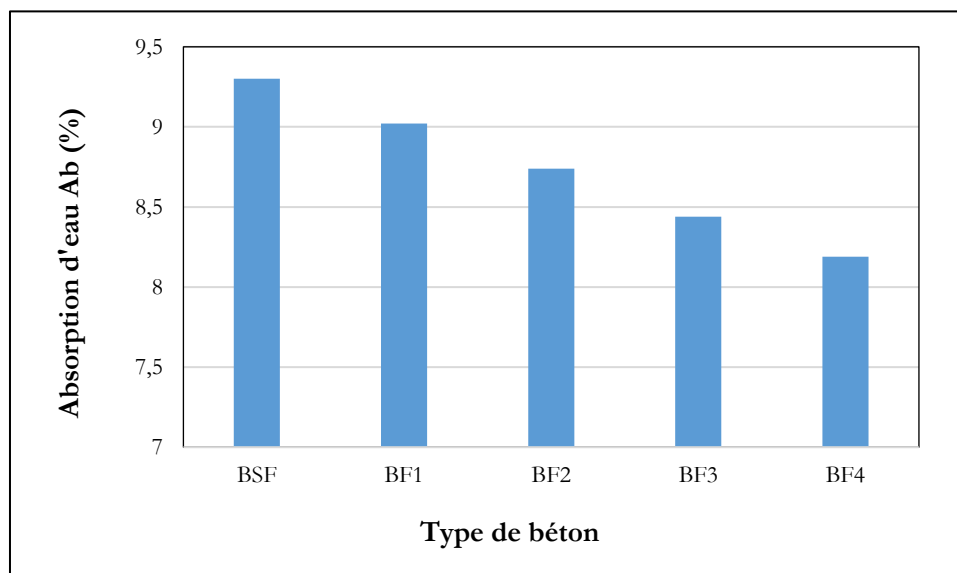


Figure III.5. Absorption d'eau par immersion à 28 jours.

D'après les résultats obtenus, on constate que l'introduction des fibres dans les bétons influe sur la porosité du béton. Il est nettement qu'une diminution de la porosité pour les toutes compositions à base de fibre de verre par rapport à la composition sans fibre. Cette réduction peut être expliquée par la diminution des vides entre la pâte de ciment et les granulats en raison de l'effet de fibre.

III.3.2.3. Relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau

L'étude de la relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion a montré l'existence d'une relation suivante une tendance linéaire négative avec un coefficient de corrélation $R = 0,999$, comme le montre la **Figure III.6**. D'après cette relation, on peut dire que la relation possède une manière directe : l'augmentation d'absorption d'eau dans le composite augmente sa masse volumique.

Cette diminution d'absorption d'eau est compensée par une diminution de la porosité des structures des composites, c.-à-d., on obtient une structure plus compacte est plus dense.

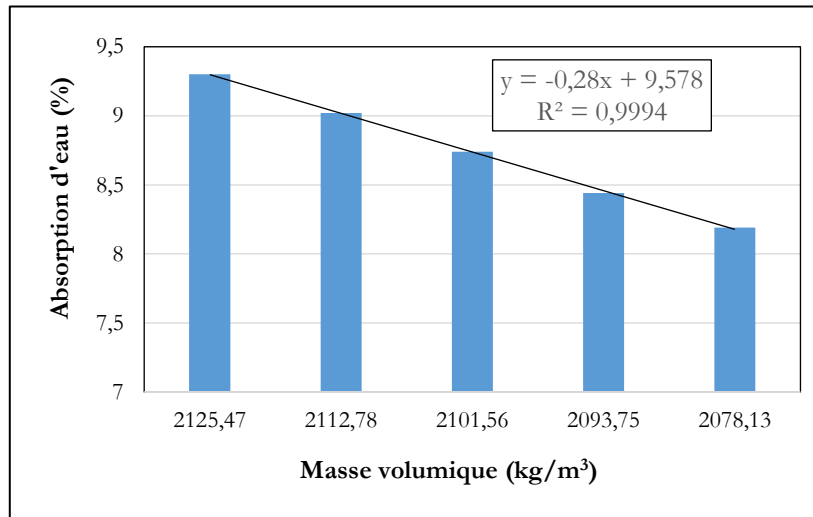


Figure III.6. La relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion.

