

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE 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

DE MASTER EN GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Présenté par :

AMRANI Yahia

MIM Anouer

TOBCHI Mohammed Bachir

THÈME

**EFFET DE POUDRE DE VERRE SUR LES PROPRIÉTÉS
PHYSICO- MÉCANIQUES DU BÉTON DE SABLE**

JURY :

Madame HACHEM Rafika	Président du jury	U. EL OUED
Monsieur BEDADI Laid	Examineur	U. EL OUED
Monsieur AMMARI M. Seghir	Rapporteur	U. EL OUED

----- Promotion : Septembre 2020 -----

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 **Dr. 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.

Nous sincères remerciements vont aux responsables des laboratoires des travaux publics ; Monsieur **RADHOUANE Abdelaziz**, Monsieur **MAHMOUDI El Bachir**, et Monsieur **SEDIRA Abdelhamid** et à tous les membres des laboratoires qui ont participé indirectement ou directement à ce flux de recherche et à son objectif.

Nous remercions également nos professeurs pour leur aide, leur soutien 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.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- *À deux personnes chères à mon cœur ;
mon père et ma mère.*
- *À mes chères sœurs et mes amis.*
- *Aux professeurs qui nous ont enseigné
à différentes étapes.*
- *À tous ceux que je n'ai pas mentionnés.*

AMRANI Yahia

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à celle qui s'est sacrifié pour mon bonheur et ma réussite, à ma femme.

- *À l'esprit de mon père, et de ma mère, qui ont été mon ombre durant toutes les années des études.*
- *À mes soeurs et mes frères.*
- *À mes très chers amis.*
- *À tous ceux que j'aime.*

Mohammed Bachir TOBCHI

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

*Pour leur patience, leur soutien et leurs
encouragements*

A mes frères

A mes amis et mes camarades

*Sous oublier tous les professeurs que ce soit du
primaire, du moyen, du secondaire ou de
l'enseignement supérieur.*

Anouer MIM

SOMMAIRE

Résumés.....	vi
Nomenclature	viii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux	xiii
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I: Recherche Bibliographique

I.1. Introduction	3
I.2. Béton de sable	3
I.2.1. Introduction.....	3
I.2.2. Historique	3
I.2.3. Définition	4
I.2.4. Constituants du béton de sable	5
I.2.4.1. Sables	5
I.2.4.2. Ciment	5
I.2.4.3. Eau de gâchage.....	5
I.2.4.4. Fines d'ajouts	5
I.2.4.5. Adjuvants	6
I.2.4.6. Autres ajouts.....	6
I.2.4.6.1. Fibres.....	6
I.2.4.6.2. Gravillons	6
I.2.4.6.3. Colorants	7
I.2.5. Propriétés essentielles du béton de sable.....	7
I.2.5.1. Compacité	7
I.2.5.1.1. Effet de la granulométrie du sable sur la compacité	7
I.2.5.1.2. Effet de l'addition des fines	8
I.2.5.2. Maniabilité	8
I.2.6. Comportements mécaniques	10

I.2.7. Durabilité.....	10
I.2.8. Domaines d'utilisation des bétons de sable	11
I.2.9. Formulation d'un béton de sable	11
I.2.9.1. Définition	11
I.2.9.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable.....	12
I.2.9.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable	12
I.2.9.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable	14
I.2.9.2.3. Dosage en sable.....	15
I.2.9.2.4. Estimation de la résistance en compression	16
I.2.9.3. Méthode expérimentale de formulation	17
I.2.9.3.1. Différentes étapes de la formulation	18
I.2.9.3.1.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition	18
a) Dosage en ciment	18
b) Dosage en eau	18
c) Détermination du dosage en sable.....	18
d) Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule	19
I.2.9.3.1.2. Détermination du dosage en fines d'addition.....	19
I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.....	20
I.4. Généralités sur les bétons à base de verre et poudre de verre	21
I.4.1. Verre.....	21
I.4.1.1. Bétons et mortiers à base des verres.....	22
I.4.1.2. Utilisations des verres dans les routes et les bâtiments.....	22
I.4.1.2.1. Routes.....	22
I.4.1.2.2. Bâtiments.....	22
I.4.1.3. Propriétés des verres	23
I.4.1.3.1. Propriétés mécaniques.....	23
I.4.1.3.2. Propriétés physiques.....	23
I.4.1.3.3. Propriétés thermiques.....	23
I.4.1.3.4. Propriétés chimiques	24
I.4.2. Poudre de verre.....	24
I.4.2.1. Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique	24
I.4.2.1.1. Réaction alcali-silice	24

❖ Mécanisme de la réaction.....	25
I.4.2.1.2. Réaction pouzzolanique du verre	26
I.4.2.2. Effet de la poudre de verre sur le comportement mécanique du béton	27
I.4.2.2.1. Résistance à la compression.....	27
I.4.3.2. Résistance à la flexion.....	28
I.5. CONCLUSION	29

CHAPITRE II: Caractérisation des Matériaux de Base et **Techniques Expérimentales**

II.1. Introduction.....	30
II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés.....	30
II.2.1. Sable.....	30
II.2.1.1. Analyse granulométrique	30
❖ Sable alluvionnaire.....	31
❖ Sable de dune	32
❖ Sable mélange	32
II.2.1.2. Caractéristiques physiques.....	34
II.2.1.2.1. Masses volumiques	34
➤ Masse volumique apparente	34
➤ Masse volumique absolue	35
II.2.1.2.2. Module de finesse	35
II.2.1.2.3. Equivalent de sable	36
II.2.1.2.4 Compacité et porosité	37
II.2.1.2.5. Indice des vides.....	37
II.2.1.3. Synthèse des résultats	37
II.2.2. Ciment.....	38
II.2.3. Filler calcaire	39
II.2.4. Eau de gâchage	40
II.2.5. Adjuvant.....	40
II.2.6. Poudre de verre	41
II.2.6.1. Caractéristiques chimiques et physiques	42

II.3. Techniques expérimentales	43
II.3.1. Malaxage et conservation	43
II.3.2. Caractérisation du béton frais	43
II.3.2.1. Maniabilité	43
II.3.2.2. Masse volumique apparente réelle.....	45
II.3.3. Caractérisation du béton durci	45
II.3.3.1. Masse volumique apparente.....	45
II.3.3.2. Essai de rupture par flexion	45
II.3.3.3. Essai de rupture par compression	47
II.3.3.4. Essai d'absorption d'eau par immersion totale.....	48
II.4. Conclusion	49

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

III.1. Introduction	50
III.2. Formulation des bétons de sable.....	50
III.2.1. Méthode expérimentale de formulation.....	50
III.2.1.1. Détermination d'une formule de base (sans fines d'addition).....	50
✚ Dosage en ciment	50
✚ Dosage en eau	50
✚ Dosage en adjuvant	50
✚ Détermination du dosage en sable.....	50
✚ Détermination du dosage en fines d'addition.....	52
✚ Ajustement de la formule optimisée	55
✚ Détermination d'une formule de béton de sable à base de poudre de verre.....	55
III.3. Caractérisation des bétons de sable à base de poudre de verre	56
III.3.1. Caractérisation du béton frais	56
III.3.1.1. Etude de la maniabilité	56
III.3.2. Caractérisation du béton durci	57
III.3.2.1. Masse volumique.....	57
III.3.2.2. Absorption d'eau par immersion totale	58
III.3.2.3. Relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau.....	59
III.3.2.4. Etude des propriétés mécaniques.....	60

III.3.2.4.1. Résistance à la flexion	60
III.3.2.4.2. Résistance à la compression	61
III.4. Conclusion	63
Conclusion générale	64
Références bibliographiques	66
Annexe.....	I

RESUMES

RESUMES

Cette étude entre dans le cadre de valorisation des matériaux locaux et la réutilisation des déchets industriels dans la construction. Elle a pour objectif d'améliorer les propriétés physico-mécaniques du béton de sable à base de poudre de verre. Nous présentons dans ce travail une étude sur la formulation des bétons de sable à base de poudre de verre par la méthode expérimentale. Cette étude a donc essentiellement porté sur l'effet de l'ajout des poudres de verre dont le pourcentage varie de 0 à 40% (0%, 10%, 20%, 30% et 40%) afin de cibler la meilleure composition qui constitue les meilleurs compromis entre les propriétés étudiées. Les résultats trouvés montrent que la fluidité et la masse volumique des bétons étudiés ont diminués en fonction de l'augmentation du dosage de poudre de verre. Les résultats mécaniques ainsi obtenus ont montré une amélioration intéressante. En effet, l'ajout optimal qui constitue les meilleurs compromis entre les propriétés étudiés est de 10% de poudre de verre. Des améliorations allant jusqu'à d'environ 48.5% à 90 jours ; en cas de la résistance à la flexion et d'environ 9% en cas de la résistance à la compression. 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, poudre de verre, formulation, propriétés physico-mécaniques.

الملخص

هذه الدراسة تدخل ضمن إطار استغلال المواد المحلية وإعادة استخدام النفايات الصناعية في البناء. هدفها هو تحسين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة الرملية معتمدة على مسحوق الزجاج. في هذا العمل نقدم دراسة لتركيبية الخرسانة الرملية معتمدة على مسحوق الزجاج بالطريقة التجريبية. تركز الدراسة التجريبية على تأثير زيادة مسحوق الزجاج من 10% إلى 40% (0%، 10%، 20%، 30% و 40%) من أجل استهداف أفضل تركيبية من بين الخصائص المدروسة. أوضحت النتائج المتحصل عليها أنّ التشغيلية والكتلة الحجمية للخرسانات المدروسة انخفضت مع زيادة نسبة المسحوق الزجاجي. أظهرت النتائج الميكانيكية التي تم الحصول عليها تحسناً مثيراً للاهتمام. في الواقع، فإن الإضافة المثلى التي تشكل أفضل حل وسط بين الخصائص المدروسة هي 10% من مسحوق الزجاج. تحسينات تصل إلى حوالي 48.5% في حالة مقاومة الانحناء عند 90 يوم وحوالي 9% في حالة قوة الانضغاط. أخيراً، تجدر الإشارة إلى أن النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة مشجعة للغاية لتطوير خرسانة رملية جديدة قادرة على تلبية متطلبات البناء المحلي.

الكلمات المفتاحية:

مواد محلية، نفايات صناعية، خرسانة رملية، مسحوق زجاجي، تركيبية، خواص فيزيائية-ميكانيكية.

ABSTRACT

This study falls within the framework of the valorization of local materials and the reuse of industrial waste in construction. Its objective is to improve the physical and mechanical properties of sand concrete based on glass powder. We present in this work a study on the formulation of sand concrete based on glass powder by the experimental method. This study has therefore essentially focused on the effect of adding glass powders whose percentage varies from 0 to 40% (0%, 10%, 20%, 30% and 40%) in order to target the best composition that constitutes the best compromise between the studied properties. The results found show that the fluidity and density of the concretes studied decreased with increasing glass powder dosage. The mechanical results thus obtained showed an interesting improvement. Indeed, the optimal addition which constitutes the best compromise between the studied properties is 10% of glass powder. Improvements of up to about 48.5% at 90 days; in the case of flexural strength and about 9% in the case of compressive strength. 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 powder, formulation, physical and mechanical properties.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

d	: Dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire.
D	: Dimension du plus grand grain de l'étendue granulaire.
G	: Gravillon.
S	: Sable.
E/C	: Rapport (eau / ciment).
G/S	: Gravillons sur sables.
D_{\max}	: Dimension de plus gros grain de l'étendue granulaire.
V	: Volume des vides du mélange granulaire.
V_0	: Constante expérimentale comprise entre 0.7 et 0.8.
Ps (V)	: Porosité du sable d'étendue 80 μm , 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.
Kf	: Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5.
Rc	: Classe vraie du ciment (MPa).
C	: Dosage en ciment (kg/m^3).
R_b	: Résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).
K_1	: Coefficient pouzzolanique.
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.

Si	: Masse de sable.
MVAT	: Masse volumique apparente théorique du béton.
MVAR	: Masse volumique apparente réelle du béton.
MV_{sable}	: Masse volumique absolue du sable.
PV	: Poudre de verre.
SAD	: Sable alluvionnaire-dunaire.
SA	: Sable alluvionnaire.
SD	: Sable de dune.
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.
Mf	: Module de finesse.
ES	: Equivalent de sable.
ES_V	: Equivalent de sable visuel.
ES_P	: Equivalent de sable au piston.
h_1	: Hauteur de sable propre + éléments fins.
h_2	: Hauteur de sable propre seulement.
C_p	: Compacité.
p	: Porosité.
e (%)	: L'indice des vides.
C_3S	: Tricalcium silicate $3CaO SiO_2$.
C_2S	: Dicalcium silicate $2CaO SiO_2$.
C_3A	: Tricalcium aluminate $3CaO Al_2O_3$.
C_4AF	: Tetracalcium ferro aluminate $4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$.

Nomenclature

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	: La surface transversale de l'éprouvette.
$A(\text{cm})$: Affaissement.
$A\%$: Coefficient d'absorption d'eau.
P_s	: Masse du matériau sec.
P_h	: Masse du matériau humide.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I: Recherche Bibliographique

Figure I.1. Colisée un monument emblématique de Rome.	4
Figure I.2. Proportion du gravillon dans le béton.	7
Figure I.3. Effet des dosage fines sur la compacité du béton de sable	8
Figure I.4. Temps d'écoulement en fonction du module de finesse.....	9
Figure I.5. Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C).....	9
Figure I.6. Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire.....	10
Figure I.7. Aspect général du béton de sable.....	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.....	15
Figure I.11. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).....	17
Figure I.12. Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice.....	26
Figure I.13. Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec E/L=0.55 et différents pourcentages en PV.	28

CHAPITRE II: Caractérisation des Matériaux de Base et Techniques Expérimentales

Figure II.1. Sables utilisés.	30
Figure II.2. Courbe granulométrique des sables utilisés.	34
Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.....	36
Figure II.4. Ciment utilisé.	38
Figure II.5. Filler calcaire utilisé.	40
Figure II.6. Superplastifiant « MEDAFLOW 30 ».....	41
Figure II.7. Poudre de verre utilisée.	42
Figure II.8. Dispositif de mesure d'affaissement.	44
Figure II.9. Procédure de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.	44
Figure II.10. Schémas de l'essai de rupture par flexion.	46
Figure II.11. Procédure de l'essai de rupture par flexion.	47

Figure II.12. Schémas de l'essai de compression.	48
Figure II.13. Procédé de l'essai de rupture par compression.	48
Figure II.14. Procédure de l'essai d'absorption d'eau par immersion totale.....	59

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Figure III.1. Affaissement en fonction du dosage en fines.....	53
Figure III.2. Masse volumique apparente réelle en fonction du dosage en fines.	53
Figure III.3. Maniabilité des compositions étudiées.....	57
Figure III.4. Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés.	58
Figure III.5. Absorption d'eau par immersion totale à 28 jours.	59
Figure III.6. Relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion.	60
Figure III.7. Evolution de la résistance à la flexion à 28 et 90 jours.....	61
Figure III.8. Evolution de la résistance à la compression à 28 et 90 jours.	62

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I: Recherche Bibliographique

Tableau I.1. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.....	20
---	----

CHAPITRE II: Caractérisation des Matériaux de Base et Techniques Expérimentales

Tableau II.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable alluvionnaire (100% SA).....	31
Tableau II.2. Résultats d'analyse granulométrique du sable de dune (100% SD).	32
Tableau II.3. Résultats d'analyse granulométrique du sable mélange	32
Tableau II.4. Résultats d'analyse granulométrique du sable mélange	33
Tableau II.5. Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.	37
Tableau II.6. Regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur les sables utilisés.	37
Tableau II.7. Analyses chimiques (NA 5042)	38
Tableau II.8. Résistance à la compression (NA 234)	39
Tableau II.9. Composition minéralogique du ciment (CLINKER).....	39
Tableau II.10. Caractéristiques physiques du ciment MATINE	39
Tableau II.11. Caractéristiques du superplastifiant.	41
Tableau II.12. Analyse chimique de la poudre de verre.	42
Tableau II.13. Caractéristiques physiques de la poudre de verre	42
Tableau II.14. Classes de consistance du béton.	44

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Tableau III.1. Composition et caractérisation de la formulation de base.	51
Tableau III.2. Composition et caractérisation finale de la formulation de base.....	52
Tableau III.3. Composition et caractérisation de la formulation en Filler calcaire.	52
Tableau III.4. Correction de sable de la formulation en Filler.	54
Tableau III.5. Compositions des bétons étudiés.	56
Tableau III.6. Maniabilité des compositions étudiées.	56
Tableau III.7. Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés.....	57
Tableau III.8. Absorption d'eau par immersion à 28 jours.	59
Tableau III.9. Evolution de la résistance à la flexion à 14, 28 et 90 jours.	60
Tableau III.10. Evolution de la résistance à la compression à 14, 28 et 90 jours.	62

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie, la demande en matériaux de construction connaît une augmentation considérable en rapport avec le développement du pays. Ce problème 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 va conduire à, non seulement un intérêt technologique, mais aussi économique et environnemental [Mathur, (2006)]. Selon les différents travaux de recherche antérieurs, l'introduction de certains déchets dans les bétons et mortiers a pu quand même améliorer certaines de leurs propriétés.

D'autre part, dans le sud algérien, où les gros granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire, ainsi que de grands gisements de fines naturels et artificiels. Tout cela nous amène, peut-être, à remplacer le béton ordinaire par d'autres types de bétons, tels que le béton de sable [Cnerib, (1992)], qui a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 publiée en octobre 1987 par AFNOR [Afnor, (1987)]. Les propriétés spécifiques des bétons de sables permettent de remplacer et de résoudre certains problèmes mal assurés du béton ordinaire.

Par ailleurs, les préoccupations liées à l'élimination des déchets générés ont considérablement augmenté au cours des deux dernières décennies. La sensibilisation à l'environnement et à la gestion des déchets a suscité une préoccupation majeure dans le monde entier. De plus, les matériaux qui ont particulièrement suscité l'intérêt de nombreux chercheurs, en raison du faible taux de recyclage et des coûts d'élimination élevés, sont les déchets de verre. L'utilisation des déchets de verre dans la construction sont considéré comme une solution utile pour réduire l'impact environnemental. Les propriétés physiques du verre et sa composition chimique, similaire à celle du sable et du ciment, rendent ce matériau très attrayant. Il est en mesure de fournir une solution écologique pour les industries du verre et du ciment [Lin et al., (2009) ; Lee et al., (2008)].

Théoriquement, le verre est un matériau 100 % recyclable ; il peut être recyclé indéfiniment sans perte de qualité [Sobolev et al., (2006)]. Il existe de nombreux exemples de recyclage réussi du verre usagé comme calcin dans la production de verre, comme matière première pour la production d'abrasifs, dans le sablage, comme substitut de granulats dans le béton (comme additif

pouzzolanique), dans les lits de route, les chaussées et les parkings, comme matière première pour produire des granules ou des perles de verre utilisées dans la peinture réfléchissante pour les autoroutes, pour produire de la fibre de verre, et comme fractionnaire pour allumer des allumettes et tirer des munitions [Shi et al., (2007) ; Chen et al., (2002)].

L'industrie de la construction a enregistré de grands progrès dans le recyclage des sous-produits et des déchets industriels, y compris le verre usagé. Le recyclage de ces déchets par leur transformation en agrégats permet non seulement d'économiser de l'espace dans les décharges, mais aussi de réduire la demande d'extraction de matières premières naturelles pour l'activité de construction [Rakshvir et al., (2006)].

Notre étude est une continuation des études antérieures menées sur le béton de sable, dont le but est d'introduire des déchets industriels dans ce matériau. Pour cela on ajoute un déchet de verre comme poudre, qui peuvent apporter une meilleure réponse au problème des bétons de sable. Dans des travaux précédents, plusieurs études ont montré que l'utilisation des déchets de verre comme poudre par substitution partielle du ciment a donné des bons résultats physico-mécaniques [Schwarz et al., (2008) ; Nassar et al., (2012) ; Aly et al., (2012) ; Idir et al., (2010)].

