

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL OUED

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par :

KHEZZANE Hiyam

ZELLOUMA Reguia

THEME

**Etude de la durabilité d'un béton de sable
à base de poudre de verre**

JURY :

Monsieur **MASMOUDI Faouzi**

Président du jury

U. EL OUED

Madame **HACHEM Rafika**

Examinatrice

U. EL OUED

Monsieur **Dr. AMMARI M. Seghir**

Rapporteur

U. EL OUED

----- **Promotion : Juin 2021** -----

DEDICACE

Je tiens à dédier ce modeste travail à vous mes chers parents lumière de mes yeux, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit, vous étiez toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

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.

Khezzane Hiyam

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout, je tien à remercies le bon Dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie.

A ceux qui sont les plus chers du monde, ma mère et mon père, à qui je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, que dieu les protège, à toute ma famille et à mes amis.

ROUKAIA ZELLOUMA

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous donné le courage et la volonté pour mener ce travail à terme.

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 exprimons notre reconnaissance à Monsieur **MASMOUDI Faouzi** et Madame **HACHEM Rafika**, Maîtres d'assistances à l'Université d'EL-OUED, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de revoir ce travail.

Nous exprimons également nos remerciements et notre reconnaissance aux responsables des laboratoires : **NIZOLAB** (El-Oued) ; « **LRGC** » Laboratoire de Recherche de Génie Civil (Université de Laghouat) ; « **SREML** » Laboratoire de Matériaux et Réhabilitation de Structures (Université de Laghouat) ; « **LPCMA** » Laboratoire Physico-Chimie des Matériaux Avancés (Université de Biskra) ; « **LEVRES** » Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des Ressources Energétiques Sahariennes (Université d'El-Oued), pour l'aide qu'ils nous ont apportée pendant la phase expérimentale de notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

SOMMAIRE

Résumés	v
Nomenclature	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. Introduction	4
I.2. Béton de sable	4
I.2.1. Introduction	4
I.2.2. Aperçu historique	4
I.2.3. Définition	6
I.2.4. Constituants du béton de sable	6
I.2.4.1. Sables	6
I.2.4.2. Ciment	7
I.2.4.3. Eau de gâchage	7
I.2.4.4. Fines d'ajouts	7
I.2.4.5. Adjuvants	8
I.2.4.6. Autres ajouts	8
I.2.5. Propriétés essentielles du béton de sable	9
I.2.5.1. Compacité	9
I.2.5.2. Maniabilité	10
I.2.6. Comportements mécaniques	12
I.2.7. Durabilité	12
I.2.8. Domaines d'utilisation des bétons de sable	13
I.2.8.1. Fondations profondes	13
I.2.8.2. Bâtiment	14
I.2.8.3. Autres applications	14
I.2.9. Formulation d'un béton de sable	15
I.2.9.1. Définition	15
I.2.9.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable	16
I.2.9.3. Méthode expérimentale de formulation	22

I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire	25
I.4. Valorisation des déchets dans le domaine de génie civil	26
I.4.1. Définition	26
I.4.2. Méthodes de la valorisation	27
I.4.2.1. Valorisation matière	20
I.4.2.2. Valorisation énergétique	27
I.4.2.3. Valorisation chimique	27
I.4.3. Différents déchets utilisés en génie civil	27
I.4.3.1. Déchets inertes (DI)	28
I.4.3.2. Déchets ménagers et assimilés (DMA)	28
I.4.3.3. Déchets industriels banals (DIB)	28
I.4.3.4. Déchets industriels toxiques	28
I.4.3.5. Déchets industriels spéciaux (DIS)	28
I.5. Valorisation des déchets de verre	28
I.5.1. Définition du verre	28
I.5.2. Valorisation des verres dans les bétons	29
I.5.3. Propriétés des verres	30
I.5.3.1. Propriétés physiques	30
I.5.3.2. Propriétés thermiques	30
I.5.3.3. Propriétés chimiques	30
I.5.4. Réaction pouzzolanique du verre	31
I.6. Effet de la poudre de verre sur le comportement mécanique du béton	31
I.6.1. Définition de poudre de verre	31
I.6.2. Résistance à la compression	30
I.6.3. Résistance à la flexion	33
I.7. Conclusion	33
CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES	
II.1. Introduction	35
II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés	35
II.2.1. Sable	35
II.2.1.1. Analyse granulométrique	36
II.2.1.2. Caractéristiques physiques	37
II.2.1.3. Caractéristiques chimiques	39
II.2.2. Ciment	40
II.2.3. Filler calcaire	41
II.2.4. Poudre de verre	43

II.2.5. Eau de gâchage	44
II.2.6. Adjuvant	44
II.3. Techniques expérimentales	45
II.3.1. Malaxage et conservation	45
II.3.2. Caractérisation du béton frais	45
II.3.2.1. Maniabilité	45
II.3.3. Caractérisation du béton durci	47
II.3.3.1. Masse volumique apparente	47
II.3.3.2. Résistance à la compression	47
II.3.3.3. Variations dimensionnelles	48
II.3.3.4. Caractéristiques thermiques	49
II.3.3.5. Analyse de la microstructure	50
II.3.3.5.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	50
II.3.3.5.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	51
II.3.3.6. Essai de la carbonatation accélérée	51
II.3.3.7. Essai d'absorption d'eau par immersion totale	53
II.3.3.8. Essai d'absorption d'eau par capillarité	54
II.3.3.9. Essai « gel – dégel »	55
II.3.3.10. Essai « mouillage – séchage »	55
II.3.3.11. Résistance aux milieux acides (5% HCl)	56
II.4. Conclusion	58
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	
III.1. Introduction	59
III.2. Compositions des bétons étudiés	59
III.3. Caractérisation du béton frais	60
III.3.1. Etude de la maniabilité	60
III.3.2. Caractérisation du béton durci	61
III.3.2.1. Masse volumique	61
III.3.2.2. Résistance à la compression	62
III.3.2.3. Variations dimensionnelles	63
III.3.2.4. Caractérisation thermique	64
III.3.2.5. Analyse de la microstructure	65
III.3.2.5.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	65
III.3.2.5.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	67
III.3.2.6. Essai de la carbonatation accélérée	68
III.3.2.6.1. Mesure de l'épaisseur du béton carbonaté	68

Sommaire

III.3.2.6.2. Evolution du gain de masse	69
III.3.2.7. Absorption d'eau par immersion totale	70
III.3.2.8. Essai d'absorption d'eau par capillarité	71
III.3.2.9. Essai « gel - dégel »	72
III.3.2.10. Essai « mouillage – séchage »	73
III.3.2.11. Résistance aux milieux acides (5% HCl)	74
III.3.2.11.1. Variation en masse	74
III.3.2.11.2. Examen visuel	75
III.3.2.11.3. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	76
III.3.2.11.4. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	78
III.4. Conclusion	79
CONCLUSION GENERAL	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHES	82