III.3.2.4. Etude des propriétés mécaniques

III.3.2.4.1. Résistance à la flexion

Le **Tableau III.9.**, et la **Figure III.7.**, présentent les valeurs de la résistance aux flexions mesurées à 7, 14, 21 et 28 jours des différents types de bétons étudiés.

Tableau III.9. Influence des fibres sur la résistance à la flexion.

Résistance à la flexion en (MPa)				
Compositions	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
BSF	3.24	3.37	3.74	4.78
BF1	3.60	3.74	4.02	5.08
BF2	3.65	3.85	4.14	5.18
BF3	3.72	3.99	4.24	5.73
BF4	3.74	4.06	5.13	6.08

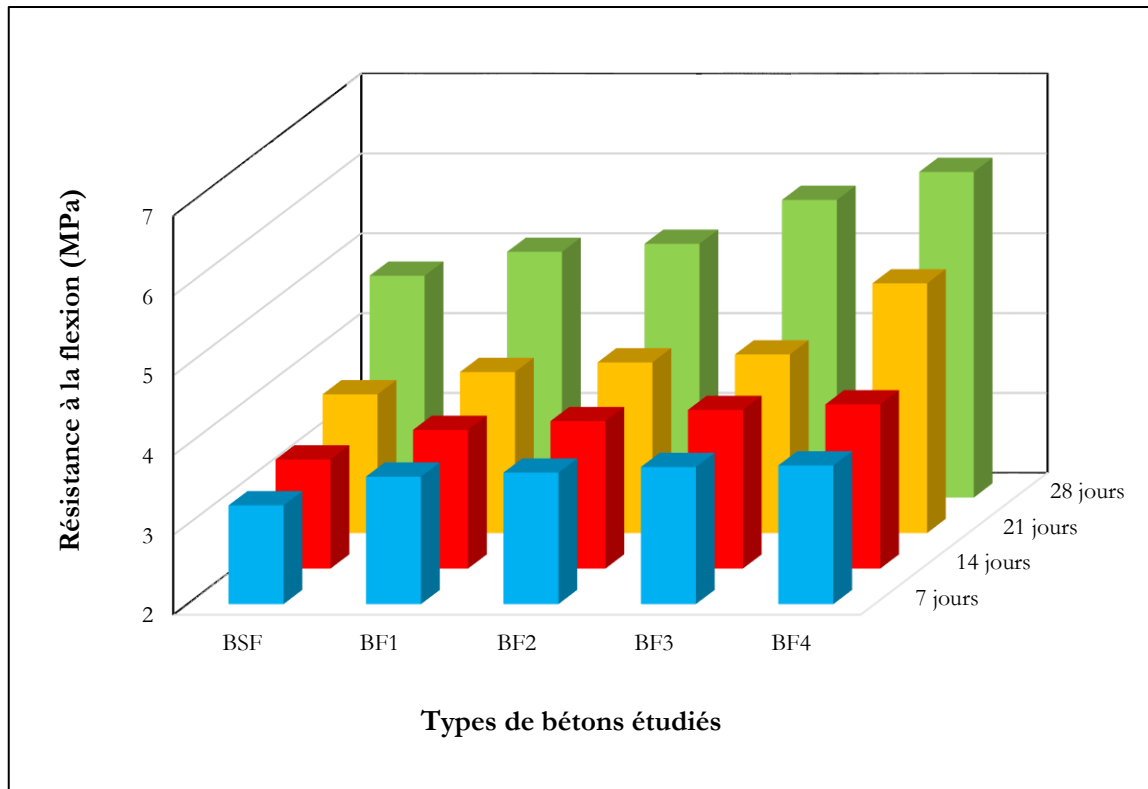


Figure III.7. Influence des fibres sur la résistance à la flexion.

D'après les résultats, on constate que l'ajout des fibres de verre dans le béton de sable a amélioré la résistance à la flexion par rapport au béton de référence (BSF), où les pourcentages d'augmentation enregistrés varient de 6,28% à 27,20% (cas de 28 jours). Il apparaît clairement que le (BF4) a donné le meilleur résultat comparé aux autres compositions.