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence d'ajout des différents dosages en poudre de verre (0%, 10%, 20%, 30% et 40%) sur les propriétés physico-mécaniques du béton de sable. 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 les déchets industriels ;
- Le deuxième chapitre comporte une caractérisation générale des matériaux utilisés, ainsi qu'une description détaillée des différentes techniques de mesures expérimentales employées dans cette étude ;
- Le troisième chapitre présente une étude sur les effets de poudre de verre sur les caractéristiques physico-mécaniques des composites 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

L'objet de ce chapitre est de présenter une synthèse bibliographique à travers les différents documents liés à la composante principale, qui sont le béton de sable et aussi les différentes méthodes de formulation du béton de sable.

À la fin de ce chapitre, on présente une généralité sur le verre et la poudre de verre et leurs effets sur les bétons, où nous avons ajouté la poudre de verre à notre béton de sable étudié.

I.2. Béton de sable

I.2.1. Introduction

L'Algérie est un gros consommateur d'agrégats. 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 [Cnerib, (1992)].

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, laitier concassé, poudre de verre, etc. [Achoura, (2005) ; Sablocrete, (1994)].

I.2.2. Historique

Le béton de sable trouve ses origines dans l'antiquité, car il y a plus de deux milles ans les romains constataient que s'ils mélangeaient du sable d'origine volcanique à la chaux vive ils obtenaient des matériaux très résistant et l'utilisèrent pour la construction de grands monuments tel que le Panthéon et le colisée de Rome. (Figure I.1.), monuments qui sont témoins de la résistance et la durabilité des matériaux composites de l'histoire des techniques industrielles, Mais l'utilisation du béton de sable proprement dit et à grande échelle, a commencé en France à la deuxième moitié du 19ème siècle; suite aux travaux effectués par F. Coignet qui a procédé au mélange sans caillou de sable et peu d'eau, de cendres, de scories de charbon brulé, de terre argileuse cuite et pilée et de la chaux hydraulique afin de réaliser plusieurs ouvrages. Ceux-ci constituent les premières applications de cette technique dont certains sont encore en service.



Figure I.1. Colisée un monument emblématique de Rome.

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.

La possibilité d'obtenir des niveaux élevés de résistance avec l'utilisation des gros granulats a fait tomber, à une certaine époque, le béton de sable dans l'oubli. A la fin de la deuxième guerre mondiale, le béton de sable revient en force grâce à ses propriétés spécifiques, à la pénurie des gros granulats dans certaines régions et bien entendu à la disponibilité de gros gisements de sable [Benaissa, (1992)]. 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 [Bederina, (2007)].

I.2.3. Définition

La norme Française AFNOR. NF P18 500 (juin 1995) définit le béton de sable comme suit : « le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable, des fines et de l'eau ; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons. Les ajouts utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange. L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation « béton de sable » tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0.7 (G= gravillon ; S= sable) : « on parle alors de béton de sable chargé » [Afnor, (1995)].

Le béton de sable a les particularités suivantes :

- Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevée et sa destination (essentiellement destiné aux usages traditionnels du béton) ;
- Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable élevé, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidification par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peut être nécessaire), et l'incorporation d'ajout ;
- Il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et parce.

I.2.4. Constituants du béton de sable

I.2.4.1. Sables

Les sables utilisables sont ceux conformes aux définitions des normes NFP18-541 ($ES \geq 75$ si le sable est roulé et $ES \geq 65$ s'il est broyé) [Benmalek et al., (2009)]. Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/D. Aucun critère granulométrique n'est exigible à priori, la seule restriction d'emploi réside dans la propreté. Les sables de plage ou des dunes pourraient donc être utilisés [Benabed et al., (2005)].

I.2.4.2. 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 400 kg/m³). 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 [Sablocrete, (1994)].

I.2.4.3. Eau de gâchage

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 ; on utilise la valeur E/C la plus faible possible en augmentant la compacité et en utilisant des plastifiants (adjuvants réducteurs d'eau). L'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables [Sablocrete, (1994)].

I.2.4.4. Fines d'ajouts

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [Sablocrete, (1994)] :

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

Des fillers de dimensions majoritairement inférieures à 80 μm sont utilisés pour remplir les vides entre les grains de sable afin de réduire la quantité de ciment. Leur rôle assure deux fonctions principales : l'une grossière de remplissage, l'autre d'ordre physico-chimique devant améliorer

l'enchevêtrement cristallin et la cohésion du mélange La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable.

I.2.4.5. Adjuvants

Les adjuvants employés devront être conformes aux normes NFP 18-340. Généralement on utilise des plastifiants ou super plastifiants dont l'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable en réduisant la quantité d'eau ce qui augmente les caractéristiques du béton. Ils ont un rôle essentiel dans la technique des bétons de sable. Ils déflocculent les éléments fins et permettent de limiter le dosage en eau [**Sablocrete, (1994)**].

I.2.4.6. Autres ajouts

I.2.4.6.1. Fibres

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout [**Elhachem, (1990)** ; **Swamy et al., (1985)** ; **Valade, (1987)**].

On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe [**Sablocrete, (1994)**].

I.2.4.6.2. 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.2.**). 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 [**Sablocrete, (1994)**].

$$\mathbf{G/S < 0.70} \qquad \mathbf{(I.1.)}$$

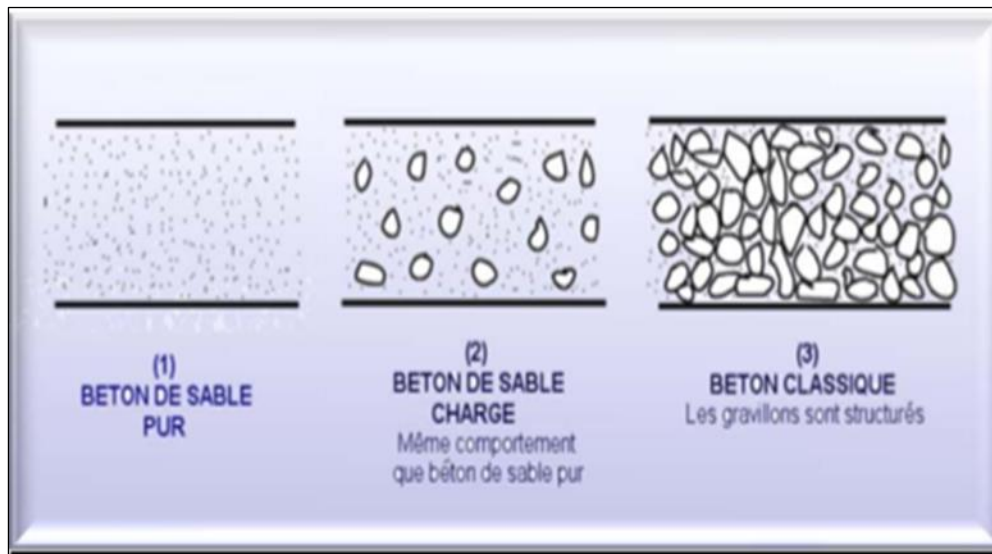


Figure I.2. Proportion du gravillon dans le béton.

I.2.4.6.3. 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 [Sablocrete, (1994)].

I.2.5. Propriétés essentielles du béton de sable

I.2.5.1. Compacité

La compacité est une qualité essentielle qui influe sur les performances du béton. L'optimisation de la compacité relève d'une démarche visant à minimiser la quantité d'eau à ajouter au mélange sec et à optimiser la teneur des ajouts.

I.2.5.1.1. Effet de la granulométrie du sable sur la compacité

D'après plusieurs études expérimentales [Laquerbe et al, (1999)], il a été montré qu'un sable alluvionnaire ($D_{\max} \cong 5\text{mm}$) nécessite moins de fines qu'un sable de dune ($D_{\max} < 1\text{mm}$). Ceci pourra s'expliquer par le fait que la porosité dépend de la granulométrie du sable qui est une fonction de la nature du sable, et plus le sable est poreux (le cas d'un sable dunaire) plus on a besoin de fines. Bien que dans ce cas cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines qui améliore la compacité, le béton de sable reste toujours moins compact que le béton ordinaire [Ghrieb, (2003)].

I.2.5.1.2. Effet de l'addition des fines

En fonction de la finesse, du dosage en fines et du dosage en ciment, on a pu remarquer qu'il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer (**Figure I.3**).

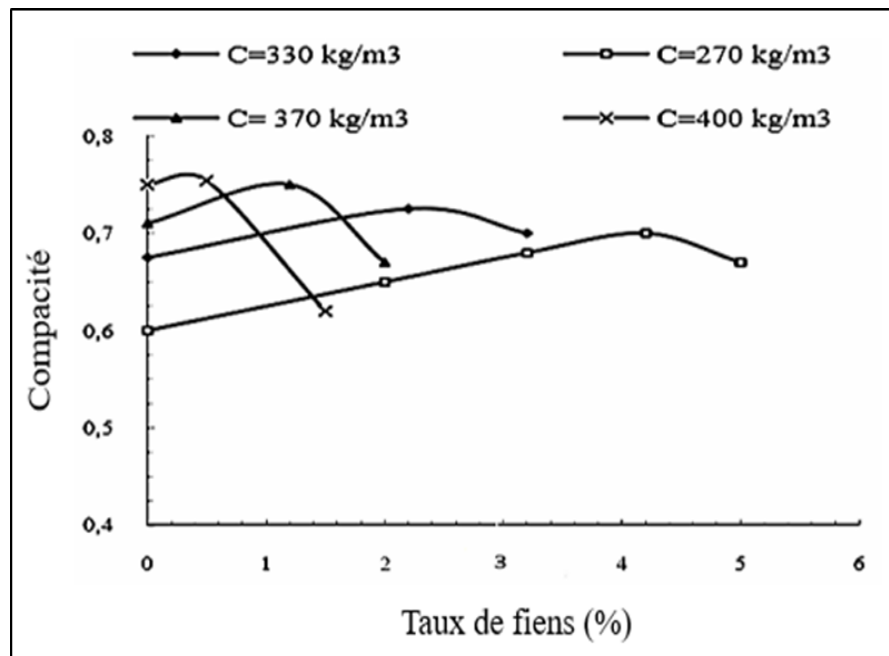


Figure I.3. Effet des dosage fines sur la compacité du béton de sable [**Chauvillard et al., (1996)**].

I.2.5.2. Maniabilité

La maniabilité est l'une des caractéristiques de grande importance, elle dépend essentiellement de la qualité et de la quantité d'eau utilisée. La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange ; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la **Figure I.4.**, qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité [**Benaïssa, (1992)**].

La **Figure I.5.**, montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport E/C augmente. Cependant, pour un rapport E /C fixe, la maniabilité dépend de la nature des fines d'ajout. La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.

En suivant les règles de formulation, basée sur une optimisation complète de la compacité, les bétons de sable doivent présenter une bonne ouvrabilité, de l'ordre de 11 à 40 secondes au Maniabilimètre LCL à mortier [**Laquerbe et al., (1999)**]. D'après la **Figure I.6.**, ci- dessous, la maniabilité des bétons de sable dunaire augmente considérablement si on augmente E /C.

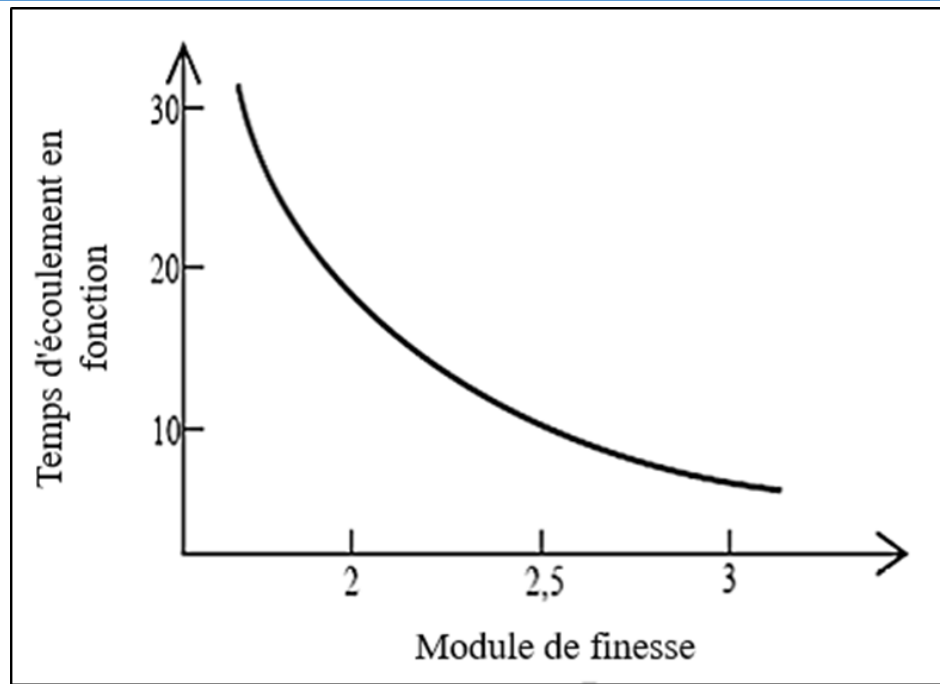


Figure I.4. Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [Benaissa et al., (1992)]

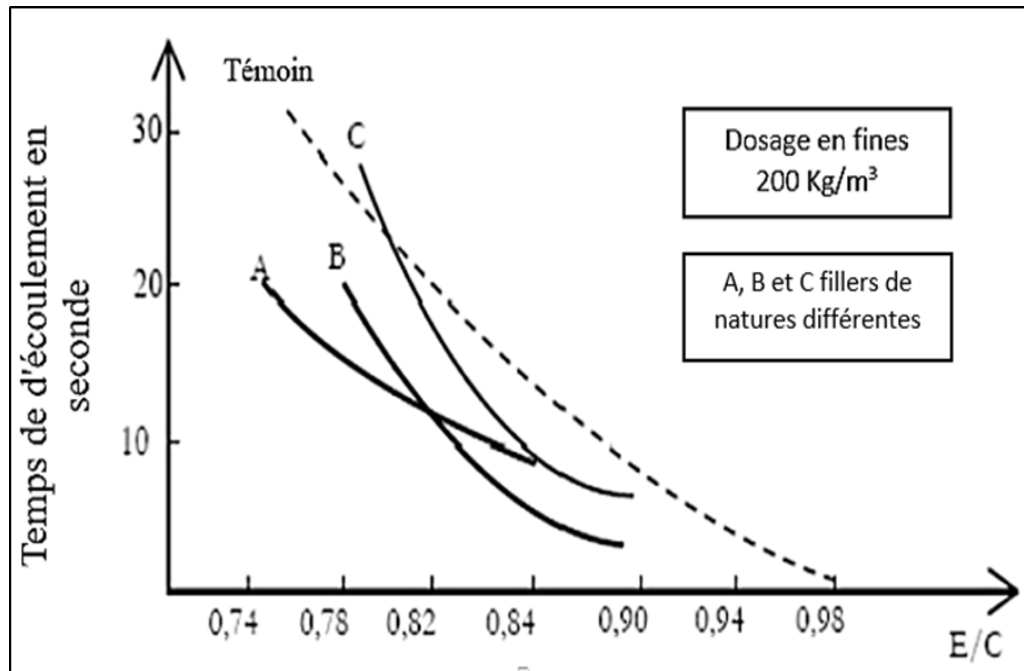


Figure I.5. Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C)

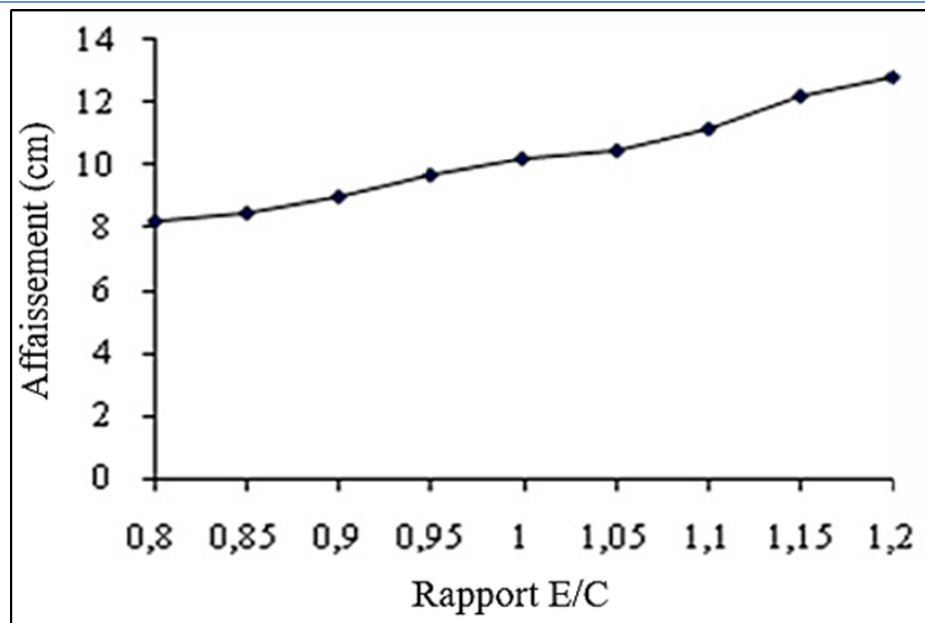


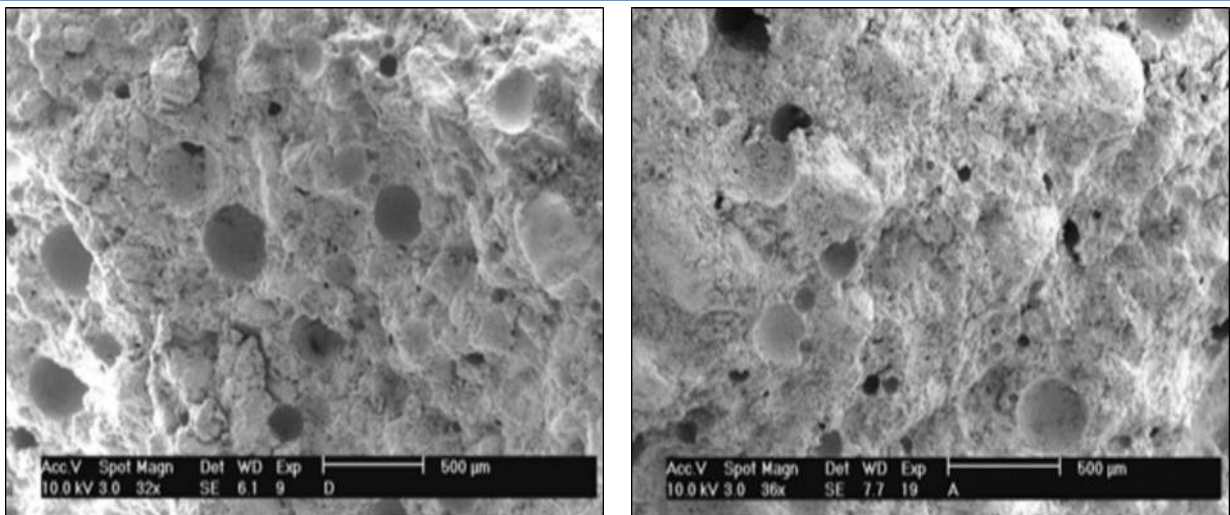
Figure I.6. Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire [Chauvillard et al., (1996)].

I.2.6. Comportements mécaniques

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montée en résistance est plus lente ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrages mis en charge précocement, d'autre part. il est aisé d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques. Même à court terme la résistance dépend d'un certain nombre de paramètres tels que : La finesse des fines d'addition, la nature de fines d'addition et la dimension du D_{max} [Belmecheri, (2012)].

I.2.7. Durabilité

Les paramètres tels que porosité, répartition géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels. Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. La **Figure I.7.**, présente l'aspect général de deux types du béton de sable (alluvionnaire et dunaire) réalisé par MEB [Bederina, (2007)]. Cette distribution poreuse particulière contribue pour durabilités [Laquerbe et al., (1999)].



Béton de sable dunaire ; G = 32

Béton de sable alluvionnaire ; G = 36

Figure I.7. Aspect général du béton de sable [Bederina, (2007)].