RESUMES

RESUME

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs entrepris sur un béton de sable à base de poudre de verre. L'étude a démontré une amélioration des propriétés étudiées. Afin d'approfondir ce sujet, nous avons étudié la durabilité du béton de sable à base de poudre de verre. Cette étude a donc essentiellement porté sur l'effet de l'ajout de poudre de verre sur la durabilité du béton de sable étudié en variant la proportion de poudre de verre dont le pourcentage varie de 0 à 40% avec un pas de 10%. Les résultats trouvés montrent que la densité des bétons étudiés a diminué en fonction de l'augmentation du dosage de poudre de verre. En effet, l'ajout optimal qui constitue les meilleurs compromis entre les propriétés étudiées est de 10% de poudre de verre. La résistance à la compression a été améliorée d'environ 10.70%. La conductivité thermique a été réduite de 12.74%. Quant au retrait, il a été réduit d'environ 20%. De plus, l'étude montre que l'ajout de poudre de verre permet d'améliorer la carbonatation accélérée et ne pose pas de grands problèmes vis-à-vis du "gel-dégel" et du "mouillage-séchage". Cependant, l'incorporation de poudre de verre diminue la résistance à l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl). 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 : Béton de sable, Poudre de verre, Densité, Propriétés thermiques, Retrait, Durabilité.

المخلص

هذه الدراسة هي مواصلة لعمل سابق لخرسانة الرمل معتمدة على مسحوق الزجاج، الدراسة برهنت على وجود تحسن على مستوى الخصائص المدروسة. من أجل التعمق أكثر في هذا البحث قمنا بدراسة ديمومة الخرسانة الرملية المعتمدة على مسحوق الزجاج. إذن تهدف هذه الدراسة الى معرفة مدى تأثير المسحوق الزجاجي على متانة الخرسانة الرملية وذلك بتغيير نسب المسحوق من 0 الى 40% بخطوة 10%. النتائج المتحصل عليها برهنت على نقصان في كتلة الخرسانة المدروسة بدلالة زيادة نسب المسحوق الزجاجي. في الواقع فإن الإضافة المثلى التي تشكل أفضل حل وسط بين الخصائص المدروسة هي 10% من مسحوق الزجاج. تحسينات في مقاومة الضغط تصل حوالي 10.70%. التوصيل الحراري نقصت ب 12.74%. فيما يتعلق بالانكماش، فقد تم تقليله بنسبة 20%. أيضا، إضافة المسحوق الزجاجي أدى الى تحسينات على مستوى التكرين المتسارع ولا يطرح مشاكل كبيرة في تكرار عملية التجمد والذوبان وعملية التبليل والتجفيف. كل هذا بالإضافة الى التقليل من مقاومة هجوم حمض الهيدروكلوريك. وأخيرا، 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: الخرسانة الرملية، المسحوق الزجاجي، الكثافة، الخصائص الحرارية، الانكماش، الديمومة.

ABSTRACT

This study is a continuation of previous work undertaken on sand concrete based on glass powder. The study demonstrated an improvement in the properties studied. In order to deepen this subject, we studied the durability of sand concrete based on glass powder. This study therefore focused on the effect of the addition of glass powder on the durability of the sand concrete studied by varying the proportion of glass powder, the percentage of which varies from 0 to 40% with a step of 10%. The results found show that the density of the concretes studied decreased with the increase in the dosage of glass powder. In fact, the optimum addition which constitutes the best compromise between the properties studied is 10% glass powder. The compressive strength has been improved by approximately 10.70%. Thermal conductivity has been reduced by 12.74%. As for the shrinkage, it has been reduced by about 20%. Moreover, the study shows that the addition of glass powder improves the accelerated carbonation and does not pose major problems with respect to "freeze-thaw" and "wetting-drying". However, the incorporation of glass powder decreases the resistance to attack by hydrochloric acid (HCl). 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: Sand concrete, Glass powder, Density, Thermal properties, Shrinkage, Durability.

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 Dmax.
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.

Nomenclature

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.
M _f	:	Module de finesse.
ES	:	Equivalent de sable.
ES _V	:	Equivalent de sable visuel.
ES _P	:	Equivalent de sable au piston.
H1	:	Hauteur de sable propre + éléments fins.
H2	:	Hauteur de sable propre seulement.
C _p	:	Compacité.
p	:	Porosité.
R _t	:	Résistance à la flexion.
R _c	:	Résistance à la compression.
F _c	:	Force de compression.
A	:	Surface transversale de l'éprouvette.
A(cm)	:	Affaissement.
A%	:	Coefficient d'absorption d'eau.
P _s	:	Masse du matériau sec.
P _h	:	Masse du matériau humide.
$\varepsilon(t)$:	Retrait relatif enregistré au temps t.
i(t)	:	Quantité d'eau absorbée par unité de surface (mm).
V _m	:	Variation de la masse en (%).
M ₀	:	Masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide.
M _i	:	Masse de l'éprouvette au moment i d'attaque.
λ_R^g	:	Perte en résistance à la compression.
τ_g	:	Perte en masse.
DRX	:	Diffraction aux rayons X.
MEB	:	Microscope électronique à balayage.
TPS	:	Transient Plane Source.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CAPITRE I : Recherche Bibliographique

Numéro	Titre	Page
Figure I.1.	Colisée un monument emblématique de Rome.	5
Figure I.2.	Phare de Port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte).	5
Figure I.3.	Proportion du gravillon dans le béton.	9
Figure I.4.	Effet des dosages fines sur la compacité du béton de sable.	10
Figure I.5.	Temps d'écoulement en fonction du module de finesse.	11
Figure I.6.	Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C).	11
Figure I.7.	Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire.	12
Figure I.8.	Aspect général du béton de sable.	13
Figure I.9.	Panneau 3D en béton de sable projeté.	15
Figure I.10.	Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.	18
Figure I.11.	Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles dusable.	19
Figure I.12.	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en oeuvre donnée.	19
Figure I.13.	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).	22
Figure I.14.	Représentation schématique plane d'un réseau vitreux.	29
Figure I.15.	Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec E/L=0.55 et différents pourcentages en PV.	33