III.3.2.4.2. Résistance à la compression

Les valeurs de la résistance à la compression mesurées à 7, 14, 21 et 28 jours des différents types de bétons étudiés sont présentées dans le **Tableau III.10.**, et la **Figure III.8.**

Tableau III.10. Influence des fibres sur la résistance à la compression.

Résistance à la compression en (MPa)				
Compositions	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
BSF	13.53	13.72	14.14	15.07
BF1	14.18	14.49	14.91	16.05
BF2	14.68	14.70	15.06	16.23
BF3	15.25	15.31	15.74	16.80
BF4	16.39	16.48	17.02	18.13

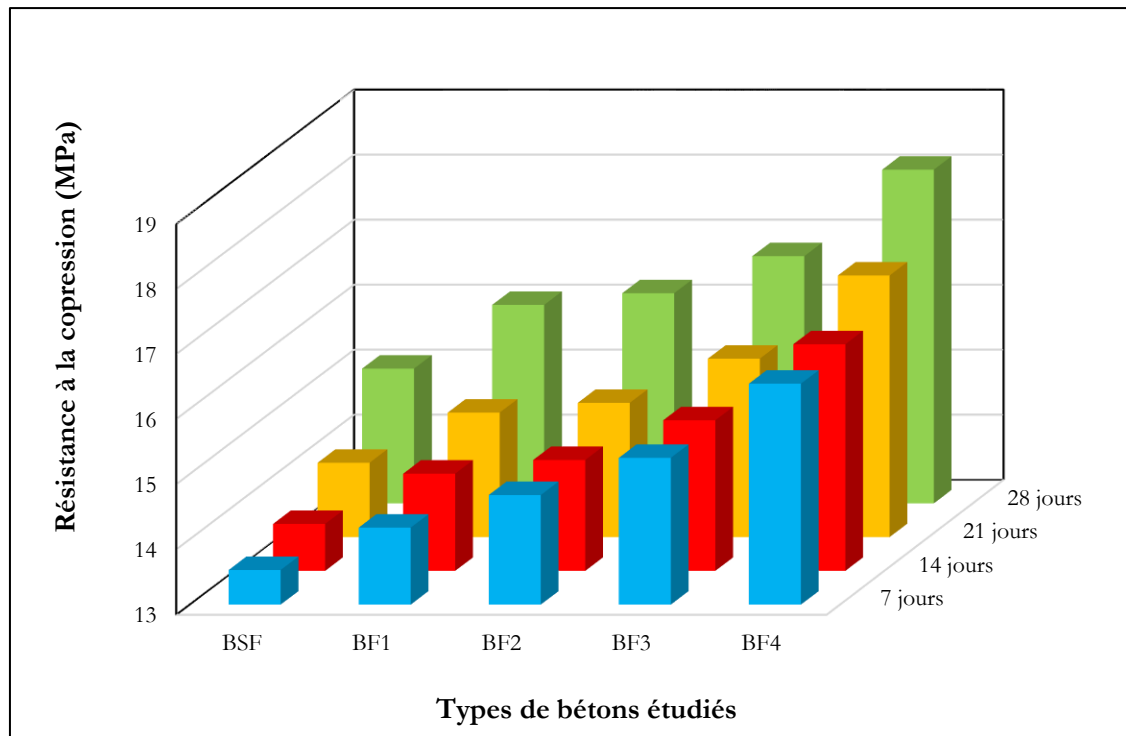


Figure III.8. Influence des fibres sur la résistance à la compression.

D'après ces résultats, on constate que les valeurs de la résistance à la compression à 28 jours de toutes les compositions sont comprises entre 15,07 et 18,13 MPa.

Par rapport au béton de référence (BSF), on remarque aussi que tous les pourcentages des fibres de verre utilisés ont conduit à une augmentation des valeurs de la résistance à la compression des composites étudiés. Selon le pourcentage de fibre, ces augmentations varient entre 6,50% et 20,30%.