I.2.8. 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 [Gluais et al., (1993)]. Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable [Sablocrete, (1994)].

I.2.9. Formulation d'un béton de sable

I.2.9.1. 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.2.9.2. 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}) [Sablocrete, (1994)].

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

$$V = V_0 (d/D_{\max})^{1/5} \quad (\text{I.2.})$$

Où :

V: Volume des vides du mélange granulaire.

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0.7 et 0.8.

d: Dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire.

D_{\max} : 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.2.9.2.1. 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 μm , et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.
- 2- Toute l'étendue du sable comprise entre 80 μm , et le diamètre maximal du sable D_{\max} , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 μm provenant des fines d'ajout. En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 μm , et l'étendue du sable comprise entre 80 μm , et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D_{\max})^{1/5} \quad (\text{I.3.})$$

Où :

$P_s (V)$: Porosité du sable d'étendue $80 \mu\text{m}$, 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 $80 \mu\text{m}$, 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 ($< 80 \mu\text{m}$) 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.

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.08/D_{\text{max}})^{1/5} \quad (\text{I.4.})$$

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.**).

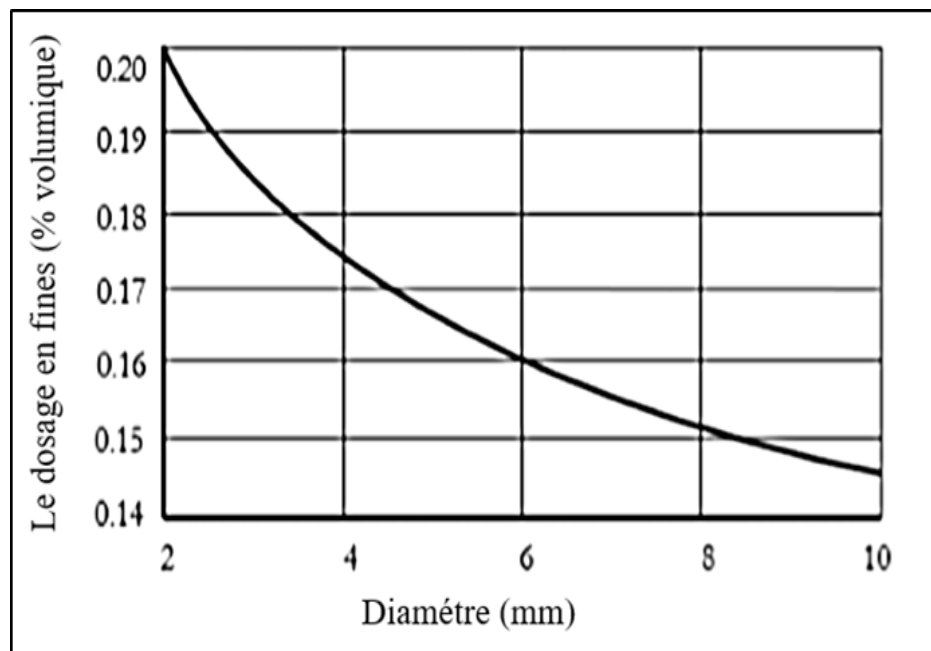


Figure I.8. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [Sablocrete, (1994)].

I.2.9.2.2. 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 .

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

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 :

$$d = (60 / (f)) \text{ mm} \times \rho \quad (\text{I.6.})$$

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 floccs 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 (**Figure I.9.**).

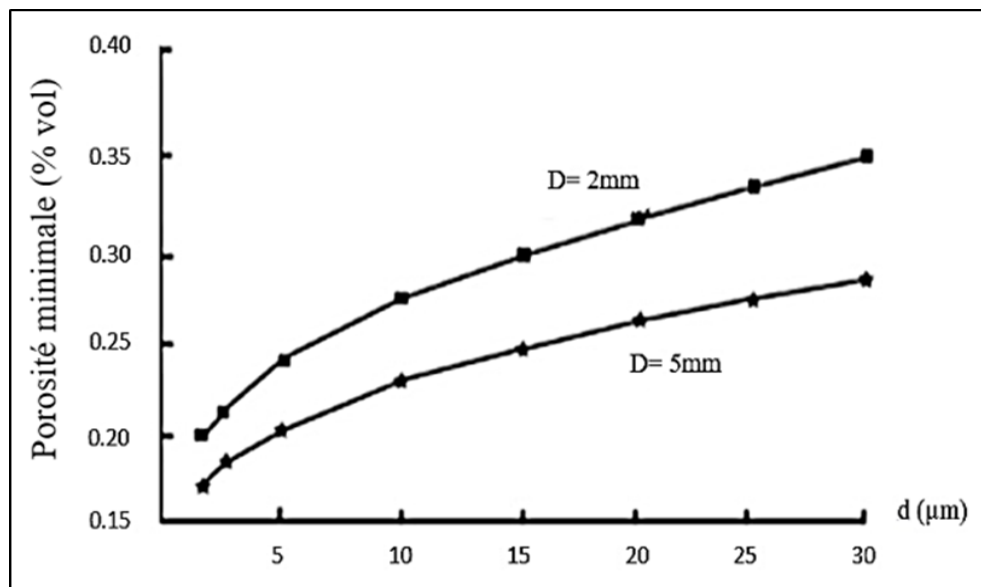


Figure I.9. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [Sablocrete, (1994) ; Ghrieb, (2003)].

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

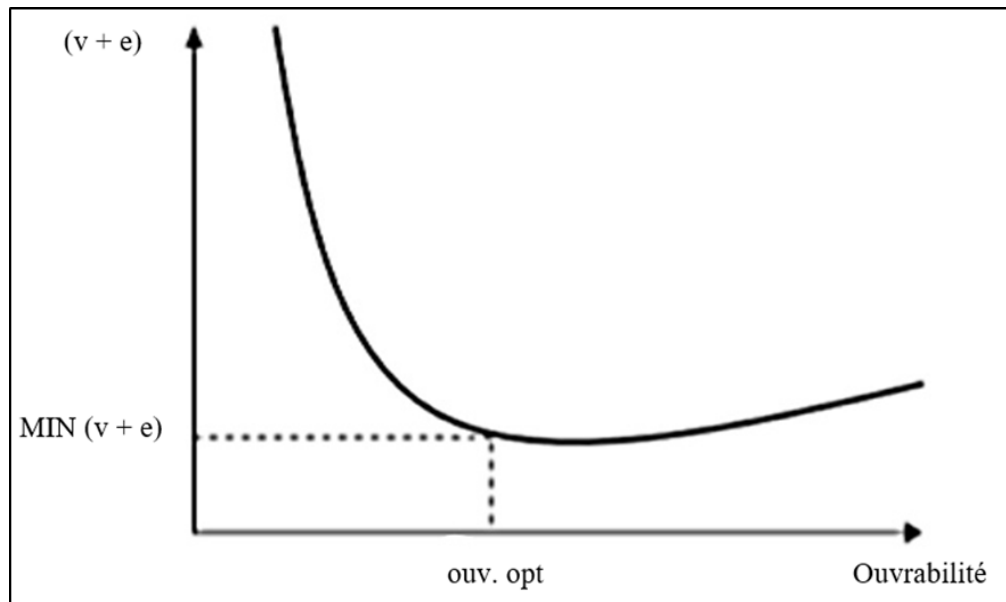


Figure I.10. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée.

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

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

$$[\text{Vides}] = K [\text{eau}] \quad (\text{I.7.})$$

Avec :

K: Constante comprise entre 0.2 et 0.25.

I.2.9.2.3. Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable (1m³) 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).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (\text{I.8.})$$

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

I.2.9.2.4. 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 [Dreux et al., (1998)].

$$R_b = \frac{R_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad (I.9.)$$

Avec :

K_f : Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5.

R_c : Classe vraie du ciment (MPa).

e : Dosage en eau total (l/m³).

V : Air piégé (l/m³).

C : Dosage en ciment (kg/m³).

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, 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 [Dreux et al., (1998)].

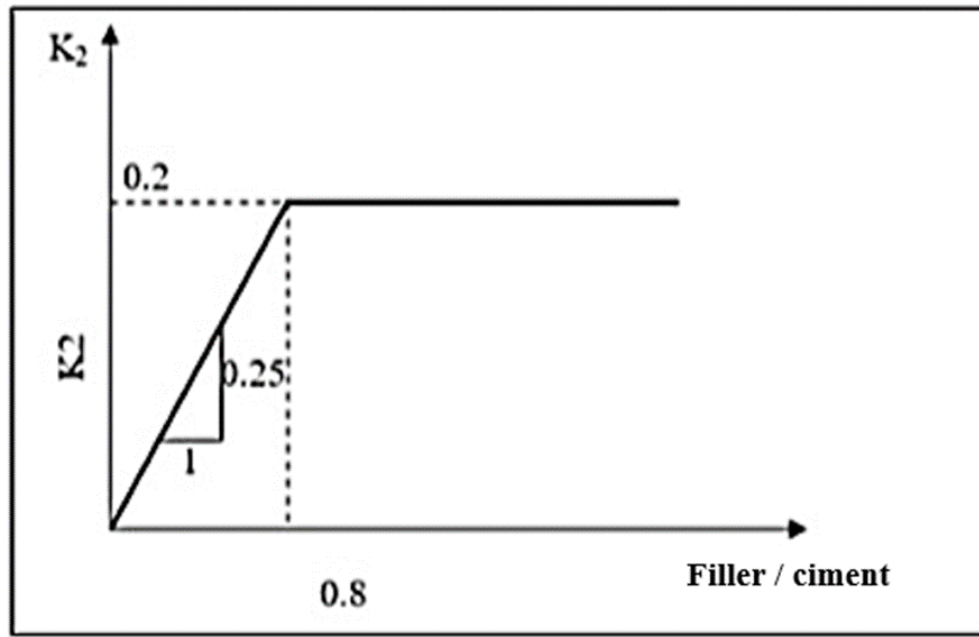


Figure I.11. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [Dreux et al., (1998)].

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, toute 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.2.9.3. 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 (en l'absence de maniabilimètre, on peut utiliser l'essai d'affaissement au cône d'Abrams) :

- ✚ 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 [Sablocrete, (1994)].

I.2.9.3.1. Différentes étapes de la formulation

I.2.9.3.1.1. 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/m^3).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E ($1/\text{m}^3$), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 kg de ciment, et 250 litres pour 400 kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air (V_{air}), la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton. Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton, on aboutit à la relation suivante :

$$V_{\text{air}} + V_{\text{c}} + V_{\text{E}} + V_{\text{adj}} + V_{\text{sable}} = 1000 \text{ (En litre)} \quad (\text{I.10.})$$

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

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V \times MV_{\text{sable}} \quad (\text{I.11.})$$

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.2.9.3.1.2. 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 :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (\text{I.12.})$$

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

Le **Tableau I.1.**, donne une comparaison de quelques caractéristiques de béton de sable et béton ordinaire.

Tableau I.1. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.

Béton de sable	Béton ordinaire
<p style="text-align: center;"><u>Composants</u></p> <p style="text-align: center;">[Sablocrete, (1994)]</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ciment. - Sable. - Filler. - Eau : plus quantité d'eau 	<p style="text-align: center;"><u>Composants</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ciment. - Sable. - Gravier. - Eau : moins quantité d'eau
<p style="text-align: center;"><u>Qualités essentielles</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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. 	<p style="text-align: center;"><u>Qualités essentielles</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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.
<p style="text-align: center;"><u>Méthodes de formulations</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Méthode théorique et méthode expérimentale [Sablocrete, (1994)]. - Méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées [Chauvillard et al., (1996)]. 	<p style="text-align: center;"><u>Méthodes de formulations</u></p> <p>* Méthodes basées sur des considérations théoriques ou des essais :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Méthode à granularité continue de Bolomey. - Méthode de Vallette. - Méthode de Faury. <p>* Méthodes générales du C.E.S (centre d'essai des structures) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evaluation de l'humidité des granulats. - Utilisation d'abaque (Méthode Dreux).

<p style="text-align: center;"><u>Particularité du béton</u></p> <p style="text-align: center;">[Sablocrete, (1994)]</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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. 	<p style="text-align: center;"><u>Particularité du béton</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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.
<p style="text-align: center;"><u>Domaines d'emploi</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bâtiments. - Fondations. - Voiries. - Travaux des réparations. - La projection des surfaces. - La réhabilitation de collecteurs d'assainissement. - Les travaux d'injection. - Le comblement de cavités 	<p style="text-align: center;"><u>Domaines d'emploi</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Bâtiments. - Fondations. - Voiries. - Aéroports. - Ouvrages d'art. - Travaux des réparations. - Les ponts. - La préfabrication

I.4. Généralités sur les bétons à base de verre et poudre de verre

I.4.1. Verre

L'origine du verre remonte à la plus haute antiquité, il a été découvert pour la première fois aux îles grecques de Mélos et de Théra. Où on utilisait les obsidiennes pour la fabrication des couteaux, pointes de flèches etc., mais les plus anciens objets en verre produits par l'homme ont été découverts en Egypte, ils remontent à environ 3000 ans avant JC. D'après les recherches archéologiques les habitants de la Mésopotamie savaient déjà fabriquer le verre vers 4500 ans avant JC. On peut dire qu'actuellement 95% des objets de verre sont fait mécaniquement **[Duval, (1974)]**.

Les verres sont des solides amorphes, d'habitude des substances inorganiques, formés après une solidification sans cristallisation. Ils sont caractérisés essentiellement par l'absence d'un point de fusion fixe, contrairement à ce qui se passe avec les corps cristallisés. Lors du refroidissement, ils traversent une zone de températures durant laquelle toutes les propriétés physiques (indice de réfraction, densité, coefficient de dilatation) subissent des variations importantes ; d'où l'appellation de cet intervalle « zone de transformation » **[Jeans, (2001)]**.

En générale le verre est un matériau transparent, homogène et fragile il résiste au feu et au contact de tous les liquides et solides, c'est un solide non cristallin (amorphe) qui ne présente pas l'ordre à longue distance c'est un état particulier de la matière (état vitreux).

I.4.1.1. Bétons et mortiers à base des verres

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflés et ce sont fissurés. Depuis, l'idée a été en partie abandonné. Ce n'est que depuis presque une vingtaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études [Souleymane, (2019)].

I.4.1.2. Utilisations des verres dans les routes et les bâtiments

I.4.1.2.1. Routes

Glasphalt : peut-être utiliser de déchets de verre dans les routes au lieu de gravier ou de petits cailloux de mélange de quelques pourcentages, et ce type d'industrie fut un grand succès en Amérique et avéré très réussie à conserver la température, comme sa propriété, et est la résistance au glissement sur la route.

Read repair materiel : est un mélange de verre et de l'huile usée, le ciment et l'utilisation de cet article est utilisé pour bricoler sur la route ou pour remplir les trous et les ébauches de forage et au-dessus de la route [Debabi et al., (2017)].

I.4.1.2.2. Bâtiments

Terrezo : est un mélange de particules de verre, de marbre et de ciment Portland gris ou de couleur blanche est utilisé pour les planchers et les murs.

Brique et tuiles en verre moussé : est Un mélange de verre avec un matériau en caoutchouc a faible densité et en ajoutant des substances chimiques qui ont la capacité de résister à la température et de la résistance, est considéré comme un matériau insonorisant [Debabi et al., (2017)].

I.4.1.3. Propriétés des verres

Le verre est une matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence [Zoubiri, (2016)].

I.4.1.3.1. Propriétés mécaniques

Le verre est considéré comme un matériau fragile, il est présente un faciès conchoïdal après la rupture. On trouve de nombreux paramètres permettant de décrire les qualités et les défauts du verre dans toutes les situations de mise sous contrainte [Lamali et al., (2017)] :

- ✚ Module élastique ou module d'Young (E), qui caractérise la déformation du verre avant la rupture.
- ✚ Contrainte à la rupture.
- ✚ Corrosion sous contrainte : l'altération par l'eau d'une fissure augmente sa vitesse de propagation.
- ✚ Fatigue du verre : soumis à des traitements cycliques, un verre peut se fragiliser par modification des défauts de surface (taille, nombre).
- ✚ Dureté qui caractérise l'aptitude d'un verre à rayer (ou être rayé par) un autre matériau.

I.4.1.3.2. Propriétés physiques

- ✚ Transparence : mais il peut être opaque ou opalescent ;
- ✚ Dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême et le cristal est le plus tendre ;
- ✚ Densité : elle dépend des composants, elle est d'environ 2.5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2.5 kg ;
- ✚ Résistance et élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre ;
- ✚ Imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue » [Zoubiri, (2016)].

I.4.1.3.3. Propriétés thermiques

- ✚ Dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal, Ce coefficient varie selon la composition ;

- ✚ Conductivité : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre) ; on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C ;
- ✚ Ininflammable et incombustible [Zoubiri, (2016)].

I.4.1.3.4. Propriétés chimiques

- ✚ Action de l'eau : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.
- ✚ Action de l'air : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenue dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.
- ✚ Action de la lumière : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent où se décolorent.
- ✚ Action des acides : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout [Zoubiri, (2016)].

I.4.2. Poudre de verre

La poudre de verre (PV) est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [Abdalla, (2012) ; Idir et al., (2011) ; Jain, (2010) ; Schwarz et al., (2008) ; Shao et al., (2000) ; Shayan, (2004, 2006) ; Shi et al., (2005) ; Taha, (2008a, 2008b) ; Zidol, (2009)]. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants [Zoubiri, (2016) ; Pawel et al., (2015)].

I.4.2.1. Réaction alcali-silice et réaction pouzzolanique

L'incorporation du verre dans le béton conduit à distinguer deux phénomènes à effet contradictoires. D'une part à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres lorsqu'il présente une granulométrie assez grossière. D'autre part étant finement broyé développe une action bénéfique identifiable à la réaction pouzzolanique [Souleymane, (2019)].

I.4.2.1.1. Réaction alcali-silice

Vers 1940, STANTON a découvert une pathologie, la réaction alcali-granulats (ou alcali réaction), qui affecte les bétons et que les chercheurs ont surnommée « le cancer des bétons ». Sous ce terme se regroupent toutes les réactions chimiques qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. Il existe trois grands types de réaction alcali-granulats : les réactions alcali- carbonate, alcali-silice et alcali-silicate. La réaction la plus fréquemment rencontrée est la réaction alcali-silice. Les désordres occasionnés par alcali-silice se présentent sous

forme de faïençage ou d'éclatement du béton. Ces réactions n'apparaissent en général qu'après plusieurs dizaines d'années.

Le processus de la réaction alcali-silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs. Alors quel est son mécanisme et quels sont ces paramètres qui conditionnent la réaction alcali-silice du verre ? [Souleymane, (2019)].

❖ Mécanisme de la réaction

La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines années après la fabrication du béton. Les verres peuvent présenter différentes formes de silices diversement réactives. Les premiers points d'attaque sont les groupes silanol (Si-OH), qui réagissent avec les hydroxydes alcalins de la solution interstitielle [Poole, (1992)].



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situés plus profondément a lieu ensuite :



Avec (M = Na ou K)

De façon simplifiée, l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit :

- Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- Migration des ions OH^- , Na^+ et K^+ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.
- Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.
- Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydraté alcalin non gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na^+ et K^+ ainsi que l'eau.
- Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.
- Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie (**Figure I.12.**) [Souleymane, (2019)].