Chapitre II : Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Numéro	Titre	Page
Figure II.1.	Sables utilisés.	35
Figure II.2.	Courbe granulométrique des sables utilisés.	36
Figure II.3.	Analyse chimique par DRX du sable de dune.	39
Figure II.4.	Analyse chimique par DRX du sable alluvionnaire.	40
Figure II.5.	Analyse chimique par DRX du ciment utilisé.	41
Figure II.6.	Filler calcaire utilisé.	41
Figure II.7.	Analyse chimique par DRX de filler calcaire utilisé.	42
Figure II.8.	Poudre de verre utilisée.	43
Figure II.9.	Super-plastifiant « MEDAFLOW 30 ».	44
Figure II.10.	Dispositif de mesure d'affaissement.	46
Figure II.11.	Dispositif de l'essai de la résistance à la compression.	48
Figure II.12.	Dispositif de mesure de retrait.	48
Figure II.13.	Procédé de l'essai de la sonde Hot Disk TPS.	49
Figure II.14.	Diffractomètre de type (PROTO).	50
Figure II.15.	Microscopie électronique à balayage « Phenom ProX ».	51
Figure II.16.	Schéma d'une station de carbonatation accélérée.	52
Figure II.17.	Disposition des éprouvettes dans l'enceinte	52
Figure II.18.	Echantillons recouverts d'aluminium adhésif.	53
Figure II.19.	Essai d'absorption d'eau par capillarité.	54
Figure II.20.	Essai gel - dégel.	55
Figure II.21.	Essai mouillage - séchage.	56
Figure II.22.	Bacs de conservation des éprouvettes dans la solution (HCl). (a) Cas de renouvellement de la solution. (b) Cas des éprouvettes après une semaine dans la solution.	56
Figure II.23.	Papier de pH utilisé.	57

Chapitre III : Résultats et Discussions

Numéro	Titre	Page
Figure III.1.	Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés.	61
Figure III.2.	Evolution de la résistance à la compression à 28 jours.	62
Figure III.3.	Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées.	63
Figure III.4.	Diffractogramme du béton de sable sans poudre de verre.	65
Figure III.5.	Diffractogramme du béton de sable avec poudre de verre.	66
Figure III.6.	Analyse au MEB des bétons étudiés (sans poudre de verre).	67
Figure III.7.	Analyse au MEB des bétons étudiés (avec poudre de verre).	67
Figure III.8.	Fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphtaléine des bétons étudiés à 28 jours.	68
Figure III.9.	Profondeur de carbonatation accélérée des bétons étudiés à 28 jours.	69
Figure III.10.	Evolution du gain de masse des bétons étudiés.	70
Figure III.11.	Evolution de l'absorption capillaire des bétons étudiés en fonction du temps.	71
Figure III.12.	Variation en masse des bétons étudiés en fonction du temps.	75
Figure III.13.	Examen visuel des échantillons exposés à 5% de (HCl) après 60 jours.	76
Figure III.14.	Diffractogramme du béton de sable sans poudre de verre.	77
Figure II.15.	Diffractogramme du béton de sable avec poudre de verre.	77
Figure III.16.	MEB des bétons étudiés avant attaque d'acide (HCl).	78
Figure III.17.	MEB des bétons étudiés conservés dans d'acide (HCl).	78

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CAPITRE I : Recherche Bibliographique

Numéro	Titre	Page
Tableau I.1.	Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.	25

Chapitre II : Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Numéro	Titre	Page
Tableau II.1.	Caractéristiques physiques du sable utilisé (SAD).	38
Tableau II.2.	Analyse chimique du ciment utilisé	40
Tableau II.3.	Analyse chimique de la poudre de verre	43
Tableau II.4.	Caractéristiques du super plastifiant utilisé	44
Tableau II.5.	Classes de consistance du béton	46

Chapitre III : Résultats et Discussions

Numéro	Titre	Page
Tableau III.1.	Compositions des bétons étudiés.	60
Tableau III.2.	Maniabilité des compositions étudiées.	60
Tableau III.3.	Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiée	63
Tableau III.4.	Propriétés thermiques des bétons étudiés.	65
Tableau III.5.	Absorption d'eau par immersion à 28 jours.	71
Tableau III.6.	Influence des cycles "gel-dégel" sur la résistance à la compression et la masse des bétons étudiés.	72
Tableau III.7.	Influence des cycles "mouillage - séchage " sur la résistance à la compression et la masse des bétons étudiés.	73
Tableau III.8.	Variation en masse des bétons étudiés en fonction de temps.	74

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis des années, la demande des matériaux de construction connaît une croissance considérable en rapport avec le développement du pays. Or, les matériaux locaux qui sont couramment utilisés, ne permettent pas de couvrir le déficit en logements enregistré. Ce déséquilibre ne peut être surmonté que par la création d'autres alternatives. C'est dans cette optique que l'idée de la valorisation des matériaux locaux dans la construction est survenue. La valorisation des matériaux locaux est devenue donc une solution nécessaire aux problèmes économiques des pays en voie de développement. De même les grandes quantités de déchets résultants chaque jour des différents travaux industriels constituent une gêne environnementale et soulèvent des problèmes particulièrement difficiles à résoudre. Or leur réutilisation dans la construction pourrait résoudre un triple problème : environnementaux, économiques et techniques [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 [Chen et al., (2002) ; Shi et al., (2007) ; Zeghichi et al., (2012)].

Il est bien connu que la durabilité des structures en béton est l'un des facteurs importants dans les domaines du génie civil. Elle est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais aussi par l'environnement. Ces influences deviennent plus importantes quand on doit garantir une durée de service pour une longue période. L'échelle de temps à prévoir est de l'ordre de quelques centaines d'années jusqu'à des dizaines de milliers d'années. Ces échelles de temps rendent nécessaire une connaissance des mécanismes physico-chimiques qui sont à l'origine de la dégradation des propriétés chimiques, hydrodynamiques et mécaniques des bétons. La durabilité peut être définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions [Guillon, (2004)]. Donc on peut dire que la durabilité d'un béton est une réponse à ses charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, elle dépend d'une multitude de caractéristiques de son matériau et de l'agressivité de son environnement.

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)**]. Notons que parfois, les propriétés spécifiques des bétons de sables permettent de remplacer et de résoudre même certains problèmes mal assurés du béton ordinaire.

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 [**Schwarz et al., (2008)** ; **Nassar et al., (2012)**]. 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, ce qui signifie que les déchets de verre peuvent être recyclés à l'infini sous forme de calcin dans la production de verre sans aucune perte de qualité [**Sobolev et al., (2006)**].

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)**]. Dans le domaine de génie civil, le recyclage du verre réussit dans plusieurs usages. L'utilisation de déchets de verre comme substitut d'agrégat [**Park et al., (2004)** ; **Topcu et al., (2004)**], ou de remplacement partiel du ciment [**Shayan et al., (2004)** ; **Shi et al., (2005)**].

Introduction Générale

Notre étude est une continuation de l'étude précédente menée sur les propriétés physico-mécaniques du béton de sable à base de poudre de verre [Amrani et al., (2020)]. L'étude a démontré une amélioration des propriétés étudiées, l'ajout de 10% de poudre de verre a donné de bons résultats par rapport à d'autres compositions. A travers les recommandations préconisées dans les travaux précédents et afin d'approfondir ce sujet, nous étudierons la durabilité du béton de sable à base de poudre de verre. Cette étude a donc essentiellement porté sur l'effet de l'ajout de poudre de verre sur la durabilité du béton de sable étudié en variant la proportion de poudre de verre dont le pourcentage varie de 0 à 40% avec un pas de 10%.