En comparant les différents pourcentages des fibres employées, il semble que le BF4 a donné la résistance à la compression la plus élevée ; soit une amélioration d'environ 20,30% par rapport au béton de référence BSF.

En général, les bons résultats obtenus dans la résistance à la compression grâce aux différents pourcentages de fibres sont dus à la bonne adhérence entre les composites " fibre - matrice ".

III.3.3. Effet de fibre de verre sur la ductilité et la ténacité

La fibre de verre a un effet positif sur l'amélioration de la ductilité et la ténacité du béton de sable, que ce soit pour le béton BSF1, BSF2, BSF3 et BSF4. La contrainte maximale en flexion est atteinte, ce qui implique l'apparition visible des fissures mais l'éprouvette garde sa forme initiale comme montrer dans la **Figure III.9. (a, b)**. Les deux prismes restent attachés par les fibres de verre. Ceci s'explique par l'effet de la résistance à la traction de la fibre de verre qui est importante.

A noter aussi l'effet avantageux des fibres de verre pour la résistance à la compression. Alors que la résistance maximale à la compression est atteinte l'éprouvette garde sa forme initiale avec l'apparition de quelques fissures, comme le montre la **Figure III.9. (c, d)**.

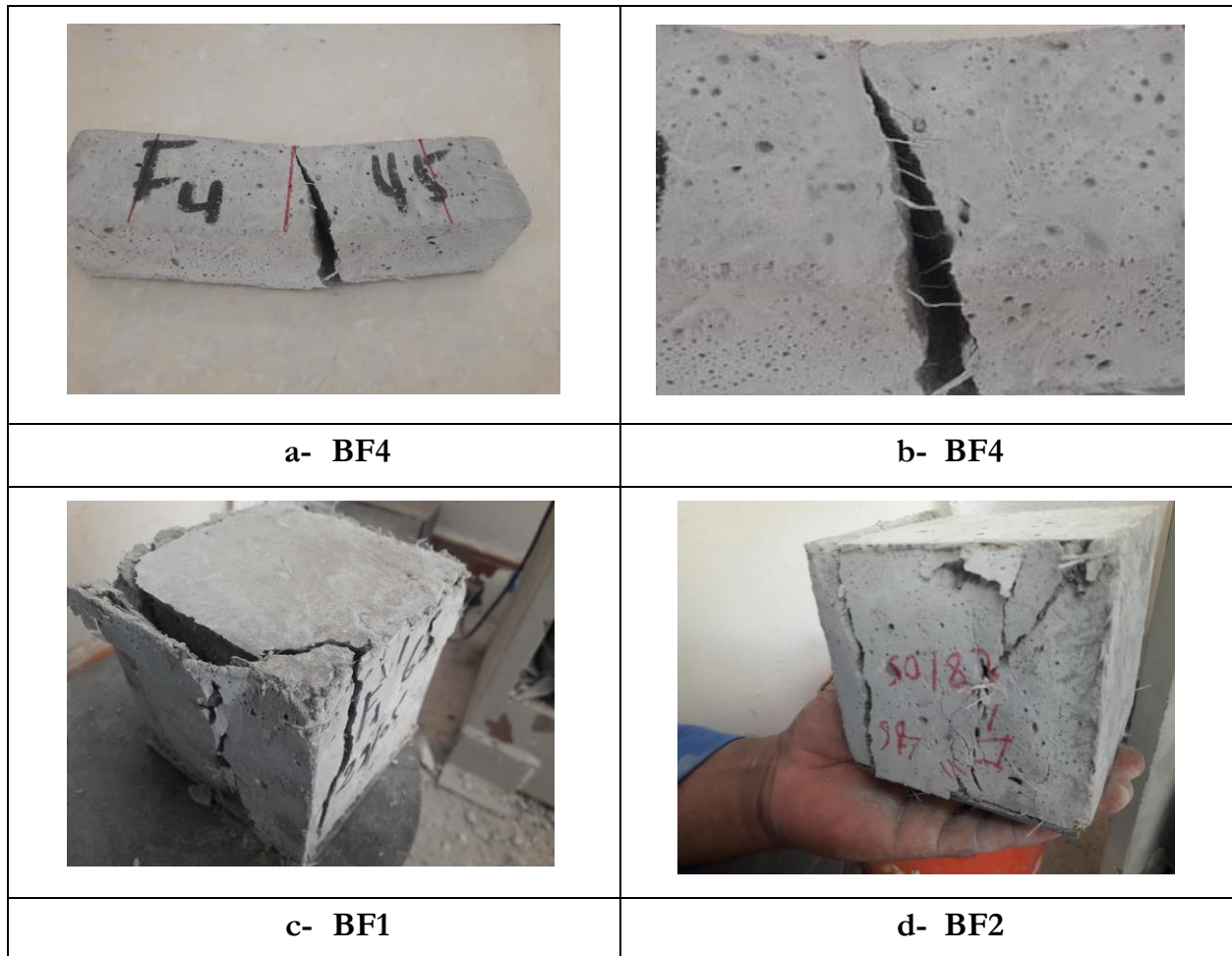


Figure III.9. Fissuration de l'éprouvette après l'essai de flexion et compression.

III.3.4. Analyse par diffraction de rayons X