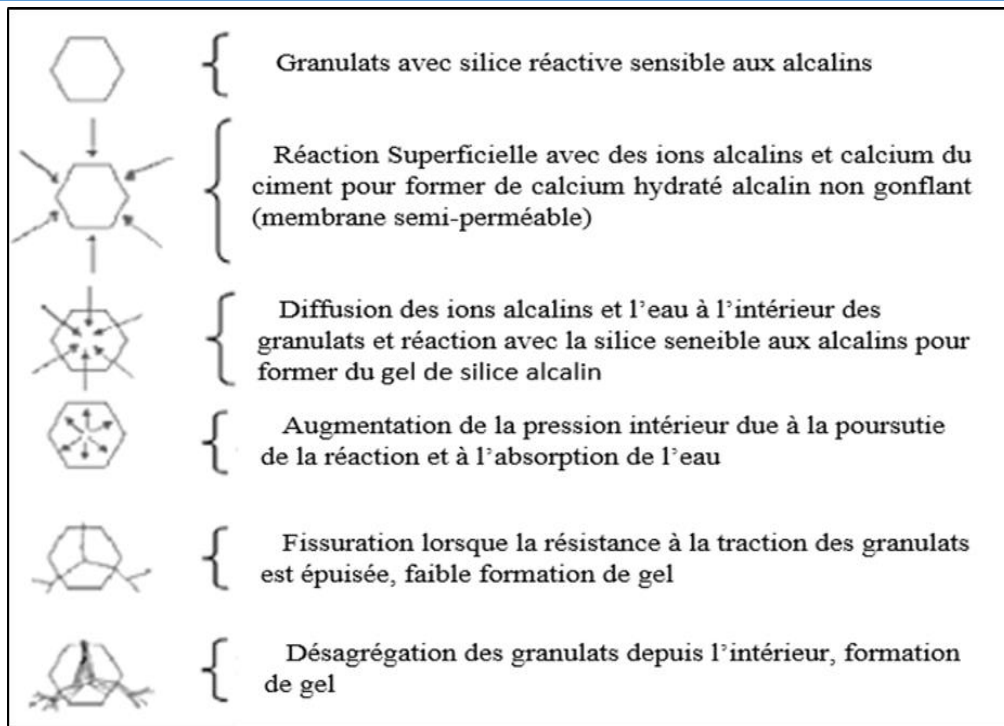


Figure I.12. Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [Souleymane, (2019)].

I.4.2.1.2. Réaction pouzzolanique du verre

À l'origine, l'appellation d'une pouzzolane se limitait aux cendres volcaniques qui se forment naturellement ainsi qu'aux argiles calcinées qui peuvent réagir avec la chaux, en présence d'eau et à température ambiante. Ce terme a ensuite été élargi pour couvrir d'autres matériaux artificiels ou naturels, silico-alumineux ou siliceux, qui en présence d'eau réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés qui possèdent des propriétés liantes. La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + Eau \Rightarrow silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés

La propriété pouzzolanique se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice amorphe ou dont le réseau cristallin est fortement déféctueux. L'action pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts [Rachida et al., (2009)] :

- ✚ La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer (Thermodynamique).
- ✚ La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane, (Cinétique).

Les produits de la réaction pouzzolanique sont des gels amorphes de type C-S-H, avec des rapports Ca/Si généralement bien inférieurs à ceux des C-S-H du ciment [Souleymane, (2019)].

I.4.2.2. Effet de la poudre de verre sur le comportement mécanique du béton

I.4.2.2.1. Résistance à la compression

La résistance en compression est une donnée importante pour la conception d'un matériau cimentaire. Les autres propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction et à l'effort tranchant, le module d'Young, la relation résistance – déformation, sont reliées diversement à la résistance en compression. Les résultats sur la résistance à la compression sont également employés pour qualifier et quantifier l'efficacité des additions minérales remplacées du ciment dans un système cimentaires.

Le rôle des additions minérales dans un système cimentaire dans un premier temps est d'améliorer la résistance à la compression grâce à leur finesse et leur réaction pouzzolanique. L'étude effectuée par Zidol [Zidol, (2009)], sur des bétons formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m³ et un rapport E/L de 0,40, indique qu'entre 56 et 90 jours, les résistances des bétons avec poudre de verre sont supérieures à celles obtenues avec le béton témoin (sans PV). En effet, les résultats montrent qu'entre 28 et 90 jours, l'incorporation de 20 et 30 % de PV confèrent au béton un taux de développement en résistances à la compression de 12 et 18 % respectivement, alors que pour le témoin, ce même taux est de 9 % seulement.

D'autres chercheurs comme Xu ont étudié la performance de la poudre de verre comme un matériau pouzzolanique dans le béton. Les bétons étudiés par ces chercheurs, avec un dosage de 380 kg/m³, sont formulés pour atteindre une résistance à la compression de 40 MPa à 28 jours, dont le remplacement partiel du ciment était de 10, 20 et 30 % de la poudre de verre. Alors, pour le béton avec 20 % de PV, la résistance visée à 28 jours est atteinte. Cependant avec 30 % de PV, ce n'est qu'à partir de 90 jours que la résistance a pu atteindre 45 MPa [Xu et al., (2006)].

La **Figure I.13.**, montre l'influence du dosage de poudre de verre sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge du mortiers étudiés.

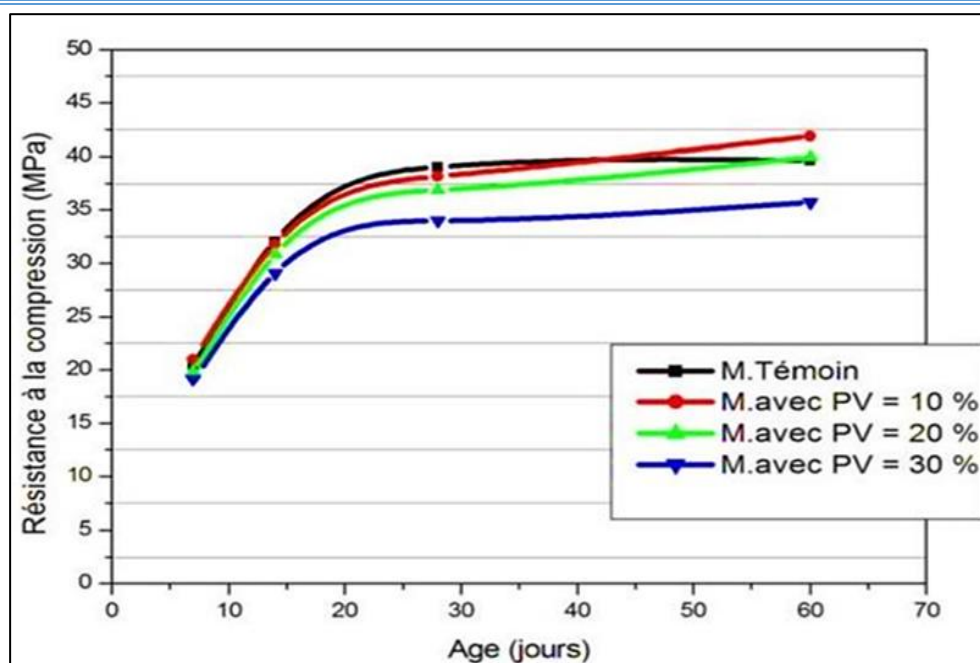


Figure I.13. Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.55$ et différents pourcentages en PV [Souleymane, (2019)].

I.4.3.2. Résistance à la flexion

Il est connu que les matériaux cimentaires sont plus résistants en compression qu'en traction. Pour un béton ordinaire sans ferrailage, la résistance en traction directe est de l'ordre de 8 à 12% de celle en compression, la résistance en traction sous flexion est de 5 à 7 fois la racine carrée de la résistance à la compression [Kosmatka, (2008)]. Elle est donc considérée comme négligeable pour qualifier un comportement mécanique d'un matériau cimentaire. Cependant, ils doivent parfois satisfaire à une résistance minimale en traction. Par exemple la capacité de distribution des charge transversales des chaussées en béton sans renforcement dépend particulièrement de leurs résistances en flexion.

Par ailleurs plusieurs chercheurs ont démontré qu'il existe une corrélation entre la résistance à la compression et à la flexion. A l'exemple de qui ont observé une progression des courbes de la résistance à la compression similaires à celles de la résistance à la flexion [Souleymane, (2019)].

I.5. CONCLUSION

Les bétons de sable pourraient remplacer les bétons ordinaires dans certains domaines d'applications. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès. Pour avoir une maniabilité convenable, l'utilisation des adjuvants s'impose alors pour réduire le dosage en eau et augmenter la résistance. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulaire et allant au plus gros diamètre possible. Pour combler les vides inter-granulaires, il faut prévoir des fines de bonne nature, de finesse élevée et avec des dosages convenables. L'augmentation de la compacité par ajout diminue la maniabilité, d'où la nécessité de trouver un compromis entre la maniabilité et sa compacité.

D'autre part, depuis des décennies, le ciment portland a été toujours le matériau de construction le plus populaire dans le monde. Notre synthèse bibliographique a montré que l'industrie cimentaire nécessite une quantité d'énergie très importante pour la fabrication du ciment Portland. Elle cause aussi un dégagement très élevé du CO₂ et de la poussière causant la pollution de l'environnement.

Enfin, l'incorporation de la poudre de verre dans les bétons et les mortiers permet d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques de ces derniers. De plus, elle garantit la conservation de la matière première et une protection de l'environnement. La poudre de verre a déjà fait ses preuves dans la confection de bétons ordinaires, néanmoins cela n'a pas encore été concrétisé pour la production du béton de sable. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence de l'incorporation de la poudre de verre sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons de sable étudiés.

CHAPITRE II:

Caractérisation des Matériaux de Base et Techniques Expérimentales

II.1. Introduction

L'emploi judicieux des matériaux de base dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés : physiques et chimiques, et qui permet de faire un choix répondant à leur destination.

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques physico-chimiques des différents matériaux utilisés durant ce projet de recherche (Sables, ciment, filler calcaire, poudre de verre, adjuvant et l'eau de gâchage). Ensuite, nous exposons les différents essais expérimentaux utilisés pour caractériser les différents compositions étudiées à l'état frais et durci.

II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés

II.2.1. Sable

Deux sables utilisés dans cette étude, 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 (Djamaa) et ayant un diamètre maximum de 5mm (**Figure II.1. b**).



a. Sable de dune

b. Sable alluvionnaire

Figure II.1. 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.

Par contre, afin d'extraire le meilleur courbe granulométrique de sable, nous proposons quatre proportions :

- 100% sable de dune (100% SD) ;
- 100% sable alluvionnaire (100% SA) ;
- 50% sable de dune + 50% sable alluvionnaire (50% SD + 50% SA) ;
- 37% sable de dune + 63% sable alluvionnaire (SA = 1.7 SD).

Les résultats de l'analyse granulométrique des deux sables ainsi que leur mélange sont présentés par les **Tableaux II. 1, 2, 3, 4.** et par les courbes granulométriques dans la **Figure II.2. (Photo N° 01 dans l'annexe).**

❖ Sable alluvionnaire

Tableau II.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable alluvionnaire (100% SA).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
5	0.00	0.00	0.00	100.00
4	5.70	5.70	0.30	99.70
3.15	9.40	15.10	0.80	99.20
2.5	14.10	29.20	1.50	98.50
2	21.30	50.90	2.50	97.50
1.6	28.60	79.50	4.00	96.00
1.25	59.20	138.70	6.90	93.10
1	79.00	217.70	10.90	89.10
0.8	190.80	408.50	20.40	79.60
0.63	311.90	720.40	36.00	64.00
0.5	178.00	898.40	44.90	55.10
0.4	591.80	1490.20	74.50	25.50
0.315	141.70	1631.90	81.60	18.40
0.25	110.20	1742.10	87.10	12.90
0.2	99.80	1841.90	92.10	7.90
0.16	100.30	1942.20	97.10	2.90
0.125	32.90	1975.10	98.80	1.20
0.1	17.10	1992.20	99.60	0.40
0.08	5.40	1997.60	99.90	0.10
Fund	2.40	2000.00	100.00	0.00

❖ **Sable de dune****Tableau II.2.** Résultats d'analyse granulométrique du sable de dune (100% SD).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
0.63	0.00	0.00	0.00	100.00
0.5	1.40	1.40	0.40	99.60
0.4	4.80	6.20	1.80	98.20
0.315	17.00	23.20	6.60	93.40
0.25	47.40	70.60	20.20	79.80
0.2	53.90	124.50	35.60	64.40
0.16	73.90	198.40	56.70	43.30
0.125	94.30	292.70	83.60	16.40
0.1	52.60	345.30	98.70	1.30
0.08	3.40	348.70	99.60	0.40
Fund	1.30	350.00	100.00	0.00

❖ **Sable mélange****Tableau II.3.** Résultats d'analyse granulométrique du sable mélange

(SA = 50%, SD = 50%).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
5	0.00	0.00	0.00	100.00
4	1.90	1.90	0.10	99.90
3.15	5.50	7.40	0.40	99.60
2.5	6.80	14.20	0.70	99.30
2	11.30	25.50	1.30	98.70
1.6	15.70	41.20	2.10	97.90
1.25	32.70	73.90	3.70	96.30
1	44.90	118.80	5.90	94.10
0.8	70.40	189.20	9.50	90.50
0.63	96.80	286.00	14.30	85.70
0.5	101.90	387.90	19.40	80.60

0.4	805.00	1192.90	59.60	40.40
0.315	174.80	1367.70	68.40	31.60
0.25	163.60	1531.30	76.60	23.40
0.2	189.00	1720.30	86.00	14.00
0.16	184.00	1904.30	95.20	4.80
0.125	60.70	1965.00	98.30	1.80
0.1	29.30	1994.30	99.70	0.30
0.08	4.30	1998.60	99.90	0.10
Fund	1.40	2000.00	100.00	0.00

Tableau II.4. Résultats d'analyse granulométrique du sable mélange (SA = 1.7 SD).

Dimension N° ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
5	0.00	0.00	0.00	100.00
4	2.30	2.30	0.09	99.91
3.15	7.10	9.40	0.38	99.62
2.5	15.90	25.30	1.01	98.99
2	21.90	47.20	1.89	98.11
1.6	42.70	89.90	3.60	96.40
1.25	87.40	177.30	7.09	92.91
1	92.60	269.90	10.80	89.20
0.8	120.70	390.60	15.62	84.38
0.63	177.90	568.50	22.74	77.26
0.5	159.60	728.10	29.12	77.88
0.4	365.90	1094.00	43.76	56.24
0.315	361.00	1455.00	58.20	41.80
0.25	341.50	1796.50	71.86	28.14
0.2	308.50	2105.00	84.20	15.80
0.16	335.80	2440.80	97.63	2.37
0.125	30.20	2471.00	98.84	1.16
0.1	19.80	2490.80	99.63	0.37
0.08	6.30	2497.10	99.88	0.12
Fund	2.90	2500.00	100.00	0.00

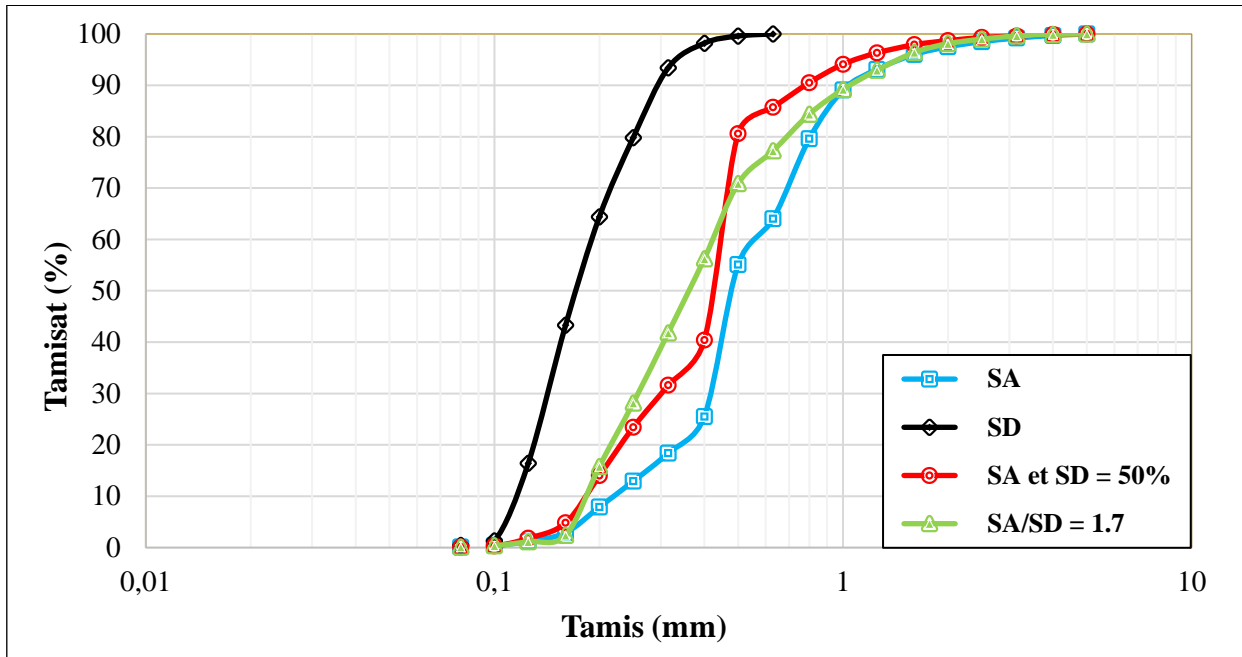


Figure II.2. Courbe granulométrique des sables utilisés.

D'après les courbes granulométriques, les sables utilisés sont toutes continues et montrent clairement que la granulométrie du sable de dune est serrée et constituée de grains fins et la granulométrie du sable alluvionnaire est bien étalée. Par contre les granulométries des deux autres sables (mélange) sont étalées. Néanmoins la granulométrie du sable alluvionnaire-dunaire (SA / SD = 1.7) est bien graduée, sa continuité bien répartie. Donc on a choisi le mélange SA/SD= 1.7 pour la formulation du béton de sable.

II.2.1.2. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

II.2.1.2.1. 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 (**Photo N° 02 dans l'annexe**).

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{II.1.})$$

Où :

γ : Masse volumique apparente ;

M: Masse du matériau ;

V: 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 (**Photo N° 03 dans l'annexe**).

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{II.2.})$$

Où :

γ_s : Masse volumique absolue ;

M_s : Masse du matériau ;

V_s : Volume total du matériau solide.

II.2.1.2.2. Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 et 5. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus (en \%)} \text{ sur les tamis } 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 \text{ et } 5}{100} \quad (\text{II.3.})$$

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

II.2.1.2.3. 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 :

$$ES = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \times 100 \quad (\text{II.4.})$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine : équivalent de sable visuel ESV et équivalent de sable au piston ESP (**Photo N° 04 dans l'annexe**).

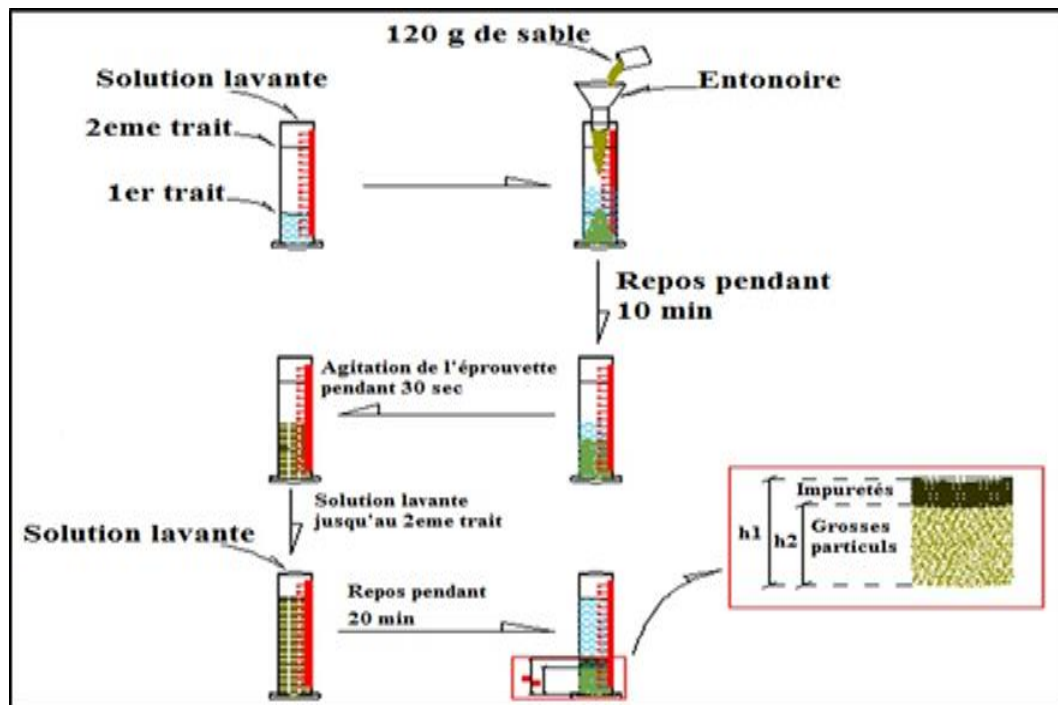


Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

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.5**.