Afin d'atteindre ces objectifs et pour mener à bien ce travail, le manuscrit est organisé en trois principaux chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les bétons 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 est consacré à la synthèse et à l'analyse des résultats de la durabilité des différents composites étudiés.

Enfin, une conclusion générale est présentée, suivie de quelques perspectives pour des éventuels travaux de recherche futurs.

CHAPITRE I :

Recherche

Bibliographique

CHAPITRE I :

Recherche Bibliographique

I.1. Introduction

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques à travers des différents documents qui ont une relation directe avec le composite étudié, à savoir : les bétons de sables. De plus, puisque on ajoute la poudre de verre comme addition minérale dans le composite étudié, on présente une généralité sur le verre, la poudre de verre et leurs effets sur les bétons.

I.2. Béton de sable

I.2.1. Introduction

Comme tous les pays en voie de développement, l'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats 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 naturels et artificiels. 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 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. [Sablocrete, (1994) ; Achoura, (2005)].

I.2.2. Aperçu 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 tels 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 19^{ème} 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 brûlé, 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 Egypte, le phare de Port-Saïd (h=52m), fut aussi construit, en 1869, en béton de sable de plage et chaux (**Figure I.2.**). Un pont à Brooklyn, a également été édifié en 1871-1872.



Figure I.2. Phare de Port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte).

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 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 tous granulats **0/D** (plus gros grains) conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. **D** est inférieur ou égal à 5 mm. Mais on peut admettre l'emploi d'un granulat à granulométrie continue de 0 mm jusqu'à 8 mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 5 mm et les éléments inférieurs à 5 mm reste inférieur à 0.7 [Sablocrete, (1994)]. Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un **0/D** de concassage. La seule restriction d'emploi réside dans la propreté [Sablocrete, (1994) ; Benabed et al., (2005)].

I.2.4.2. Ciment

Le ciment habituellement utilisé pour la confection des bétons de sable 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)].

2.4.3. Eau de gâchage

Elle est conforme à la norme NF P18-303, 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)].

2.4.4. Fines d'ajouts

Une des qualités essentielles 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.

La différence entre un béton de sable et un béton classique réside principalement dans la granulométrie de leurs granulats. L'optimisation de la compacité en relation avec la granulométrie obéit à certaines règles : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros.

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 µm, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables. L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple, compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du granulat, comme dans le cas des bétons de sable. Les fillers peuvent également influencer l'hydratation, être présente dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [Boudaoud, (1993) ; Bederina, (2000)].

I.2.4.5. Adjuvants

Les adjuvants employés devront être conformes aux normes NF P18-340. 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 défoulent les éléments fins et permettent de limiter le dosage en eau [Sablocrete, (1994)].

I.2.4.6. Autres ajouts

➤ 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 [Swamy et al., (1984) ; Valade, (1987) ; Elhachem, (1990)].

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)].

➤ Gravillons

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable (Figure I.3.).

En admettant que les gravillons sont dispersés dans le sable et ne constituant pas un squelette structure, le comportement reste le même : l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement certaines caractéristiques : fluage, retrait, résistance, maniabilité. D'une façon pratique on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sables) reste inférieur à 0.7 [Sablocrete, (1994)].

$$\frac{G}{S} < 0.7 \quad (\text{I. 1})$$

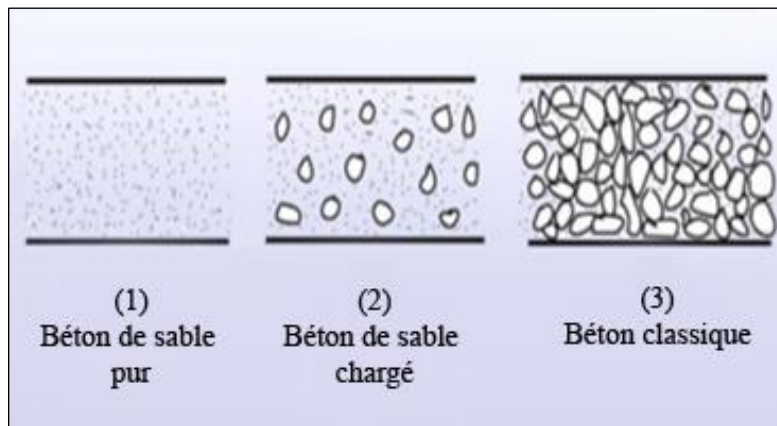


Figure I.3. Proportion du gravillon dans le béton.

➤ 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, il a été montré qu'un sable alluvionnaire ($D_{\max} \approx 5\text{mm}$) 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 [Laquerbe et al, (1999)]. 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.4.) [Chauvillard et al., (1996)].

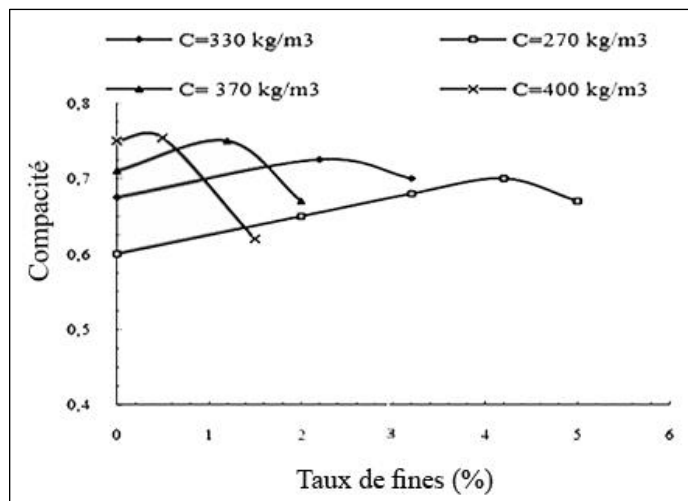


Figure I.4. Effet des dosages fines sur la compacité du béton de sable [Chauvillard et al., (1996)].

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.5., qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité [Benaissa, (1992)].

La **Figure I.6.**, montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport E/C augmente. Cependant, pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend 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 attribue 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)**].

La **Figure I.7.**, ci-dessous, la maniabilité des bétons de sable dunaire augmente considérablement si on augmente E/C [**Chauvillard et al., (1996)**].

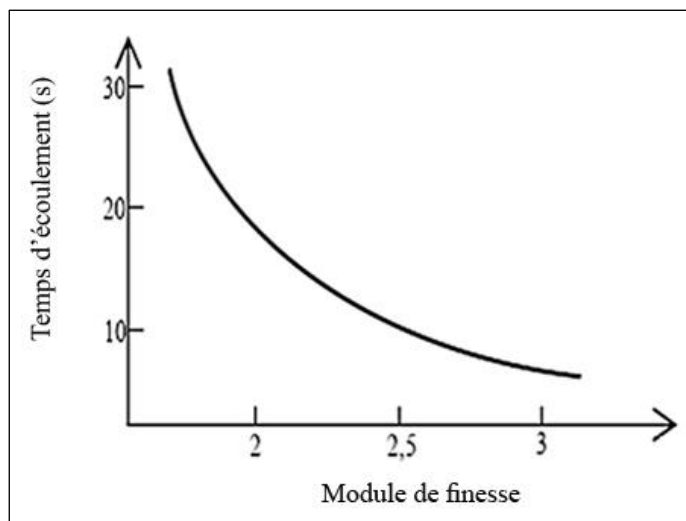


Figure I.5. Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [**Benaissa, (1992)**].