Les analyses par diffraction de rayons X (DRX) ont été effectuées sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm des bétons étudiés. On obtient les mêmes courbes dans toutes les composites étudiés, c'est pour ça on prend une seule courbe (**Figure III.10.**)

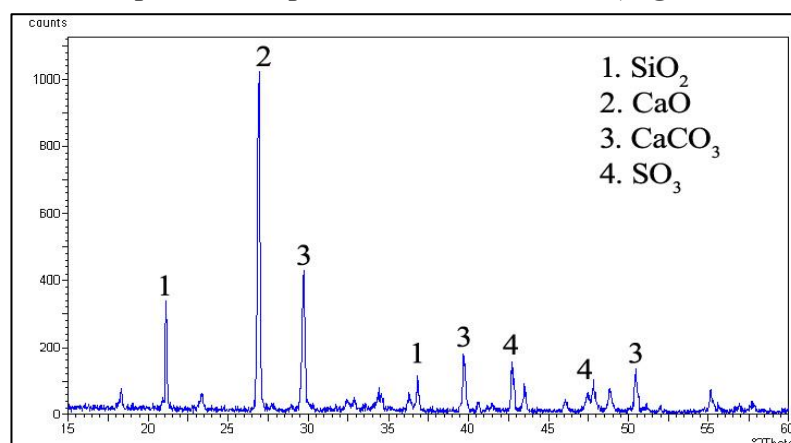


Figure III.10. Diffractogramme du béton de sable.

D'après la figure ci-dessus on remarque que les résultats obtenus sont confirmés avec les analyses chimiques des matériaux utilisées :

- L'augmentation de l'intensité du pic d'oxyde de calcium (CaO) d'environ 1020, ceci pourra s'expliquer par la présence de CaO en riche dans le ciment.
- L'augmentation de l'intensité du pic de carbonate de calcium (CaCO_3), puisque le filler calcaire contient un pourcentage élevé de CaCO_3 [32].
- Plusieurs recherches montrent que la nature des sables, soit sable de dune ou sable alluvionnaire sont essentiellement de nature siliceuse ; ce qui montre la présence de silice (SiO_2).

III.4. Conclusion

A la lumière des résultats obtenus pour les essais réalisés dans le cadre de cette recherche, nous pouvons conclure :

- ❖ L'étude de maniabilité du béton renforcé par les fibres de verre, a montré que celle-ci diminue lorsque le dosage de fibres augmente.
- ❖ L'ajout des fibres de verre induit une diminution de masse volumique des bétons par rapport à celle du béton sans fibres.
- ❖ Les propriétés mécaniques étudiées montrent que l'ajout des fibres de verre ont donné des résultats acceptables par rapport au béton de référence.
- ❖ L'absorption d'eau par immersion diminue en fonction de l'augmentation du dosage de fibres de verre ; ce qui donne une réduction de porosité.