Tableau II.5. 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.2.1.2.4 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.

II.2.1.2.5. Indice des vides

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{P}{(100-P)} \quad (\text{II.6.})$$

Avec P en pourcent (%).

II.2.1.3. Synthèse des résultats

Le **Tableau II.6.**, regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur le sable utilisé.

Caractéristiques	D_{max} (mm)	γ (kg/m ³)	γ_s (kg/m ³)	Mf	C_p (%)	ESV (%)	ESP (%)	p (%)	e (%)
Sable mélange (SA/SD =1.7)	5.00	1577	2570	1.87	61.36	92.02	77.13	38.64	62.97

Le tableau ci-dessus montre que le sable mélange utilisé est très propre si l'on se réfère aux valeurs équivalentes de sable recommandées par la NF P18 598. Le module de finesse de sable (SAD) confirme l'existence de gros grains. Rappelons ici que pour un sable à béton traditionnel, ce module est compris entre 2.20 et 2.80 [Dreux et al., (1998)], De plus, nous notons que le diamètre maximum est plus petit dans le cas de granulats de béton de sable par rapport aux granulats de béton (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 [Chauvin et al., (1988)].

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé dans l'ensemble des essais expérimentales est un ciment portland composé CEM II / B-L 42.5N selon la norme NA 442, le ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (LAFARGE), Bab Ezzouar, Algérie (Figure II.4.).



Figure II.4. Ciment utilisé.

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment inscrite sur la fiche technique sont données dans les Tableaux II.7., 8., 9., et 10.

Tableau II.7. Analyses chimiques (NA 5042)

Paramètre	Valeur
Pert au feu (%)	10.0 ± 2
Résidus insoluble (%)	1.35 ± 0.65
Teneur en sulfates SO ₃ (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7 ± 0.5
Teneur en chlorures (%)	0.02 – 0.05
Teneur équivalent en alcalis (%)	0.3 – 0.75

Tableau II.8. Résistance à la compression (NA 234)

Age	2 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	Différent ≥ 10	≥ 42.5

Tableau II.9. Composition minéralogique du ciment (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C ₃ S	60 \pm 3.0
C ₂ S	15 \pm 3.0
C ₃ A	7.5 \pm 1.0
C ₄ AF	11 \pm 1.0

Tableau II.10. Caractéristiques physiques du ciment MATINE

Caractéristique	Valeurs	Unité
S.S. Blaine (NA 231)	3700 – 5200	Cm ² /g
Consistance normale	26.5 \pm 2.0	%
Début de prise (NA 230)	150 \pm 30	Min
Fin de prise (NA 230)	230 \pm 50	Min
Retrait à 28 jours	< 1000	μ m/m
Expansion	≤ 0.3	Mm
Masse volumique apparente	975	kg/m ³
Densité spécifique	3080	kg/m ³

II.2.3. Filler calcaire

On utilise le filler pour compléter la courbe granulométrique du sable dans la partie fine et à combler les vides. Le filler utilisé dans notre étude est de nature calcaire obtenu par tamisage des restes de concassage (au tamis 80 μ m) d'une carrière située à la sortie nord de la ville de HASSI MESSAOUD (**Figure II.5.**). La masse volumique absolue et apparente du filler utilisé sont respectivement 2500 kg/m³ et 981 kg/m³.



a) Procédure de tamisage.



b) Filler après tamisage.

Figure II.5. Filler calcaire utilisé.

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage pour les bétons de sable, comme 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° 05 dans l'annexe**).

II.2.5. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant algérien du type « MEDAFLOW 30 » produit par la société « GRANITEX », Oued Smar (Wilaya d'Alger) (**Figure II.6.**). C'est une solution liquide se diluant facilement dans l'eau de gâchage et d'un couleur brun clair, conforme à la norme EN 934-2. Le dosage utilisé est 1.5% du poids de ciment. C'est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet de retard de prise. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont présentées dans le **Tableau II.11. [Notice Technique, (2005)] (Photo N° 06 dans l'annexe)**.



Figure II.6. Superplastifiant « MEDAFLOW 30 ».

Tableau II.11. Caractéristiques du superplastifiant.

Type	MEDAFLOW 30
Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité	1.07 ± 0.01
PH	6 – 6.5
Teneur en chlore	< 0.1 g/l
Extrait sec	30 %

II.2.6. Poudre de verre

L'utilisation du verre broyé en substitution partielle du ciment dans le béton est relativement récente. La finesse de la poudre de verre revêt une importance capitale dans son comportement et susceptible d'influencer ses effets sur les principales propriétés du béton.

La poudre de verre de finesse similaire à celle du ciment portland améliore l'ouvrabilité des bétons et les propriétés mécaniques à long terme, recèle un potentiel pouzzolanique intéressant et atténue l'expansion due à la réaction alcali-silice réduit de façon spectaculaire la pénétrabilité des ions chlore des bétons et corrélativement il s'ensuit une amélioration de leurs résistances à la pénétration des agents extérieurs potentiellement agressifs.

Le verre utilisé dans notre étude pour l'extrait la poudre est un verre industriel, le processus de broyage de verre s'est déroulé selon les étapes suivantes (**Figure II.7.**) :

- Collecte de déchets de verre ;
- Concassage de verre en petits morceaux, en utilisant marteau manuel ;
- Mettre le verre concassé dans le broyeur quelque temps ;
- Tamisage de verre à tamis 80 μm , le reste est ramené au broyeur.



Figure II.7. Poudre de verre utilisée.

II.2.6.1. Caractéristiques chimiques et physiques

Les caractéristiques chimiques et physiques de la poudre de verre sont illustrées dans le (**Tableau II.12.** et 13.)

Tableau II.12. Analyse chimique de la poudre de verre [Youcef et al., (2017)].

Eléments	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	LOI (%)
Verre	70.26	0.85	2.03	8.92	1.71	0.18	0.58	5.00	0.62

Tableau II.13. Caractéristiques physiques de la poudre de verre

Caractéristiques	Poudre de verre	Unité
Masse volumique absolue	2570	kg/m ³
Masse volumique apparente	792	kg/m ³
Couleur	Blanc	/

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 et poudre de verre pendant 2.5 minutes à une vitesse lente, puis le sable et le filler calcaire est ajouté pendant 2.5 minutes à une vitesse lente (**Photo N° 07 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 1.5 minutes à vitesse lente. Enfin on ajoute 30% de l'eau de gâchage mélangé avec la quantité de l'adjuvant, pendant 1 minute à une vitesse lente.

Après malaxage, le matériau est introduit dans des moules de (40×40×160) mm³ pour les essais programmés. 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 °C ± 5°C) et l'humidité relative à (50% ± 10%).




II.3.2. Caractérisation du béton frais

II.3.2.1. 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° 08 dans l'annexe**).

Les principes essentiels de l'essai (**Figure II.8.**) :

-  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.9.**).

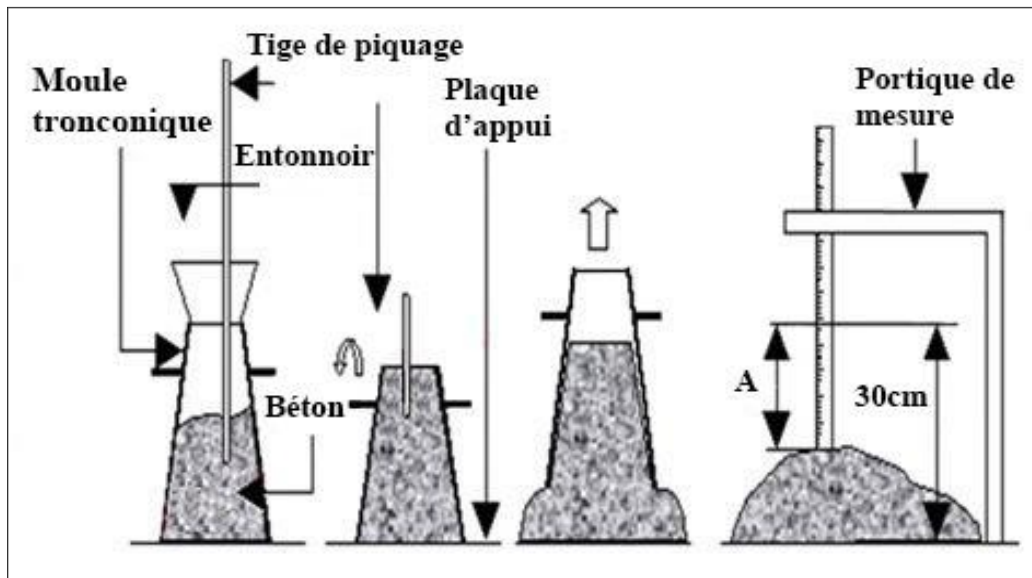


Figure II.8. Dispositif de mesure d'affaissement.



a. Avant le démoulage.



b. Après le démoulage.

Figure II.9. Procédure 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.14**.

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

Tableau II.14. Classes de consistance du béton [Dupain et al., (1995)].

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 :

- ✚ 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, sans 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 :

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

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.

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

Avec :

γ : Masse volumique, en kilogrammes par mètre cube ;

M: Masse de l'échantillon, en kilogrammes ;

V: 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.10.**), l'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion du type " CONTROLAB " ayant une capacité maximale 2000 KN, la vitesse de chargement a été réglée à 0.38 MPa/s jusqu'à la rupture (**Figure II.11.**).

Si F_t est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion, le moment de rupture vaut $(F_t.L)/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est **(Photo N° 09 dans l'annexe):**

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

Avec :

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.

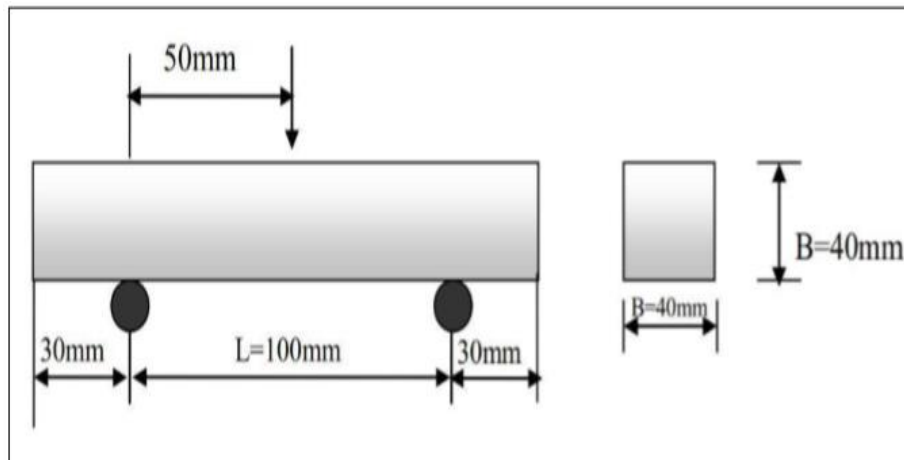


Figure II.10. Schémas de l'essai de rupture par flexion.

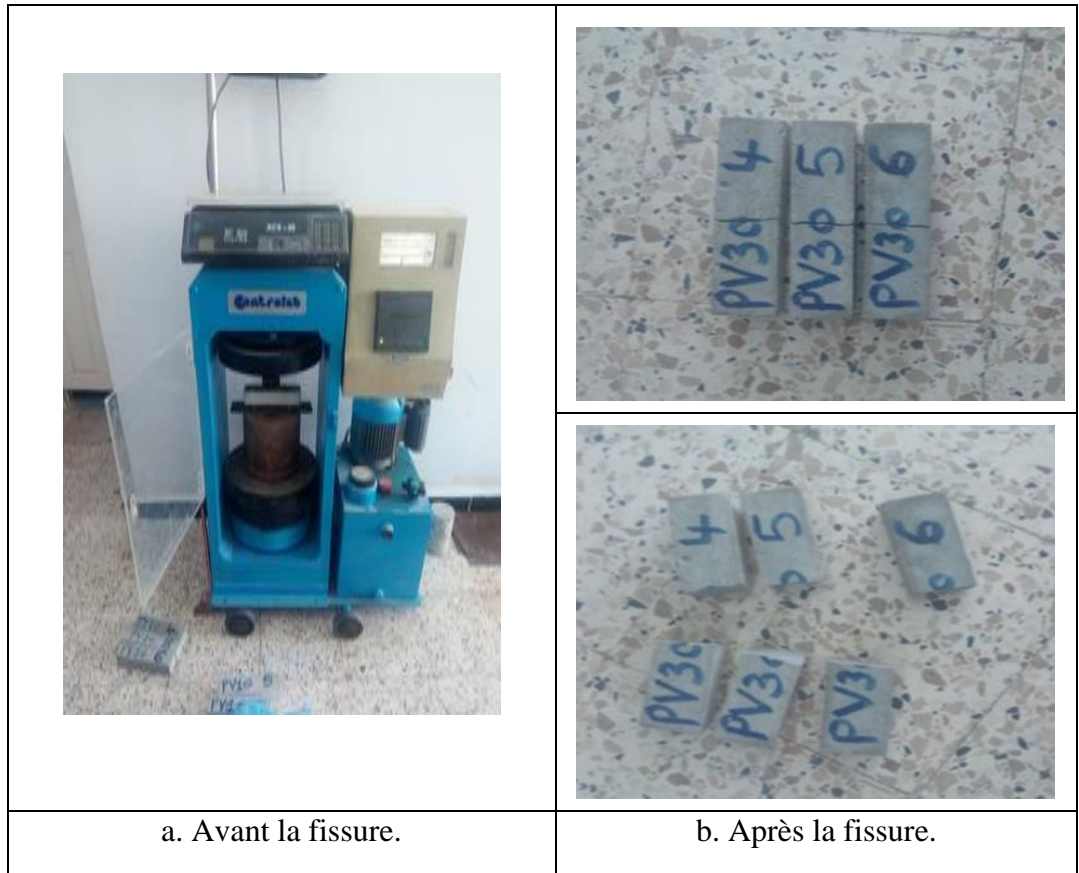


Figure II.11. Procédure de l'essai de rupture par flexion.

II.3.3.3. Essai de rupture par compression

La résistance à la compression est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(40 \times 40 \times 40)$ mm³ à raison de trois éprouvettes par composition (**Figure II.12.**).

Cet essai a été réalisé à l'aide d'une même machine de rupture par flexion (**Figure II.13.**), les éprouvettes 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, 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° 10 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: Force de compression ;

A: Surface transversale de l'éprouvette.

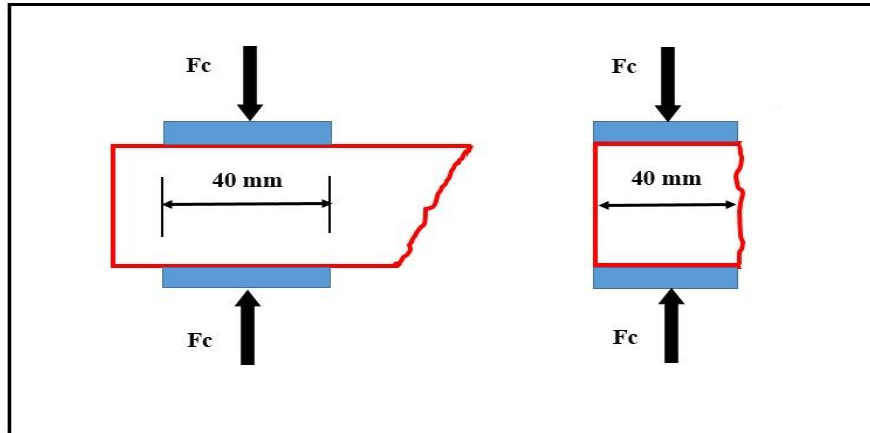


Figure II.12. Schémas de l'essai de compression.



Figure II.13. Procédé de l'essai de rupture par compression.

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

L'absorption par immersion totale 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 70°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 (**Figure II.14.**) :

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



Figure II.14. Procédure de l'essai d'absorption d'eau par immersion totale.

II.4. Conclusion

L'utilisation des matériaux locaux dans la fabrication du béton de sable constitue une alternative économique et technique importante dans certains pays en voie de développement. Le mélange de sable alluvionnaire-dunaire est un sable propre, plus dense et plus compact, ce qui va probablement augmenter les performances des bétons étudiées. Le filler calcaire utilisé est le mieux adapté pour remplir les vides inter-granulaires du sable constituant le squelette du béton.

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 poudre 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 sans et avec poudre 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 d'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 ciment : $M_c = 400 \text{ kg/m}^3$.

Dosage en eau

Le béton étant destiné à la projection, on prendra $E/C = 0.625$; ce qui donne un dosage en eau de $M_{\text{eau}} = 250 \text{ l/m}^3$.

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. Le dosage est fixé par le producteur se situe entre 0.5 à 2 % du poids de ciment, nous prendrons 1.5 % soit $M_{\text{adj}} = 6 \text{ kg/m}^3$.

Détermination du dosage en sable

Après avoir déterminé les valeurs du ciment, de l'eau, de l'adjuvant et d'air (6%), le volume du sable s'obtient en complétant la formule d'un mètre cube (**I.10.**) :

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

On a :

- $V_c = 400/3080 = 0.12987 \text{ m}^3$
- $V_{\text{eau}} = 250/1000 = 0.25 \text{ m}^3$
- $V_{\text{adj}} = 6/1070 = 0.00561 \text{ m}^3$
- $V_{\text{air}} = 6\% = 0.06 \text{ m}^3$.

Donc: $M_s = (1 - (0.12987 + 0.25 + 0.00561 + 0.06)) \times 2570$

- $M_s = 1422.35 \text{ kg/m}^3$

La première formule est définie comme suite :

- $\text{Ciment} = 400 \text{ kg/m}^3$
- $\text{Fines} = 0 \text{ kg/m}^3$
- $\text{Eau} = 250 \text{ l/m}^3$
- $\text{Sable} = 1487.57 \text{ kg/m}^3$
- $\text{Adjuvant} = 8 \text{ kg/m}^3$

Cette formule est caractérisée par une :

- ❖ $\text{MVAT (masse volumique apparente théorique)} = 2078.35 \text{ kg/m}^3$
- ❖ $\text{MVAR (masse volumique apparente réelle)} = 2058.72 \text{ kg/m}^3$
- ❖ $\text{Affaissement} = 16.5 \text{ cm}$

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.11.) :

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

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/m ³)				Affaissement (cm)	MVAT (kg/m ³)	MVAR (kg/m ³)
	Ciment (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)			
1	400	250	6	1422.35	14.5	2078.35	2058.72
2				1402.72	9.0	2058.72	2003.29
3				1347.29	7	2003.29	2026.30
4				1370.30	8	2026.30	2026.18

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 (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)			
400	250	6	1370.30	8	2026.30	2026.18

✚ Détermination du dosage en fines d'addition

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.12.**), 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 (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)		
400	250	6	0	1370.30	8	2026.18
			50	1318.60	17	2116.23
			100	1267.20	21	2136.45
			150	1215.80	22.5	2171.22

400	250	6	200	1164.40	20.5	2133.82
			250	1113.00	15.5	2134.46
			300	1060.60	13	2091.73

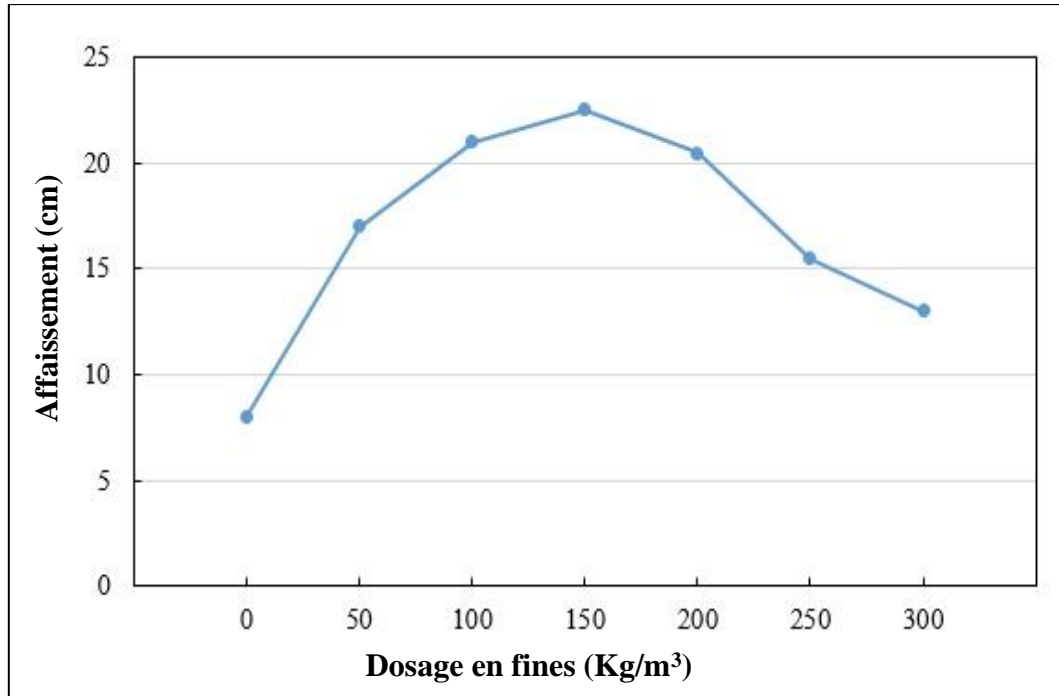


Figure III.1. Affaissement en fonction du dosage en fines.