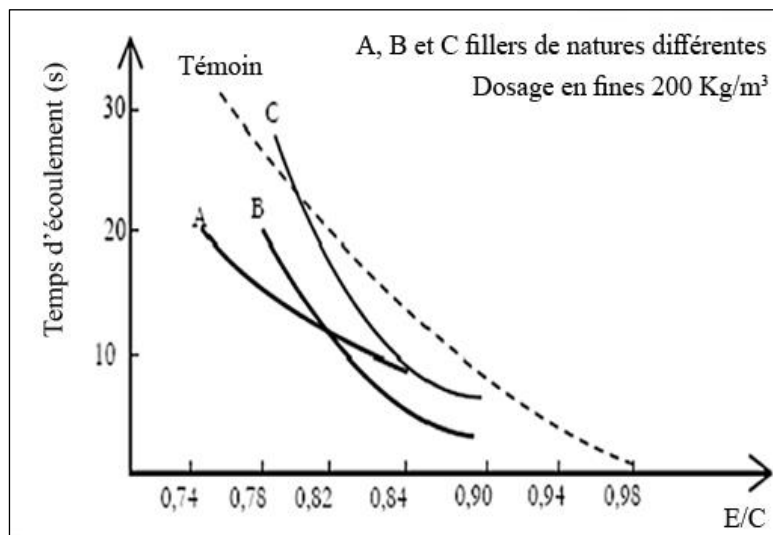


Figure I.6. Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C) [**Laquerbe et al., (1999)**].

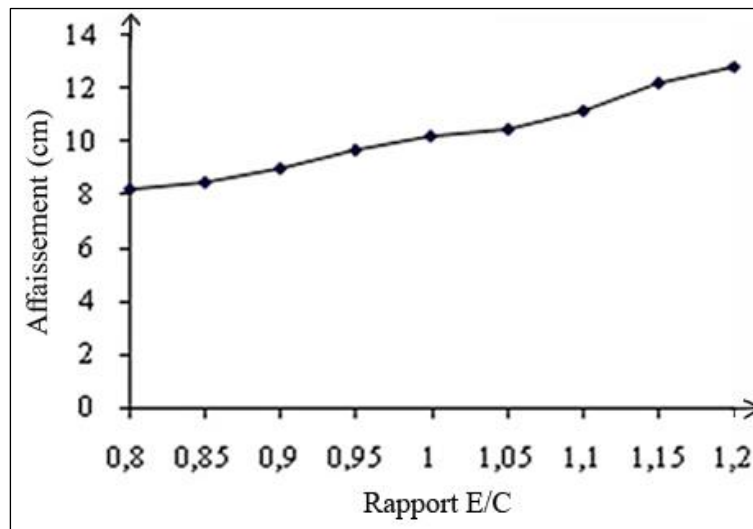


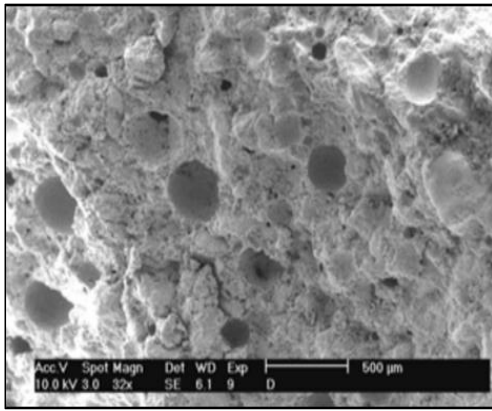
Figure I.7. Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire [Chauvillard et al., (1996)].

I.2.6. Comportements mécaniques

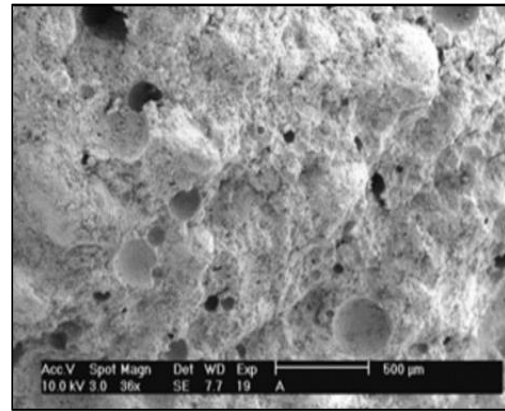
Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures 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.8.**, 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)].



a. Béton de sable dunaire ; G = 32.



b. Béton de sable alluvionnaire ; G = 36.

Figure I.8. Aspect général du béton de sable.

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. On peut distinguer différentes agressions physico-chimiques, mécaniques et thermiques. La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (perméabilité à l'air et à l'eau, pénétration des ions de chlorure, perméabilité au gaz, gel-dégel, mouillage-séchage, carbonatation, porosité, retrait, etc.). Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques exogènes ou internes, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.

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.2.8.1. Fondations profondes

Dans le domaine des fondations, le béton de sable, de par ses caractéristiques, permet notamment la construction de pieux à grande profondeur, les injections et reprises en sous-œuvre, d'autant que ces travaux se font le plus souvent en milieu subaquatique et doivent éviter tout délavage ; de cela, il facilite tous les travaux délicats ou difficiles à réaliser avec des bétons courants [Bouziyani, (2013)].

I.2.8.2. Bâtiment

Dans le domaine de préfabrication, le béton de sable garantit, par sa finesse granulométrique, un aspect de surface excellent des éléments préfabriqués par rapport au béton traditionnel. Contrairement aux bétons traditionnels, cette finesse rend aussi le béton de sable accessible aux cotes minimales des pièces préfabriquées, ce qui permettra de mouler des pièces de formes très complexes avec des ferrailages denses [Bouziani, (2013)].

I.2.8.3. Autres applications

Il existe d'autres applications des bétons de sables, à savoir :

I.2.8.3.1. Routes

Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du béton de sable répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides [Coquillat, (1992)].

I.2.8.3.2. Béton de sable projeté

Benaïssa et al., ont montré dans une étude sur l'utilisation de béton de sable dans des panneaux 3D en utilisant la technique de projection par voie humide (**Figure I.9.**), en substitution au béton ordinaire, que les deux bétons montrent des performances mécaniques semblables avec cependant une amplitude de retrait de dessiccation du béton de sable plus marquée.