Généralement, les pourcentages des fibres de verre utilisées ont donné une amélioration positive sur toutes les caractéristiques étudiées, à l'exception de la masse volumique où les résultats étaient proches de domaine du béton léger. Peut-être, un plus grand pourcentage de fibres pourrait donner une amélioration meilleure.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail étudié l'exploitation des matériaux locaux et la réutilisation des déchets. Il a pour objectif la recherche d'un béton de sable capable de supporter les charges d'une structure. Les matériaux étudiés sont des matériaux locaux, de déchet et de matériau artificiel. Les premiers comprennent le sable de dune, le sable alluvionnaire et le déchet est de filler calcaire, tandis que le matériau artificiel est le ciment.

Cette étude a été effectuée en trois chapitres, une étude bibliographique, une caractérisation des matériaux utilisés et les essais nécessaires et à la fin une analyse et discussion des résultats trouvés. L'étude bibliographique a montré que le béton de sable utilisé dans plusieurs domaines de construction, en raison d'élévation du coût des matériaux traditionnels, raréfaction des gros granulats, la facilité d'utilisation du béton de sable, ainsi que la tendance à l'exploitation des matériaux locaux.

Les fibres sont connues pour leur comportement positif plus particulièrement pour stopper la propagation des fissures au sein du béton. Cependant, les caractéristiques physico-mécaniques des fibres jouent un rôle plus particulièrement dans le choix des dimensions et du dosage des fibres.

Plusieurs compositions de béton ont été mises au point afin de mieux comprendre le comportement de ce dernier vis-à-vis de l'effet des fibres de verre sur les caractéristiques physiques et mécaniques. En effet ; si l'ajout des fibres bien choisies permet le plus souvent d'améliorer les caractéristiques et les propriétés des mélanges.

Dans le premier lieu d'étude expérimentale, on présente une série d'essais expérimentaux effectués sur la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de notre béton de sable. Vu les résultats obtenus, ces matériaux répondent aux exigences d'utilisation dans la recherche de propriétés rhéologiques et mécaniques du béton de sable acceptable.

Le deuxième lieu d'étude expérimentale est consacré sur la conception des formulations du béton de sable à base de fibre de verre. A la fin de partie expérimentale, on présente une série d'essais expérimentaux effectués sur le béton à l'état frais et à l'état durci. A partir de l'étude de l'influence de fibre de verre sur diverses caractéristiques du béton de sable étudiés, on a pu conclure les points suivants :

- L'étude de maniabilité des bétons étudiés a montré que celle-ci diminue lorsque le pourcentage en fibres augmente avec le rapport (E/C) est fixe ;
- L'ajout des fibres de verre au béton de sable a donné une faiblesse de masse volumique. Plus le pourcentage des fibres de verre augmente, plus la masse

volumique du composite diminue. Les valeurs des masses volumiques sont proches de la gamme des bétons légers ;

- L'absorption d'eau par immersion est diminuée nettement avec l'augmentation du dosage de fibres de verre. De plus, l'introduction de fibres dans le béton se traduit par une diminution plus ou moins prononcée du volume des vides, ce qui conduit à une augmentation de la compacité du matériau ;
- Les propriétés mécaniques du composite ont montré que l'introduction des fibres de verre ont donné une amélioration remarquable par rapport au béton confectionné sans fibre de verre. Le dosage de 0.60% de fibre a donné le meilleur résultat dans la résistance à la compression et la résistance à la flexion. De plus, la paille d'orge a un effet positif sur l'amélioration de la ductilité et la ténacité du béton de sable.

Généralement les résultats trouvés sont très encourageants et ouvrent des perspectives de recherches d'utilisation de fibre de verre sur d'autres bétons.