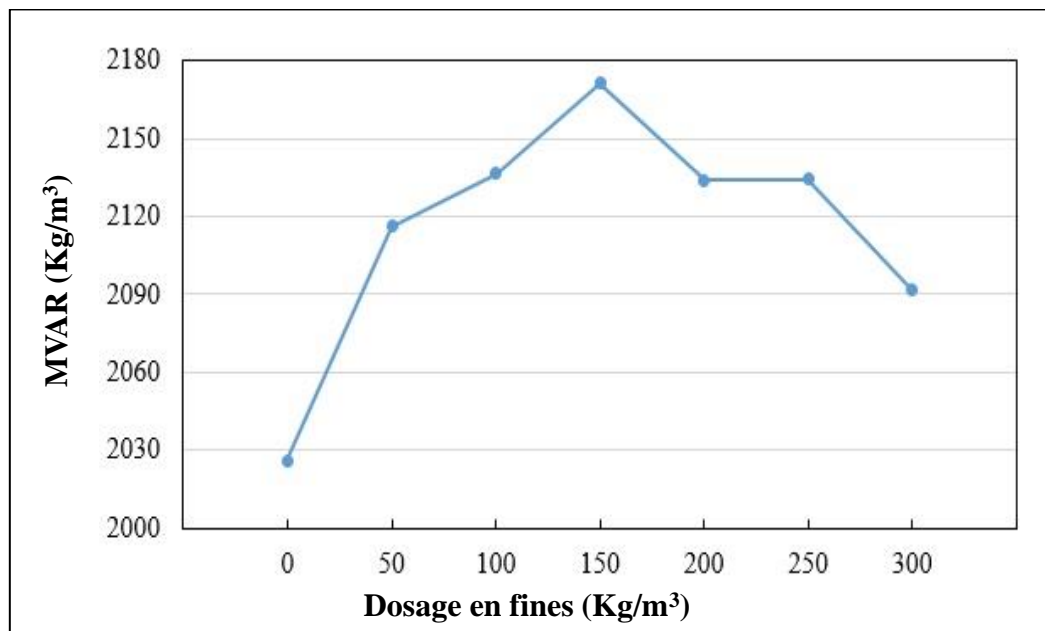


Figure III.2. Masse volumique apparente réelle en fonction du dosage en fines.

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.**, présente 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 150 kg/m³ correspondant à la formule suivante :

- Ciment = 400 kg/m³
- Filler calcaire = 150 kg/m³
- Eau = 250 l/m³
- Sable = 1215.80 kg/m³
- Adjuvant = 6 kg/m³

Cette formule est caractérisée par une :

- ❖ MVAT (masse volumique apparente théorique) = 2021.80 kg/m³
- ❖ MVAR (masse volumique apparente réelle) = 2171.22 kg/m³
- ❖ Affaissement = 22.5 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.12.) pour d'obtenir l'égalité entre MVAT et MVAR.

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

Essai	Dosage des éléments (kg/m ³)					Affaissement (cm)	MVAT (kg/m ³)	MVAR (kg/m ³)
	Ciment (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)			
1	400	250	6	150	1215.80	22.5	2021.80	2171.22
2					1365.22	15.5	2171.22	2102.00
3					1296.00	14.5	2102.00	2102.45

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

- Ciment = 400 kg/m³
- Sable = 1296 kg/m³
- Filler calcaire = 150 kg/m³
- Eau = 250 l/m³
- Adjuvant = 6 kg/m³

Ajustement de la formule optimisée

La maniabilité étant un peu élevée (très plastique), nous procédons donc à la modification en réduisant une dose d'eau (15 litres), nous obtenons la formule :

- Ciment = 400 kg/m³
- Sable = 1296 kg/m³
- Filler calcaire = 150 kg/m³
- Eau = 235 l/m³
- Adjuvant = 6 kg/m³

Caractérisée par un affaissement de 7.5 cm, une MVAT de 2087.16 kg/m³ et une MVAR de 2087.17 kg/m³.

Détermination d'une formule de béton de sable à base de poudre de verre

Les mélanges sont préparés avec des pourcentages de 10% jusqu'au 40% d'un pas de 10% de poudre de verre ; par rapport à la quantité massique du ciment (c-à-d des fractions volumiques de 12% jusqu'au 48% d'un pas de 12% par rapport au volume du ciment). Donc cinq types de bétons ont été choisis pour déterminer l'influence du taux de poudre de verre. Ces bétons sont désignés comme suit :

- Béton de sable sans poudre de verre (**SPV**) ;
- Béton de sable avec 10% de poudre de verre (**PV10**) ;
- Béton de sable avec 20% de poudre de verre (**PV20**) ;
- Béton de sable avec 30% de poudre de verre (**PV30**) ;
- Béton de sable avec 40% de poudre de verre (**PV40**).

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	SPV	PV10	PV20	PV30	PV40
Ciment (kg/m³)	400	360	320	280	240
Sable (kg/m³)	1296	1296	1296	1296	1296
Filler calcaire (kg/m³)	150	150	150	150	150
Poudre de verre (%)	0	10	20	30	40
Eau de gâchage (l/m³)	235	235	235	235	235
Super-plastifiant (%)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

* 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 de poudre 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. Maniabilité des compositions étudiées.

Type de béton	Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
SPV	7.5	Plastique
PV10	7	Plastique
PV20	6.5	Plastique
PV30	6	Plastique
PV40	5.5	Plastique

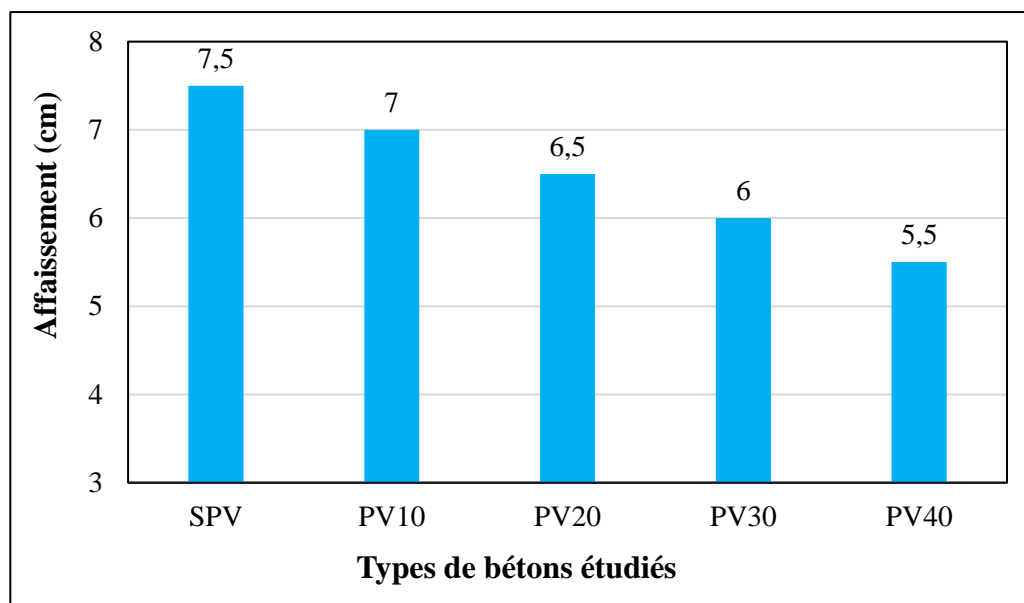


Figure III.3. Maniabilité des compositions étudiées.

D'après les résultats ci-dessus, on remarque que l'ajout de poudre de verre a conduit à une légère diminution d'affaissement, mais 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 de poudre de verre ne présentent pas un effet remarquable sur la maniabilité du béton de sable en comparaison avec le cas de référence SPV.

Shekhawat et al., ont trouvé que la maniabilité est réduite avec l'augmentation le taux de remplacement du ciment, et ont expliqué cette réduction par l'augmentation de la surface de la poudre de verre et aussi la forme angulaire des particules de verre [Shekhawat et al., (2014)].

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. Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés.

Type des bétons étudiés	Masse volumique (kg/m ³)
SPV	2090
PV10	2068
PV20	2033
PV30	2000
PV40	1973

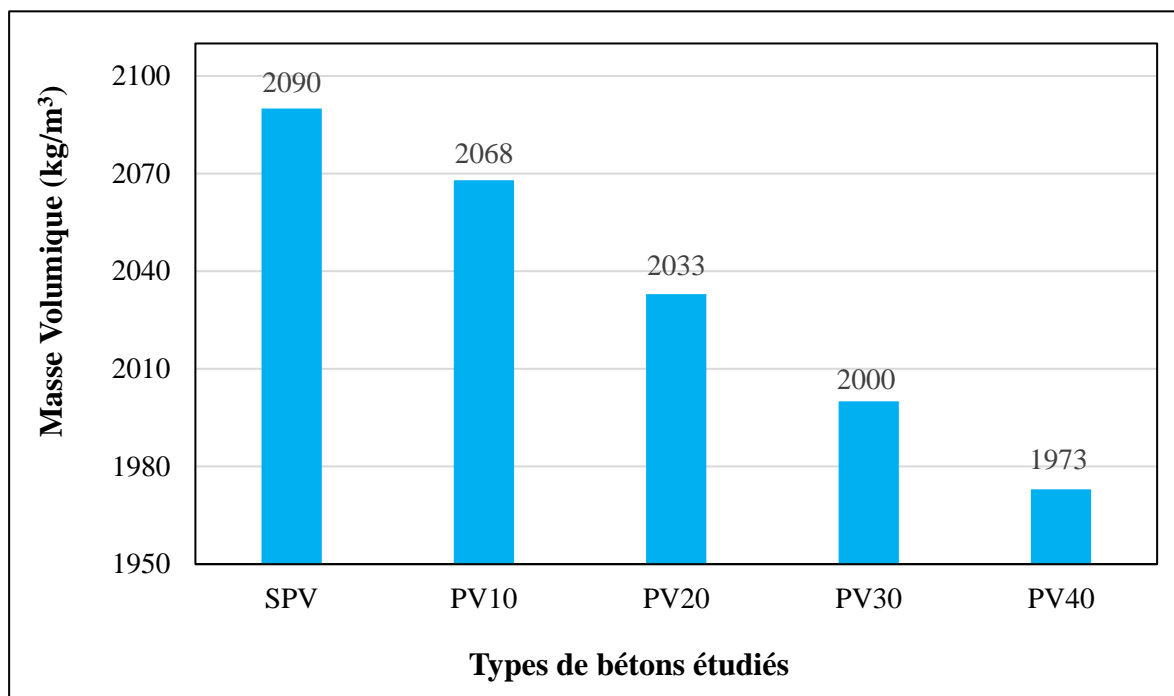


Figure III.4. Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés.

Il est clair que la masse volumique du béton a diminué avec l'augmentation de pourcentage de poudre de verre par rapport au cas de béton sans poudre de verre (SPV). Les taux de diminution enregistrés varient d'environ de 1% (PV10) à 6% (PV40).

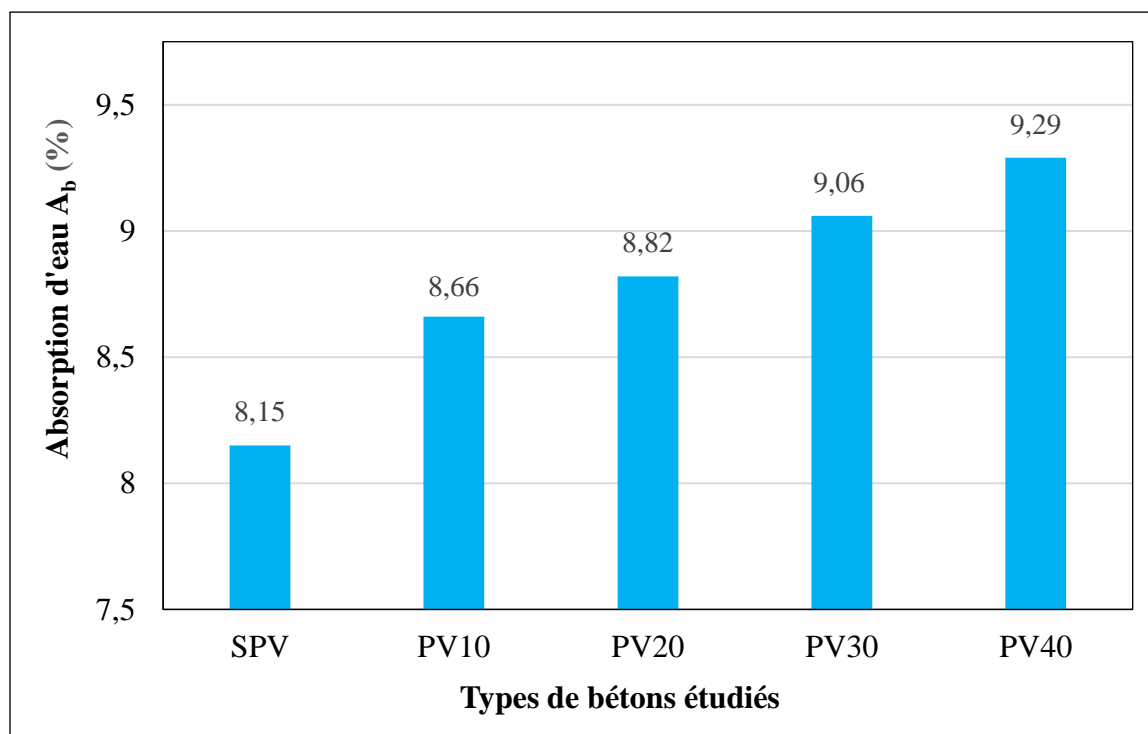
La principale raison de diminution des masses volumiques des bétons confectionnés avec des poudre de verre est bien la densité et la nature de la poudre utilisée. Selon la norme NF EN 206-1, la masse volumique de béton léger est supérieure ou égale à 800 kg/m³ mais inférieure ou égale à 2000 kg/m³. Dans notre cas, nous constatons que la masse volumique du béton de sable reste dans la gamme des bétons légers dans les cas PV30 et PV40 et hors la gamme dans les autres cas.

III.3.2.2. Absorption d'eau par immersion totale

Nous sommes intéressés par cette caractéristique afin de connaître le comportement des bétons à base de poudre de verre en présence d'eau. La capacité d'absorption d'eau d'un béton donne une idée sur la présence des pores. Les valeurs de coefficient d'absorption d'eau par immersion totale 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	SPV	PV10	PV20	PV30	PV40
A_b (%)	8.15	8.66	8.82	9.06	9.29

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

D'après les résultats obtenus, on constate que l'introduction de poudre de verre influe sur la porosité du béton. Il est clair que, le coefficient d'absorption d'eau augmente en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre de verre par rapport à la composition sans poudre de verre SPV. Cette légère augmentation peut être expliquée par l'augmentation des vides dans la matrice.

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

La **Figure III.6.**, présente une relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau des composites étudiés. Elle montre que, l'augmentation de coefficient d'absorption suivi par une diminution de valeur de la masse volumique suivant une équation linéaire : $y = -30.2 x + 2123.4$, avec un coefficient de corrélation très proche de 1 ($R=0.99$).

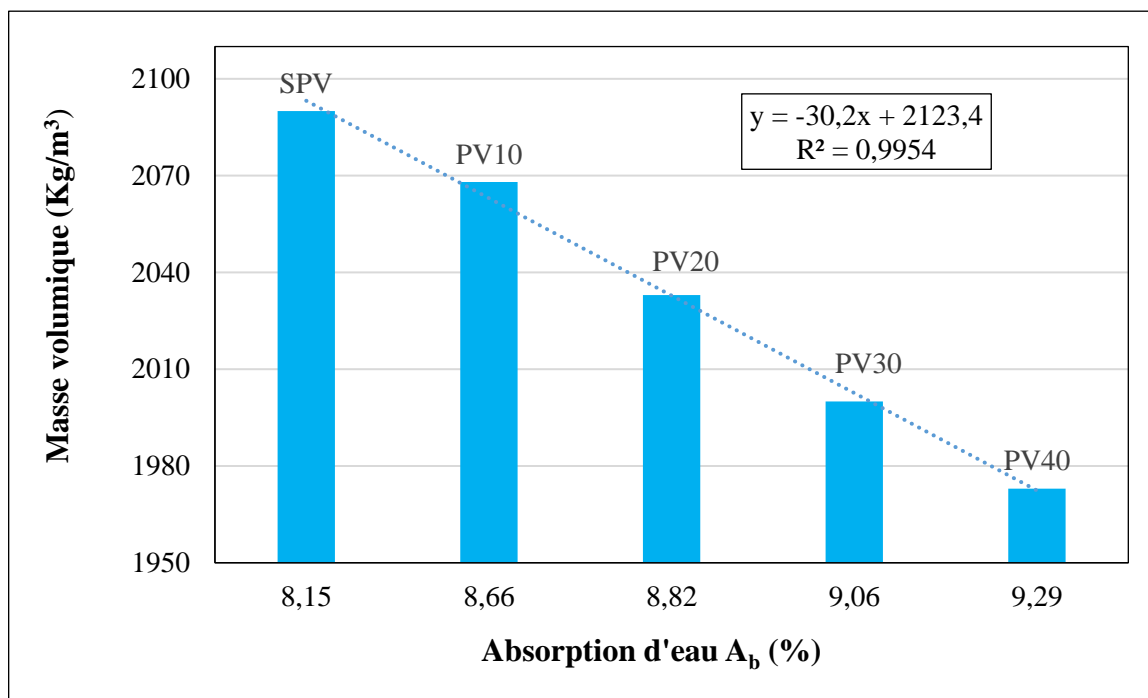


Figure III.6. Relation entre la masse volumique et l'absorption d'eau par immersion.

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 moyennes de la résistance à la flexion mesurées jusqu'à 90 jours des différents types de bétons étudiés.

Tableau III.9. Evolution de la résistance à la flexion à 14, 28 et 90 jours.