Les résultats trouvés à l'issue de cette étude montrent aussi que l'avantage du béton de sable, par rapport au béton ordinaire, réside dans la réduction du rebond de moitié (15% contre 30%), en raison de l'effet combiné de la méthode de projection et la granulométrie fine du béton de sable, et le fini de surface du béton de sable projeté est d'une grande qualité, d'où économie de travaux de finition [Benaïssa et al., (2008)].



Figure I.9. Panneau 3D en béton de sable projeté [Benaïssa et al., (2008)].

I.2.8.3.3. Bétons de sable fluides

Les bétons de sable sont naturellement maniables et se mettent en place facilement sans recours à la vibration. Cet avantage, pour des bétons à performances courantes, constitue un atout qui sera plus important quand, en plus, on peut les fluidifier afin d'améliorer par conséquent leurs performances [Ambroise et al., (1993)].

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 :

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

Où :

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V₀ : 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 µmet 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 µmprovenant 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 :

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

Où :

P_s (V) : Porosité du sable d'étendue 80 μm ;

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 μm , 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 μm) et le volume des vides associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

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

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

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.10.**)

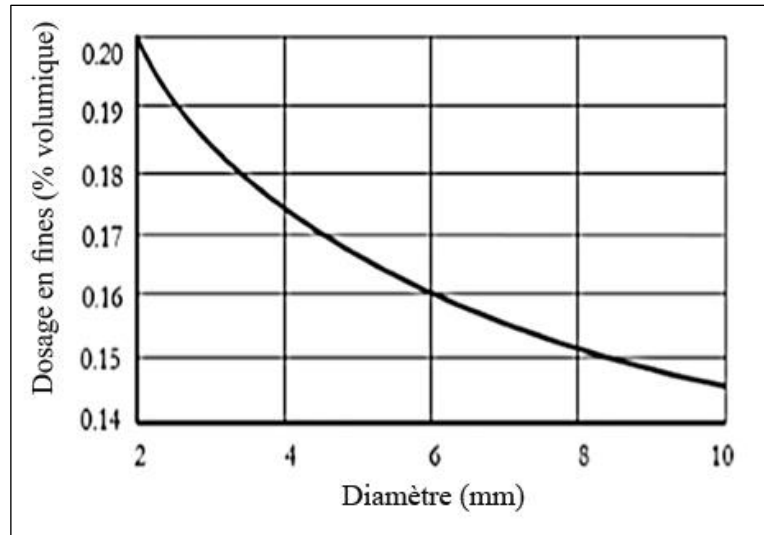


Figure I.10. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.

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 .

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

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 μ_m pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale (**Figure I.11.**) [Sablocrete, (1994) ; Ghrieb, (2003)].

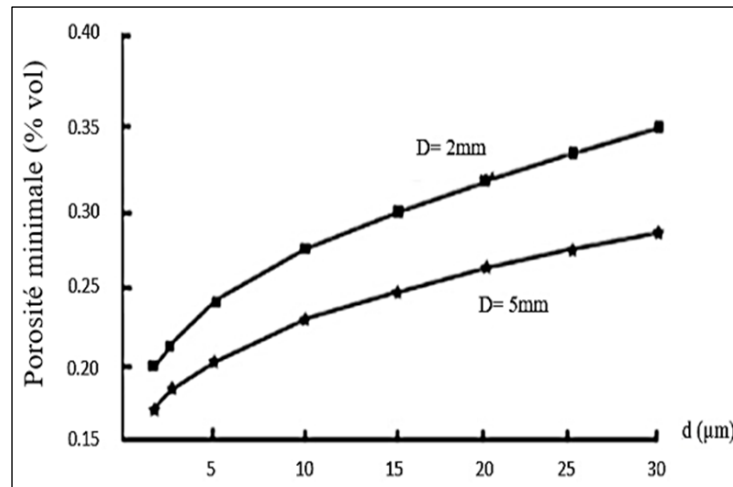


Figure I.11. Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable.

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

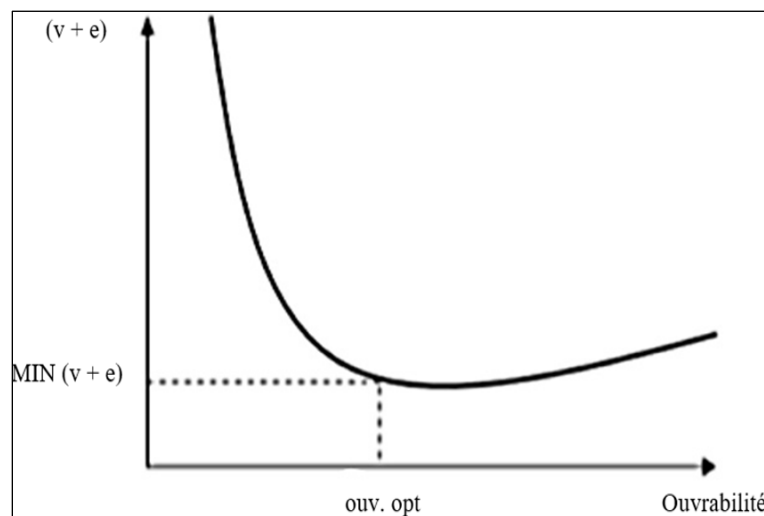


Figure I.12. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage ($e + v$) d'une matrice pour une mise en oeuvre donnée.

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

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

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à $80 \mu\text{m}$ 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 :

R_f : Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

R_c : Classe vraie du ciment (MPa) ;

e : Dosage en eau total (l/m^3) ;

V : Air piégé (l/m^3) ;

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

R_b : Résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa);

$$K_1 = k_{cv} (CV/C) + Kfs \left(\frac{FS}{C}\right);$$

$$0.2 < k_{cv} < 0.4 \quad 2 < Kfs < 3.3 \quad K_1 \leq 0.5 ;$$

$$K_2 = k_{fil} \left(\frac{FIL}{C}\right);$$

$$0 < k_{fil} \leq 0.4 \quad K_2 < 0.2 ;$$

K_1 : Coefficient pouzzolanique ;

K_2 : Coefficient d'activité du filler calcaire (**Figure I.13.**) ;

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/m^3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées. Telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente, 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)**].

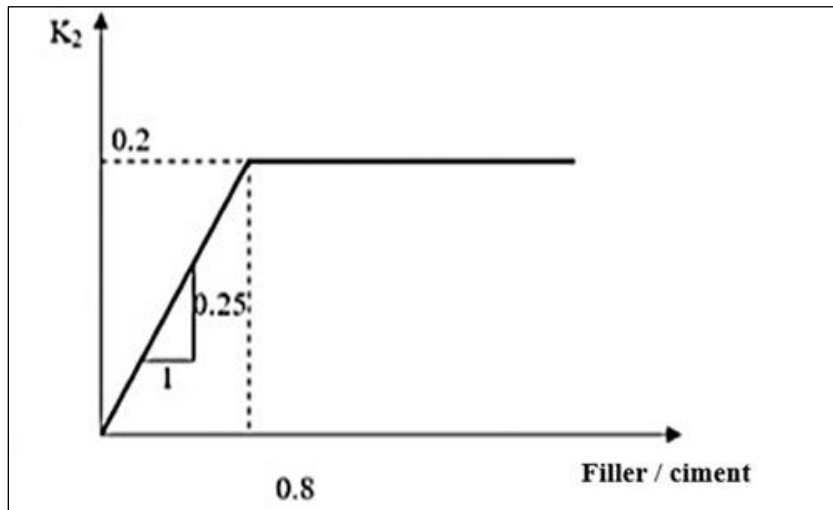


Figure I.13. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en termes de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport des dosages en fines d'addition-ciment 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 formateur 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 p.