À la fin de cette étude, on peut dire qu'il y a des possibilités pouvant améliorer davantage les propriétés du béton de sable à base de fibre de verre, à savoir :

- L'augmentation de la quantité de fibre de verre afin d'obtenir la dose optimale de fibre ;
- L'ajout d'autres fibres à la fibre de verre ;
- Utilisation des traitements sur la fibre de verre.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFNOR : " Bétons- Bétons de sable ". Projet P 18-500.
- [2] BENAÏSSA, A. (1992) : « Déformations différées d'un béton de sable » – Thèse de doctorat, Université de bordeaux ; Laboratoire régional des ponts et chaussées.
- [3] Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1994) : " Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation ". Projet « SABLOCRETE ».
- [4] D. Achoura (2005) : " Contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitiers de hauts fourneaux d'EL-HADJAR ". Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie.
- [5] M. Bederina (2007) : " Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois ". Thèse de doctorat, UAT de Laghouat, Algérie.
- [6] Benaïssa, A., Morlier, P., Tram V., (1992) : Le béton de sable un matériau non fissurant. Algérie équipement 06, 7-10.
- [7] Technologie du bâtiment - Gros œuvre : " Ouvrage en béton armé ". Les éditions des Foucher.
- [8] LÖFGREN I., (2005) : Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden.
- [9] de Larrard, F., (2002) : Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 192 p.
- [10] Müller, H.S., Haist, M., (2009) : Concrete. In: Structural concrete Textbook on behaviour, design and performance, Volume 1, fib Bulletin 51, pp. 95-149.
- [11] GLUAIS G, BRU J P., (1993) : Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable, Bulletin de liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, N° 183-NIT 3697, Paris, pp91-95.
- [12] SABLOCRETE, (1994) : Béton de sable, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- [13] GHRIEB.A, (2003) : Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques. Thèse de magister, ENP.
- [14] DREUX G. et FESTA J.(1998) : Nouveau guide du Béton et de ses constituants. Eyrolles Huitième édition, Paris.

- [15] G. Chauvillard, O. Bassuyaux (1996) : Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance Fixées. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N° 205.
- [16] CIM Béton, (2013) : Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France.
- [17] Venuat, A., (1983). Des fibres pour alléger et renforcer le béton. Cahier techniques du bâtiment 58, 59-70.
- [18] Vieira, M., (2015) : Concrete, in: Gonçalves, M.C., Margarido, F. (Eds.), Materials for Construction and Civil Engineering. Springer, Switzerland, pp. 185-236.
- [19] Beaudoin, J.J., (1982) : Béton renforcé de fibres. Institut de recherche en construction (IRC). Conseil National de Recherche. Canada, p04.
- [20] EL HILALI Abdellah., (2009) : Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (bap): influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de doctorat, Université Cergy Pontoise, France .
- [21] MASMOUDI Mounira., (2008) : Amélioration des caractéristiques mécaniques du béton et du mortier par renforcement en fibres d'acier. Mémoire de magister, université de Biskra, Algérie.
- [22] BENTALHA M, (2007) : Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, Caractérisation - comportement monotone microstructure. Thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie.
- [23] <http://www.lafarge-france.fr/LB-Fibres-Metalliques.PDF> (consulté le 12/04/2011)
- [24] FRITIH Youcef., (2009) : Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- [25] EDINGTON J, HANNANT D J WILLIAM R I T., (1986) : Steel fibers reinforced concrete, G. B. Building.
- [26] GUILLAUME Camps., (2008) : Etude des interactions chemo - mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [27] TAYLOR M, LYDON F D, BARR B I G., (1997) : Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete. Cement and Concrete Composites, vol 19, pp329340.
- [28] M. Bederina, M.M. Khenfer, R.M. Dheilly, M. Quéneudec (2005) : Reuse of local sand : effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes . Cement and Concrete Research, N° 35, pp. 1172-1179.
- [29] Notice Technique (2008) : MEDAPLAST-SP40. Granitex, pp. 93.
- [30] J.J. Chauvin, G. Grimaldi (Sep. 1988) : Les bétons de sable. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°157, pp. 9-15.

- [31]** R. Dupain, R. Lanchan, J.C. Saint-Arroman (1995) : Granulats, sols, ciment et bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par mes essais de laboratoire. Edition Casteilla.
- [32]** Belhadj, B., Bederina, M., Montrelay, N., Houessou, J., & Quéneudec, M. (2014) : Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete. Construction and Building Materials, 66, 247-258.