Résistance à la flexion en (MPa)			
Compositions	14 jours	28 jours	90 jours
SPV	5.93	6.84	7.10
PV10	6.56	8.90	9.14
PV20	5.62	6.25	6.71
PV30	4.68	5.47	5.85
PV40	4.60	5.37	5.61

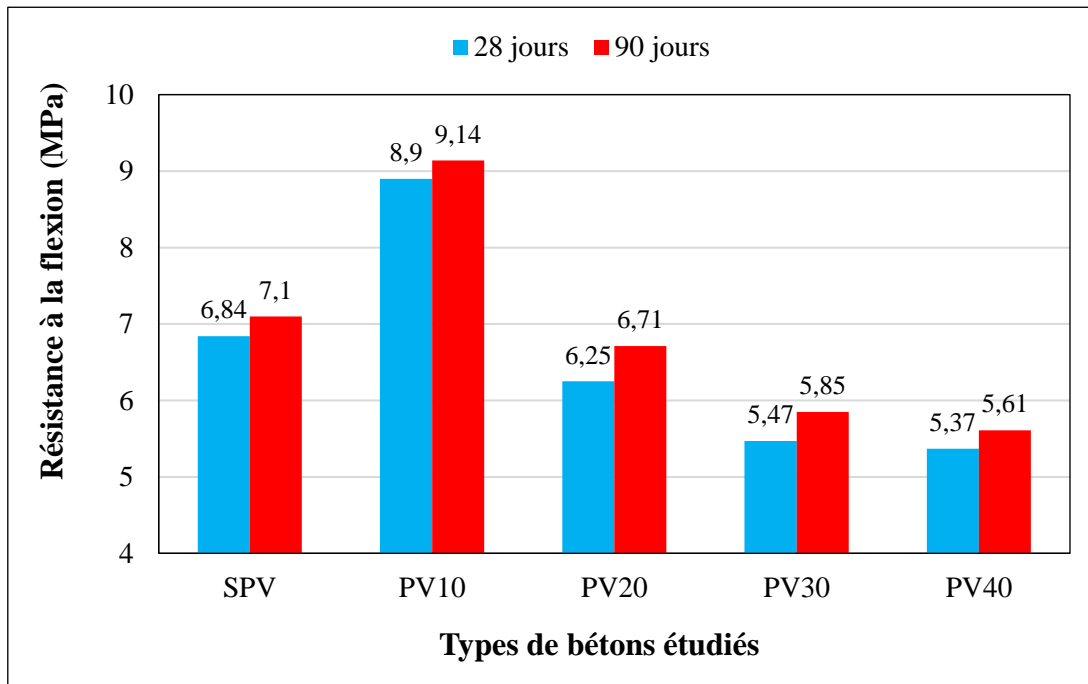


Figure III.7. Evolution de la résistance à la flexion à 28 et 90 jours.

D'après les résultats, on constate que l'ajout de poudre de verre dans le béton de sable a amélioré la résistance à la flexion par rapport au béton de référence (SPV) jusqu'à un seuil de 10% de poudre de verre (cas de PV10), où on a enregistré la valeur maximale de la résistance à la flexion soit 8.90 MPa (à 28 jours) et 9.14 MPa (à 90 jours), avec le pourcentage d'augmentation enregistré est d'environ de 30% (à 28 jours) et de 29% (à 90 jours), Ceci est du probablement à la finesse de la poudre de verre qui a augmenté la réaction pouzzolanique pour former des C-S-H supplémentaires et la combinaison (PV10) semble la plus efficace. Par ailleurs, à delà de 10% de poudre de verre (cas de 20%, 30% et 40%), on note que les valeurs de la résistance à la compression ont tendance à diminuer. La diminution enregistrée peut être expliquée par la mauvaise compacité dans la matrice cimentaire.

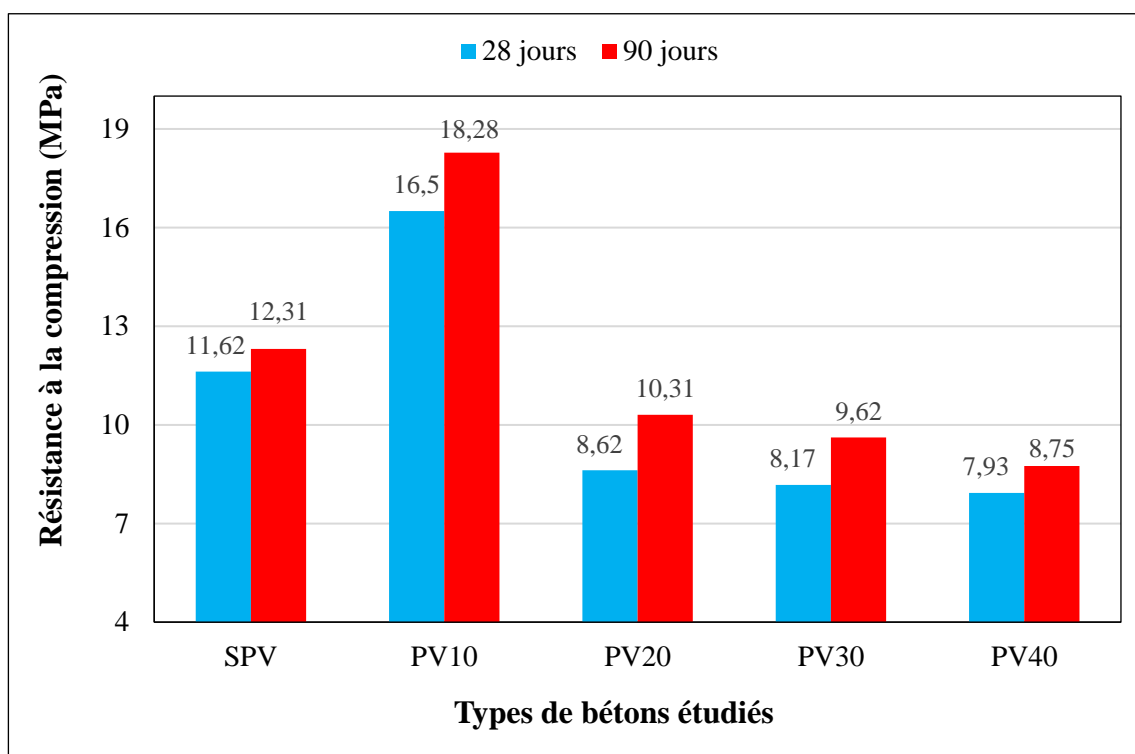
Federico et al., ont démontré l'importance de remplacer les pourcentages de déchets de verre sur la base de certaines études disponibles dans la littérature. Leurs résultats ont montré qu'un remplacement de ciment entre 10% et 20% donnait la plus haute résistance mécanique [Federico et al., (2009)].

III.3.2.4.2. Résistance à la compression

Les valeurs de la résistance à la compression mesurées jusqu'à 90 jours des différents types de bétons étudiés sont présentées dans le **Tableau III.10.**, et la **Figure III. 8.**

Tableau III.10. Evolution de la résistance à la compression à 14, 28 et 90 jours.

Résistance à la compression en (MPa)			
Compositions	14 jours	28 jours	90 jours
SPV	8.81	11.62	12.31
PV10	15.18	16.5	18.28
PV20	7.1	8.62	10.31
PV30	7	8.17	9.62
PV40	6.89	7.93	8.75

**Figure III.8.** Evolution de la résistance à la compression à 28 et 90 jours.

Les résultats obtenus montrent que la poudre de verre amplifie sur la résistance à la compression. Il apparaît clairement que le béton avec de 10% de poudre de verre est meilleur comparé aux autres bétons étudiés, où on a enregistré la valeur maximale de la résistance à la compression soit 16.50 MPa (à 28 jours) et 18.28 MPa (à 90 jours).

Cette amélioration de la résistance peut être expliquée par l'effet physique et chimique de la poudre de verre. La poudre de verre ajuste la granulométrie du ciment, ce qui conduit à l'augmentation de compacité de la pâte (effet physique). De plus, elle présente une réaction

pouzzolanique avec les produits d'hydratation du clinker pour former des C-S-H denses responsables de la résistance (effet chimique).

Raju et al., ont mené une étude similaire en utilisant la poudre de verre en remplacement du ciment dans un pourcentage de 5 à 40% avec un intervalle de 5%. Le béton a été testé pour sa résistance à la compression et à la flexion. Les résultats ont montré qu'avec l'augmentation de la poudre de verre jusqu'à 20%, la résistance augmente et au-delà, elle diminue. Ils ont interprété cette amélioration par la réaction pouzzolanique et l'augmentation de la densité du béton par le remplissage de poudre dans le vide, tandis que les auteurs n'ont pas donné d'explication aux résultats au-delà de 20% de poudre de verre [Raju et al., (2014)].

III.4. Conclusion

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que :

- ❖ L'étude de maniabilité du béton de sable avec la poudre de verre, a montré que celle-ci diminue lorsque le dosage de poudre augmente.
- ❖ L'utilisation de poudre de verre présente une diminution de la masse volumique des bétons étudiés. En particulier, le cas de dosage de 30% et 40% de poudre de verre, où la masse volumique est entre la gamme des bétons légers.
- ❖ L'absorption d'eau par immersion totale augmente avec l'augmentation du dosage de poudre de verre ; ce qui augmente la porosité dans la matrice cimentaire.
- ❖ En termes de propriétés mécaniques, le dosage de 10% de poudre de verre a donné une valeur optimale de résistance à la compression et la résistance à la flexion à 90 jours, où le taux d'augmentation est environ de 48.5% et 9% respectivement par rapport au cas de béton de référence SPV.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail étudie l'exploitation des matériaux locaux et la réutilisation des divers déchets. Il a pour objectif l'étude de l'influence de poudre de verre sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sable. 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 comprennent le filler calcaire et la poudre de verre, 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 obtenus.

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. Également, le recyclage des déchets industriels et la recherche d'ajouts alternatifs locaux sont d'autant plus importants et résoudre des problèmes économiques et techniques. L'incorporation de la poudre de verre dans les bétons permet d'améliorer les propriétés de ces derniers, garantit la conservation de la matière première et une protection de l'environnement.

La caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de notre béton de sable montre que 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 poudre 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 poudre de verre sur diverses caractéristiques du béton de sable étudiés, on a pu conclure les points suivants :

- ✚ Avec le rapport (E/C) est fixe, l'étude de la maniabilité des bétons étudiés a montré qu'il varie avec une augmentation de taux de poudre de verre ;
- ✚ L'ajout de poudre de verre au béton de sable a donné une faiblesse de masse volumique. L'augmentation du pourcentage de poudre de verre suivi par une diminution de la masse volumique du composite. Les valeurs des masses volumiques sont proches de la gamme des bétons légers.
- ✚ L'absorption d'eau par immersion totale a augmenté avec l'augmentation du pourcentage de poudre de verre. Ce qui montre l'effet négatif de la présence de poudre de verre pour la réduction des vides.
- ✚ Les propriétés mécaniques du composite ont montré que l'introduction de poudre de verre ont donné une amélioration remarquable par rapport au béton de référence SPV. Le

dosage de 10% de poudre de verre a donné le meilleur résultat dans la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

D'une façon générale, les résultats trouvés pour le pourcentage de 10% de poudre de verre sont très encourageants et ouvrent des perspectives de recherche prometteuses. Enfin, on propose quelques recommandations pouvant améliorer davantage les propriétés du béton de sable à base de poudre de verre, à savoir :

- L'ajout des fibres avec la poudre de verre, en particulier en termes de réduction des vides dans la matrice cimentaire ;
- Etude de la durabilité.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [**Mathur, (2006)**] Mathur. V.K., (2006). Composite materials from local resources, *Constr. Build. Mater.* 20. 470–477.
- [**Cnerib, (1992)**] CNERIB, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment., (1992). Bétons de sable. Rapport de recherches, Tipaza, Algérie.
- [**Afnor, (1987)**] AFNOR., (1987). Bétons- Bétons de sable. Projet P 18-500.
- [**Lin et al., (2009)**] Lin. K.L., Huang. W.J., Shie. J.L., Lee. T.C., Wang. K.S., & Lee. C.H., (2009). The utilization of thin film transistor liquid crystal display waste glass as a pozzolanic material. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 916-921.
- [**Lee et al., (2008)**] Lee. M.Y., Ko. C.H., Chang. F.C., Lo. S.L., Lin. J.D., Shan. M. Y., & Lee. J.C., (2008). Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 583-587.
- [**Sobolev et al., (2006)**] Sobolev. K., Türker. P., Soboleva. S., Iscioglu. G., (2006). Utilization of waste glass in ECO-cement: strength properties and microstructural observations. *Waste Management* 27 (7), 971–976.
- [**Shi et al., (2007)**] Shi. C., & Zheng. K., (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234-247.
- [**Chen et al., (2002)**] Chen. G., Lee. H., Young. K.L., Yue. P.L., Wong. A., Tao. T., Choi. K.K., (2002). Glass recycling in cement production – an innovative approach. *Waste Management* 22 (7), 747–753.
- [**Rakshvir et al., (2006)**] Rakshvir. M., Barai. S.V., (2006). Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research* 24 (3), 225–233.
- [**Schwarz et al., (2008)**] Schwarz. N., Cam. H. et Neithalath. N., (2008). Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496.
- [**Nassar et al., (2012)**] Nassar. R, Soroushian P., (2012). Résistance et durabilité du béton de granulats recyclés contenant du verre broyé en remplacement partiel du ciment. *Construction et matériaux de construction.* 29, 368–377.
- [**Aly et al., (2012)**] Aly. M, Hashmi. M.S.J, Olabi. A.G, Messeiry. M, Abadir. E.F, Hussain. A.I., (2012). Effet de la nano-silice colloïdale sur le comportement mécanique et physique du mortier de ciment pour verre usé. *Matériaux et design.* 33, 127-135.
- [**Idir et al., (2010)**] Idir. R., Cyr. M., Tagnit-Hamou., A., (2010). Can we massively reuse glass in concrete? Properties of glass concrete. *Verre*, 16(5), p. 70-77.
- [**Achoura, (2005)**] Achoura. D., (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.

[**Sablocrete, (1994)**] Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées., (1994). Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation. Projet « SABLOCRETE ».

[**Benaissa, (1992)**] Benaissa. A., (2009). Déformations différées d'un béton de sable. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. Laboratoire régional des ponts et chaussées.

[**Bederina, (2007)**] Bederina. M., (2007). Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger.

[**Afnor, (1995)**] AFNOR., (1995). Bétons- Bétons de sable. Projet P 18-500.

[**Benmalek et al., (2009)**] Benmalek. M.L., Derbala. R., (2009). Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous-produits industriels ; université de Skikda et Guelma (Algérie).

[**Benabed et al., (2005)**] Benabed. B., Azouz. L., Damene. Z., (2005). Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base du sable de dune, colloque CMEDIMAT.

[**Elhachem, (1990)**] Elhachem. M., (1990). Etude de l'influence de la fibre de fonte sur le fluage et le retrait du béton. Thèse de doctorat, de l'E.C.P.

[**Swamy et al., (1985)**] Swamy. R.N., Bahia. H.M., (1985). The effectiveness of steel fiber as shear reinforcement. USA. Concr. Inst. Des. Const. Vol 7, N°:3.

[**Valade, (1987)**] Valade. T.H., (1987). Comportement des bétons armés de fibres métalliques. Mémoire de recherche développement. ENS de CACHAN.

[**Laquerbe et al., (1999)**] Laquerbe. M., Cisse. I., (1999). Caractérisation des bétons de sable routiers compactés : application a cas du Sénégal ; Matériaux et construction ; volume 32 ; pp.151-157.

[**Ghrieb, (2003)**] Ghrieb. A., (2003). Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques. Thèse de magister, ENP. Alger.

[**Chauvillard et al., (1996)**] Chauvillard. G., Bssuvaux. O., (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, Sept- Oct.

[**Benaissa et al., (1992)**] Benaissa. A., Morlier. P., Tram. V., (1992). Le béton de sable, un matériau non fissurant. Algérie équipement, N°6, pp7-11.

[**Belmecheri, (2012)**] Belmecheri. O.H., (2012). Etude d'un composite à base de sable de dune, Ciment et granulats en billes de polystyrène expansé. Université Amar Telidji Laghouat.

[**Gluais et al., (1993)**] 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.

[**Dreux et al., (1998)**] Dreux. G., Festa. J., (1998). Nouveau guide du Béton et de ses constituants. Eyrolles Huitième édition, Paris.

[**Duval, (1974)**] Duval. C., (1974). Le verre que sais-je. Edition paris.

[**Jeans, (2001)**] Jeans. L., (2001). Barton : composition verrières, l'évolution des verres industriels, revue verre vol 7. N°2 Institue de verre.

- [Souleymane, (2019)]** Souleymane. A.B.B., (2019). L'influence de la poudre de verre sur le comportement physique et mécanique des mortiers ordinaires, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [Debabi et al., (2017)]** Debabi. A., Boulifa. Marwa., (2017). Utilisation de poudre de verre dans le mortier. Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [Zoubiri, (2016)]** Zoubiri. A., (2016). Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet de l'âge. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [Lamali et al., (2017)]** Lamali. B., Chabi. M., (2017). Valorisation de la poudre de verre dans un béton ordinaire destiné Pour la précontrainte, Université de M'hamed Bougara –Boumerdes.
- [Abdalla, (2012)]** Abdalla. A.H., (2012). Optimisation et Performance des Betons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland. Pro Quest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada).
- [Idir et al., (2011)]** Idir. R., Cyr. M., Tagnit-Hamou. A., (2011). Pozzolanic properties of fine and coarse colormixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 19-29.
- [Jain, (2010)]** Jain. J.A., Neithalath. N., (2010). Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 148-156.
- [Shao et al., (2000)]** Shao. Y., Lefort. T., Moras. S., Rodriguez. D., (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91-100.
- [Shayan, (2004)]** Shayan. A., Xu. A., (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81-89.
- [Shayan, (2006)]** Shayan. A., Xu. A., (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cem. and Con. Research*, 36(3), 457-468.
- [Shi et al., (2005)]** Shi. C., Wu. Y., (2005). Mixture Proportioning and Properties of Self-Consolidating Lightweight Concrete Containing Glass Powder. *ACI Materials Journal*, (102).
- [Taha, (2008a)]** Taha. B., Nounu. G., (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Const. and Building Materials*, 22(5), 713-720.
- [Taha, (2008b)]** Taha. B., Nounu. G., (2008). Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 497-505.
- [Zidol, (2009)]** Zidol. A., (2009). Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke.
- [Pawel et al., (2015)]** Pawel. S.b., Elzbieta. H., Teresa. R., (2015). The effect of nanosilica and titanium dioxide on the mechanical and self-cleaning properties of waste-glass cement mortar. Warsaw University of Technology, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warsaw, Poland.
- [Rachida et al., (2009)]** Rachida. I., Martin. C., Arezki. T., (2009). Peut-on valoriser massivement le verre dans les bétons? Etude des propriétés des bétons de verre, rapport. Centre d'Etudes Techniques Université de Toulouse France.
- [Zidol, (2009)]** Zidol. A., (2009). Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke.

- [**Xu et al., (2006)**] Xu. A., Shayan. A., (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*.
- [**Kosmatka, (2008)**] Kosmatka. S.H., Kerkhoff. B., & Panarese. W.C., (2008). *Design and Control of Concrete Mixtures* (14^{ème} éd.). Consulté sur.
- [**Chauvin et al., (1988)**] Chauvin. J.J., Grimaldi. G., (1988). Les bétons de sable. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)*, N°157, pp. 9-15.
- [**Notice Technique, (2005)**] Superplastifiant MEDAFLOW 30., (2005). Granitex, pp. 93.
- [**Youcef et al., (2017)**] Youcef. N., Djamel Eddine. G., (2017). Etude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les caractéristiques physique et mécanique des mortiers. Université Ziane Achour de Djelfa.
- [**Dupain et al., (1995)**] Dupain. R., Lanchan. R., Saint-Arroman J.C., (1995). *Granulats, sols, ciment et bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par mes essais de laboratoire*. Edition Casteilla.
- [**Raju et al., (2014)**] Raju. S., Kumar. P.R., (2014). Effect of using glass powder in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 31, 21–427.
- [**Shekhawat et al., (2014)**] Shekhawat. B.S., Aggarwal. V., (2014). Utilisation of waste glass powder in concrete– A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3, 14822–14826.
- [**Federico et al., (2009)**] Federico. L.M., Chidiac. S.E., (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete e critical review of treatment methods. *Cement & Concrete Composites*, 31, 606-610.