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

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 (l/m^3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 kg de ciment, et 250 litres pour 400 kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant ($N\%$ du poids des éléments inférieurs à $80 \mu_m$ en extrait sec), qui permettra de défonner les

fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air (V_{air}), la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton. Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton, on aboutit à la relation suivante:

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

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/m^3).

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

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

- La valeur 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 :

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

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.

2) Détermination du dosage en fines d'addition

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

Notre objectif, est d'obtenir une formule d'un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un affaissement adéquat. Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

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

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;">Composants</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Ciment ; ◆ Sable ; ◆ Filler ; ◆ Eau : plus quantité d'eau. 	<p style="text-align: center;">Composants</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Ciment ; ◆ Sable ; ◆ Gravier ; ◆ Eau : moins quantité d'eau.
<p style="text-align: center;">Qualités essentielles</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;">Qualités essentielles</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;">Méthodes de formulations</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Méthode théorique et méthode expérimentale ; 	<p style="text-align: center;">Méthodes de formulations</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Méthodes basées sur des considérations théoriques ou des essais :

<ul style="list-style-type: none"> ◆ Méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Méthode à granularité continue de Bolomey ; ◆ Méthode de Vallette ; ◆ Méthode de Faury ; ◆ Méthodes générales du C.E.S (centre d'essai des structures) : <ul style="list-style-type: none"> ◆ Evaluation de l'humidité des granulats ; ◆ Utilisation d'abaque (Méthode Dreux).
<p>Particularité du béton [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. 	<p>Particularité du béton</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. plusfaibles que ceux des bétons classiques.
<p>Domaines d'emploi</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Bâtiments ; ◆ Fondations ; ◆ Voiries ; ◆ Travaux des réparations ; ◆ Projection des surfaces ; ◆ Travaux d'injection ; ◆ Comblement de cavités. 	<p>Domaines d'emploi</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Bâtiments ; ◆ Fondations ; ◆ Voiries ; ◆ Aéroports ; ◆ Ouvrages d'art ; ◆ Travaux des réparations ; ◆ Ponts.

I.4. Valorisation des déchets dans le domaine de génie civil

I.4.1. Définition

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». D'après la loi française du 15 juillet 1975 : « Est ultime

un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [Michèl, (1981)].

La valorisation est définie comme « L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances » [Languedoc, (2001)].

I.4.2. Méthodes de la valorisation

I.4.2.1. Valorisation matière

Elle est appelée également, recyclage mécanique, il s'agit de l'opération globale consistant à la production d'une nouvelle matière à partir d'un déchet. Dans ce cas, il n'y a pas de destruction majeure de la structure chimique du polymère [Languedoc, (2001)].

I.4.2.2. Valorisation énergétique

Elle est appelée également, recyclage énergétique, elle vise la production d'énergie calorifique [Michèl, (1981)]. Plusieurs techniques permettent d'atteindre cet objectif dont les plus connus sont l'incinération, la pyrolyse ou la thermolyse. Cette énergie calorifique peut être utilisée sur place ou transformée par la suite en énergie électrique, en fonction des besoins du moment ou du lieu de traitement [Languedoc, (2001)].

I.4.2.3. Valorisation chimique

Il s'agit de tout processus chimique permettant la transformation d'un déchet en des produits chimiques utilisables comme intermédiaires réactionnels dans l'industrie chimique ou l'industrie de la transformation des matières plastiques [Languedoc, (2001)].

I.4.3. Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous ; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous-produits industriels dans des conditions spécifiques [Courardl, (1998)].

I.4.3.1. Déchets inertes (DI)

Tout déchet qui ne produit pas de modification physique, biologique ou chimique importante tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments.

I.4.3.2. Déchets ménagers et assimilés (DMA)

Les déchets ménagers englobent tous les déchets produits par les ménages et assimilés (certaines collectivités et certains commerçants). Ce sont donc les déchets que tout particulier produit dans sa vie quotidienne. Les déchets ménagers regroupent les ordures ménagères (non recyclables ou pas encore recyclées), les déchets recyclables secs (journaux, papiers, carton, magazines, verre, aluminium, plastique) et les recyclables dits humides, organiques ou fermentescibles (déchets alimentaires, herbes, bois, etc.)

I.4.3.3. Déchets industriels banals (DIB)

Les déchets banals ou les déchets industriels banals (DIB) sont non inertes et non dangereux générés par les entreprises, industriels, commerçants, artisans et prestataires de services ; ferrailles, métaux non ferreux, papiers cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc. [Barkat, (2006)].

I.4.3.4. Déchets industriels toxiques

Un déchet toxique est un déchet, qui peut s'avérer nuisible à la santé d'un être vivant. Les déchets toxiques sont généralement rejetés par les usines ou les puissances industrielles

I.4.3.5. Déchets industriels spéciaux (DIS)

Ils regroupent les déchets dangereux autres que les déchets dangereux des ménages et les déchets d'activité de soins à risque infectieux.

I.5. Valorisation des déchets de verre

I.5.1. Définition du 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 Théa. 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) (Figure I.14.) [Abdelkibire et al., (2005)].

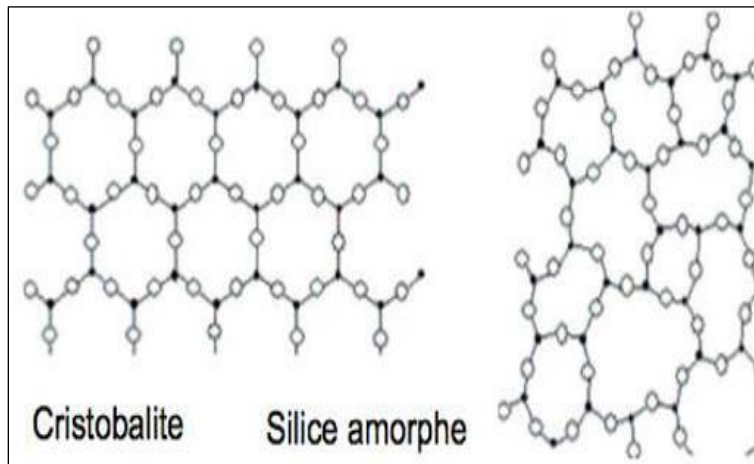


Figure I.14. Représentation schématique plane d'un réseau vitreux [Abdelkibire et al., (2005)].