ANNEXE



a



b

Photo N° 01. Essai d'analyse Granulométrique



c



D

Photo N° 02. Essai d'équivalent de sable

A. PARAMETRES ORGANOLOPTIQUES				D. MINERALISATION GLOBALE			
A01	Couleur		Unité	D01	Calcium Ca ⁺⁺	252.50	mg/l
A02	Odeur		Unité	D02	Magnésium Mg ⁺⁺	68.05	mg/l
A03	Goût		Dilut	D03	Sodium Na ⁺		mg/l
B. PARAMETRES PHSICO-CHIMIQUES				D04	Potassium K ⁺		mg/l
B01	pH	7.41		D05	Chlorures Cl ⁻	797.692	mg/l
B02	Potentiel redox Eh	-	mV	D06	Sulfate So ₄ ⁻		mg/l
B03	Conductivité à 25°C	2800	μs/cm	D07	Bicarbonate HCo ₃ ⁻	140.300	mg/l
B04	Température	11	°C	D08	Carbonate Co ₃ ⁺⁺	-	mg/l
B05	Turbidité	15.6	NTU	D09	Silicate SiO ₂		mg/l
B06	Oxygène dissous		mg/l	D10	Dureté Totale TH	910	mg/l CaCO ₃
B07	Salinité	1.5	‰	D11	Dureté permanente		mg/l CaCO ₃
B08	Co ₂ libre		mg/l	D12	Titre alcalin	-	mg/l CaCO ₃
B09	Co ₂ total		mg/l	D13	Titre alcalin complet	115	mg/l CaCO ₃
B10	Résidu sec à 105°C	2000	mg/l	E. PARAMETRES INDESIRABLES			
B11	Résidu sec à 525°C		mg/l	E01	Fer totale		mg/l
B12	MES à 105°C		mg/l	E02	Fer Fe ²⁺	-	mg/l
B13	MES à 105°C		mg/l	E03	Fer Fe ³⁺		mg/l
B14	Mat Décantages		mg/l	E04	Manganèse Mn ²⁺		mg/l
B15	TDS	1429	mg/l	E05	Aluminium Al ³⁺		mg/l
C. PARAMETRES DE POLLUTION				F. PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES			
C01	Ammonium NH ₄ ⁺	-	mg/l	F01	Germes totaux		
C02	Nitrite No ₂ ⁻	0.102	mg/l		A 37°C	-	c/ml
C03	Nitrate No ₃ ⁻	2.306	mg/l		A 22°C		c/ml
C04	Phosphate Po ₄ ⁻	9.336	mg/l	F02	Coliformes totaux	-	c/100ml
C05	Sulfures d'hydrogène		mg/l	F03	Coliformes fécaux	-	c/100ml
C06	Mat .Oxyd . M acide		mg/l	F04	Streptocoques fécaux	-	c/100ml
C07	Mat.Oxyd M basique		mg/l	F05	Clostridium sulf-red	-	c/100ml
C08	DCO		mg/l O ₂	F06	Vibrions cholérique		c/5l
C09	DBO ₅		mg/l O ₂	F07	Salmonelle typhi		c/5l
C10	Azote Kjeldahl NTK		mg/l NH ₄	F08	Chlore résiduel libre		mg/l

Photo N° 03. Paramètres physico-chimiques des eaux des stations étudiées

NOTICE TECHNIQUE

2 1 3 6

MEDAPLAST SP 40Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1
et 3.2 NA 774**Superplastifiant - haut réducteur d'eau****DESCRIPTION**

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

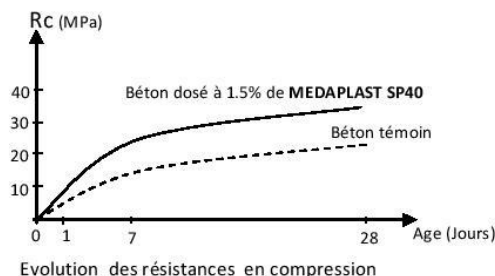
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 40%

**MODE D'EMPLOI**

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



199

Photo N° 04. Superplastifiant MEDAPLAST SP 40

	
e	F
	
g	H

Photo N° 05. Malaxage et conservation



Photo N° 06. Cône d'Abrams



Photo N° 07. Essai de flexion (3 points).



Photo N° 08. Essai de compression.