ANNEXE

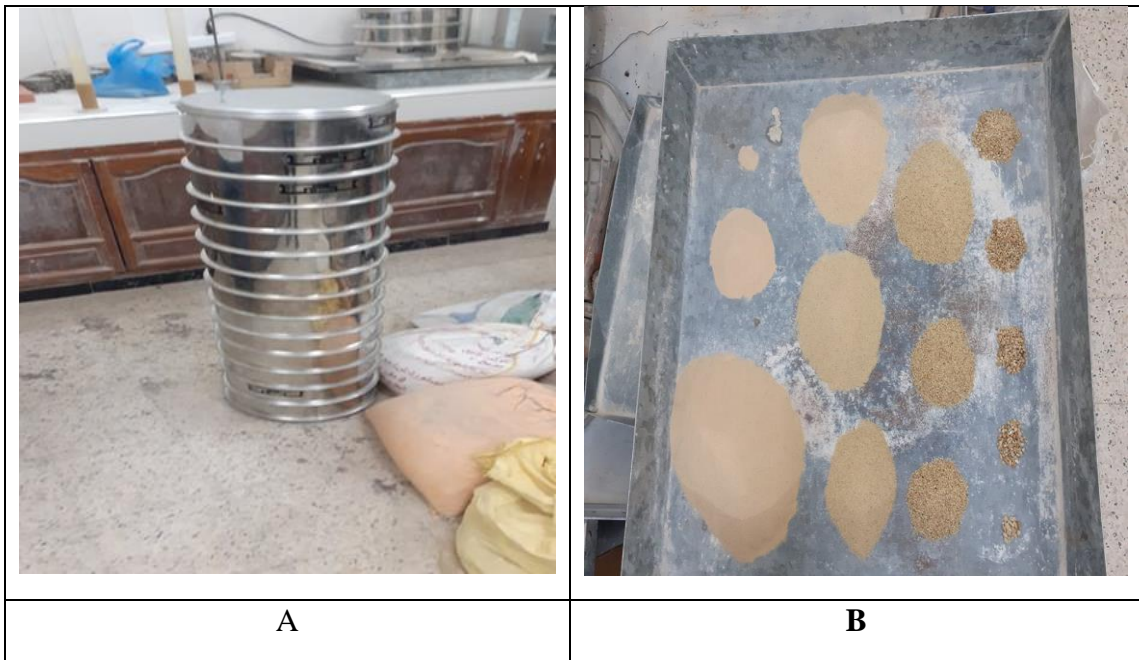


Photo N° 01. Essai d'analyse Granulométrique

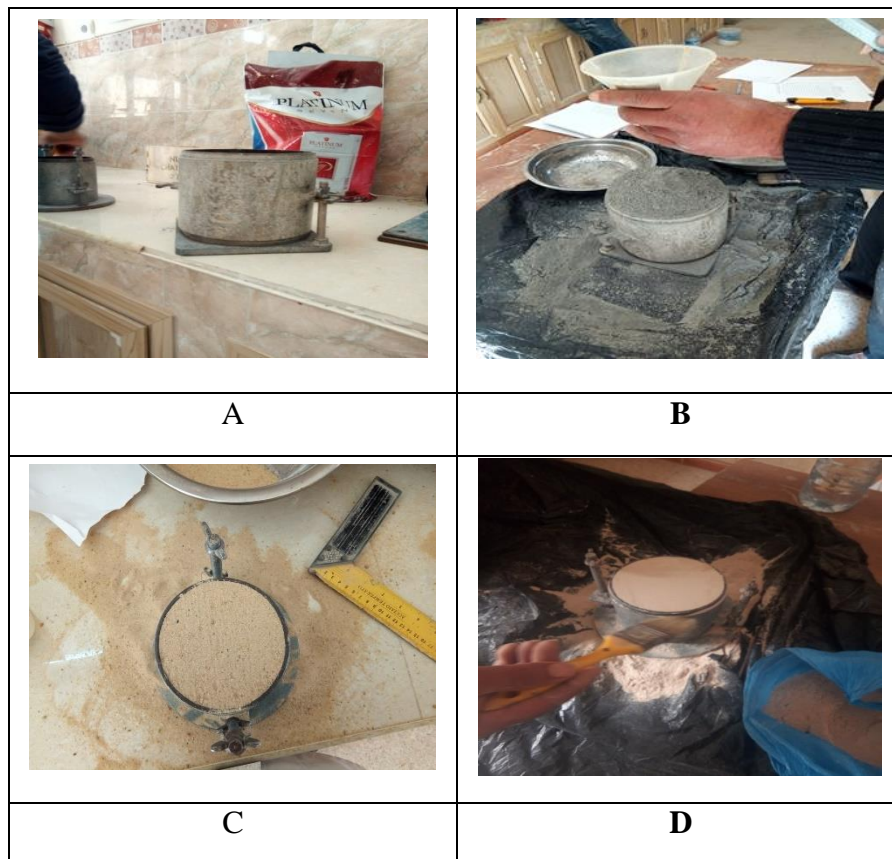


Photo N° 02. Masse volumique apparente

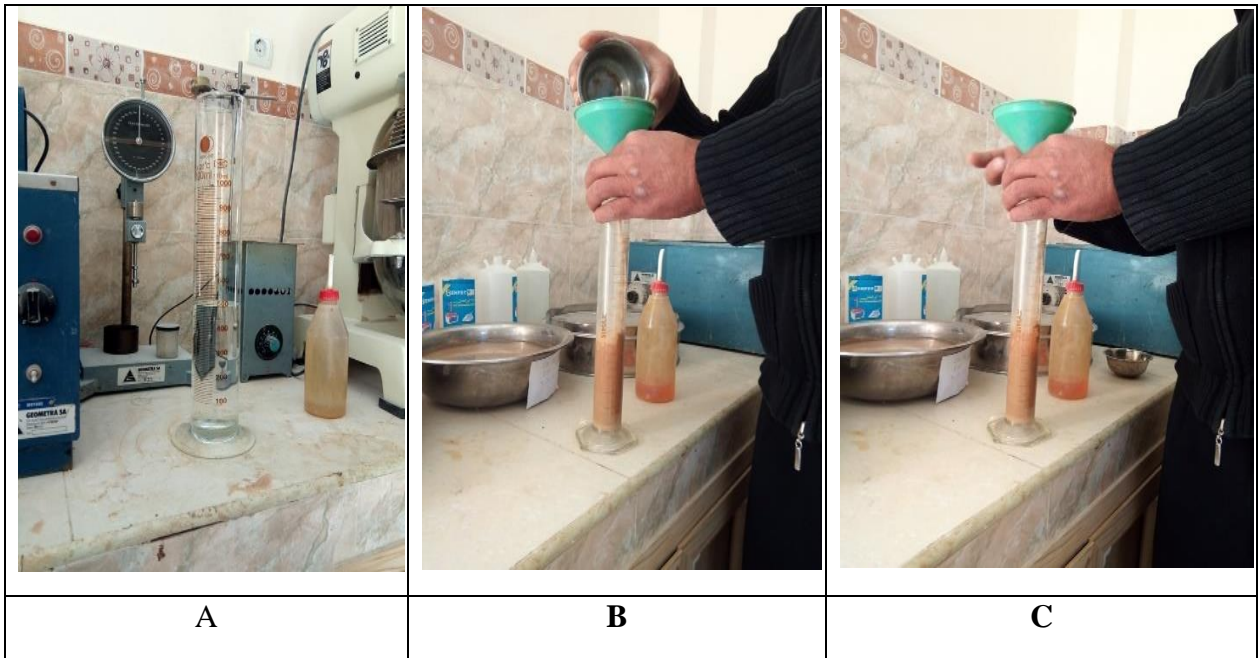


Photo N° 03. Masse volumique absolue

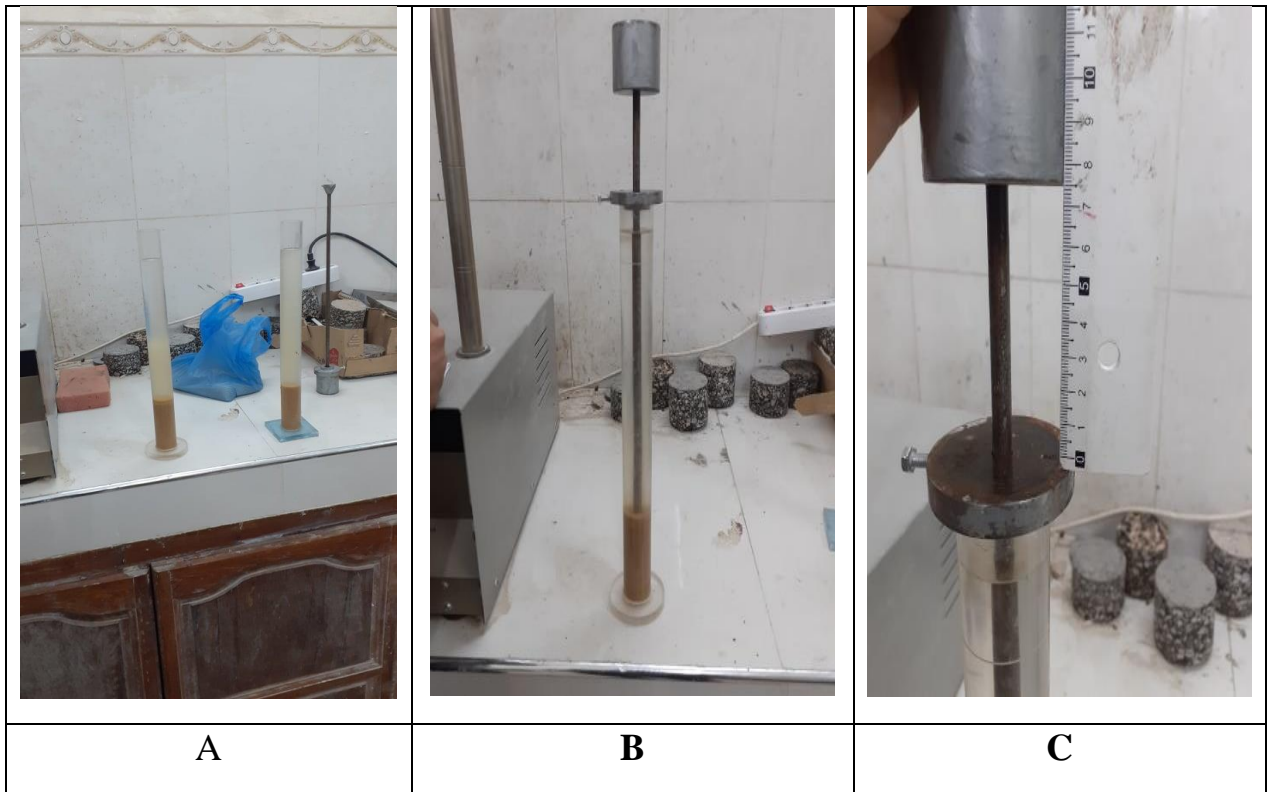


Photo N° 04. Equivalent de sable

MINISTÈRE DES RESSOURCES EN EAU E.P ALGERIENNE DES EAUX UNITE D'OUARGLA CENTRE DE TOUGGOURT	 ADE	STATION DE DEMINERALISATION TOUGGOURT
--	--	---

FICHE D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUE

MOIS :mars.....2020

Prélèvement de forage : eau...EL Oued.....

Date : 11/03/2020...à.....09

(EauBrute.....)

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES							
Paramètre	Unité	Concentration				Normes pour les Eaux de boisson	
		Brute	Traitée	osmoses	Traité stocké	Min	Max traité
Température	°C	19					30
pH	-	7.7				7.5	8.5
Conductivité à 20°C	µs/Cm	3160					1000
Turbidité	NTU	0.11					0.4
Dureté Total HT	mg/lCaCO ₃	900					500
Salinité	0%	1.6				0.3	0.6
TDS	mg/l	2085				300	600
Alcalinité	mg/lCaCO ₃	124				50	150
Sulfate SO ₄	mg/l	916					400
Potassium K ⁺	mg/l	11					20
Sodium Na ⁺	mg/l	/					200
Calcium ca ⁺	mg/lCaCO ₃	/					200
Silicate Si	mg/l	51					200
Magnésium Mg ²⁺	mg/l	/					150
Chlore cl ₂	mg/l	/				0.2	0.6
Chlorure	mg/l	1005					500
Fer Fe	mg/l	0.04					0.3
Résidu sec à 105 c°	mg/l	2115.061					2000
PARAMETRES INDESIRABLES							
Paramètre	Unité	Concentration				Normes pour les Eaux de boisson	
		Brute	Traité			Min	Max
Aluminium Al ³⁺	mg/l					-	0.2
Ammonium NH ₄ ⁺	mg/l					-	0.5
Nitrate NO ₃ ⁻	mg/l					-	50
Nitrite No ₂ ⁻	mg/l					-	0.2
Zn ⁺²	mg/l					-	5
SO ₄ ⁻²	mg/l					-	400
K ⁺	mg/l					-	12

Commentaire

Photo N° 05. Analyses physico-chimiques d'eau utilisé.

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant
Haut réducteur d'eau**

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

DOMAINES D'APPLICATION

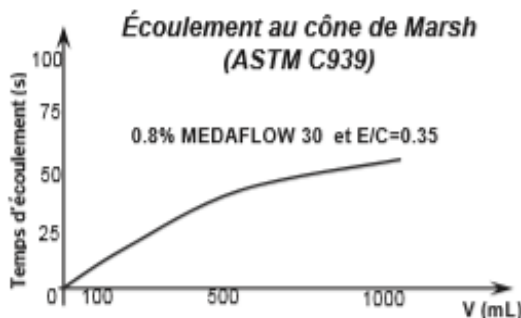
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçants
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



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.

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6 – 6,5
- Densité 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 30%

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** 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 déjà été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,46 à 1,85 litre pour 100 Kg de ciment.

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



NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

MEDAFLOW 30**CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE**

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, fûts de 210 Kg et 240 Kg, cubitenaire 1100kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).
Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

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 Avril 2005.

NB : Les produits à base de polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

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.

**Granitex**

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



59

Photo N° 06. Fiche technique d'adjuvant utilisé (MEDAFLOW 30).



A



B



C



D

Photo N° 07. Malaxage et moulage.

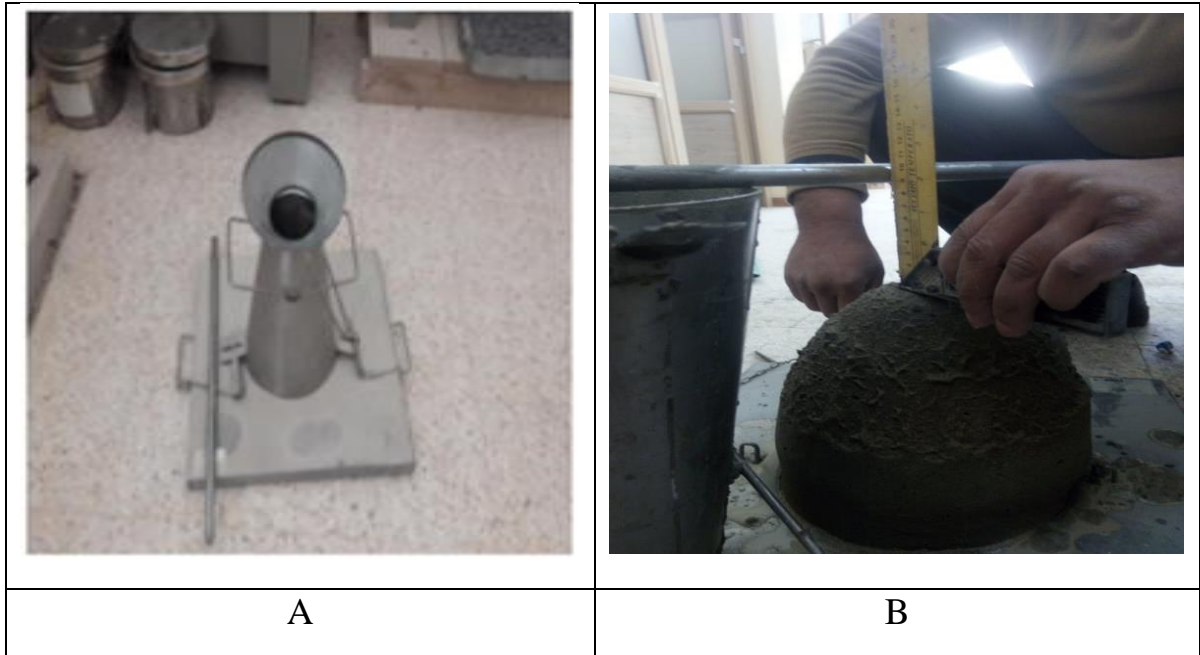


Photo N° 08. Cône d'Abrams.

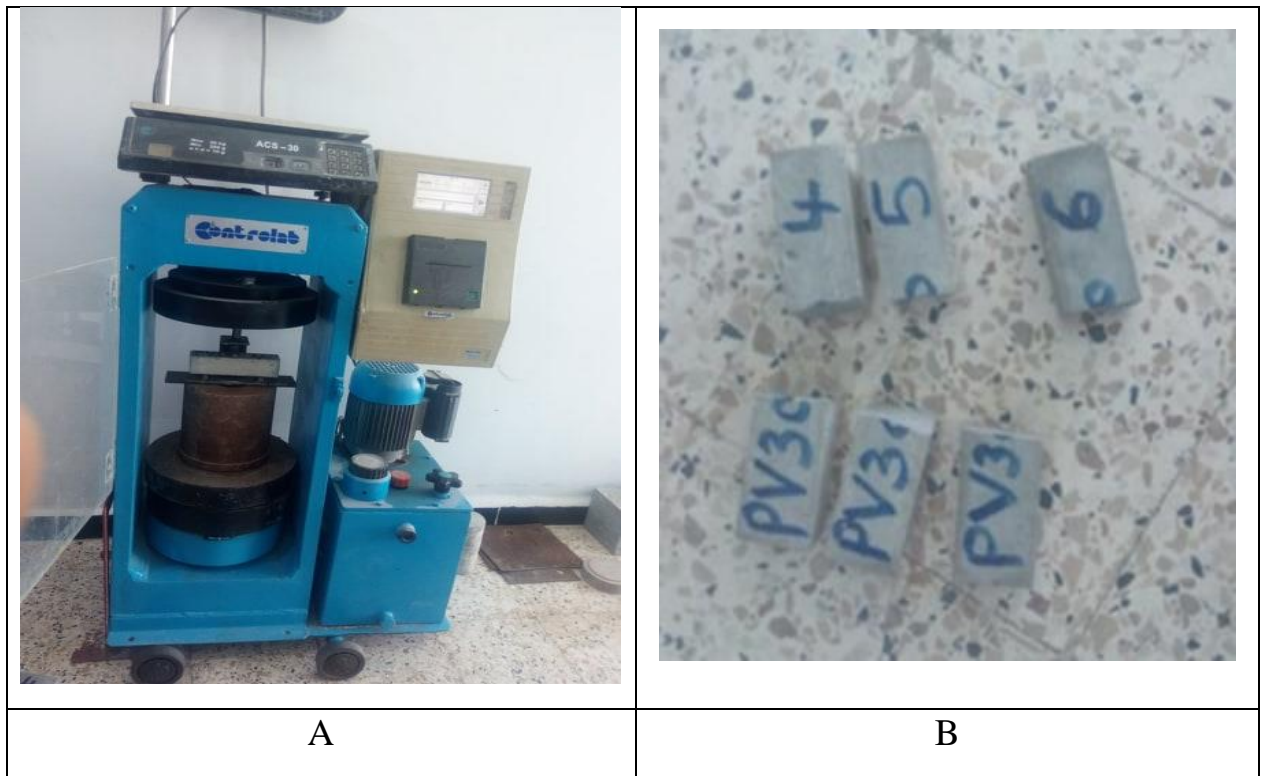


Photo N° 09. Essai de flexion (3 points).



Photo N° 10. Essai de compression.