I.5.2. Valorisation des verres dans les bétons

Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recyclé plusieurs fois. Cependant, il est nécessaire que le verre provenant de la collecte sélective soit préalablement séparé en fonction de la couleur pour être transformé en calcin pour de nouveau être utilisé dans la fabrication d'emballages en verre.

La plupart du temps, le verre récolté est un produit mixte et sa réutilisation peut devenir difficile. Dans ce cas-ci, il est employé pour d'autres applications (abrasif routier, laine de verre, filtrations municipales, etc.) ou stocké en décharge. Des travaux ont montré que l'utilisation du verre dans les bétons semble être une piste prometteuse.

I.5.3. Propriétés des verres

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

I.5.3.1. Propriétés physiques

- Transparence : mais il peut être opaque ou opalescent ;
- Dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent ;
- 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 l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Par contre 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.5.3.2. 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.5.3.3. 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 contenu 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.5.4. Réaction pouzzolanique du verre

L'activité pouzzolanique du verre peut être évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG et DRX. La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane+ Ca(OH)_2 + Eau => silicates de calcium hydratés, silico-aluminates de calcium hydratés.

L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec ajout de verre à la résistance du mélange témoin [Scholze, (1980)]. Il a été difficile, voire impossible, de rassembler tous les travaux élaborés dans les mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- 1- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique : plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolanique ;
- 2- La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente ;
- 3- L'activité é pouzzolanique varie d'un verre à un autre, selon leur couleur, le verre brun est le verre qui possède la plus faible activité, par contre le verre vert et le verre blanc présentent une activité pouzzolanique considérable [Rachida et al., (2009) ; Hamlaoui et al., (2019)].

I.6. Effet de la poudre de verre sur le comportement mécanique du béton

I.6.1. Définition de 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.6.2. 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 cimentaire. 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 sur des bétons formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m^3 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 [Zidol, (2009)].

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/m^3 , 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.15.** : montre l'influence du dosage de poudre de verre sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge des mortiers étudiés [Souleymane, (2019)].

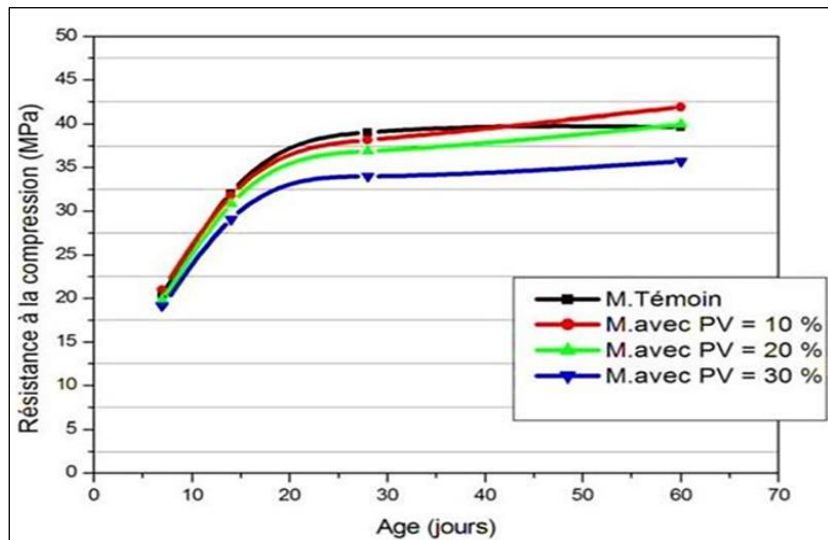


Figure I.15. Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.55$ et différents pourcentages en PV [Souleymane, (2019)].

I.6.3. 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 812% 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 charges 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.7. Conclusion

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

Les bétons de sable pourraient remplacer les bétons ordinaires dans certains domaines d'applications. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès. 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 prendre des dosages convenables, tel que les fillers de calcaire, qui sont les plus recommandés pour les bétons de sables. L'augmentation de la compacité par ajout diminue la maniabilité, d'où la nécessité de trouver un compromis entre la maniabilité et sa compacité.

Par ailleurs, depuis des décennies, le ciment portland a été toujours le matériau de construction le plus populaire dans le monde. 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, mécaniques et chimiques de ces derniers. De plus, elle garantit la conservation de la matière première et une protection de l'environnement.

CHAPITRE II :

Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Chapitre II :

Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

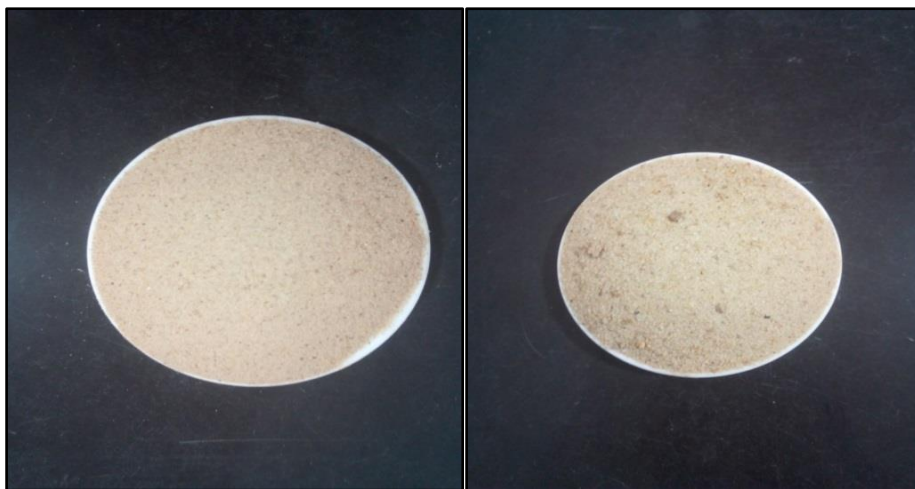
II.1. Introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie est consacrée à la présentation des caractéristiques physico-chimiques des matériaux de base utilisés dans la préparation des bétons étudiés alors que la deuxième partie est exposée les différents essais expérimentaux utilisés pour caractériser les mélanges à l'état frais et durci.

II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés

II.2.1. Sable

Deux sables utilisés dans cette étude ; sable dunaire (SD) et sable alluvionnaire (SA), le premier provenant de la région Sud de la ville d'El Oued, qui présente un diamètre de grain maximum d'environ 0.63 mm ; la proportion de grains plus petits que 0.08 mm est au-dessous de 5% (**Figure II.1.a**). Le deuxième provenant de la région Nord-Ouest de la ville d'El Oued (Djamaa) et ayant un diamètre maximum de 5 mm (**Figure II.1.b**).



a. Sable dunaire.

b. Sable alluvionnaire.

Figure II.1. Sables utilisés.

D'après le travail précédent, le sable utilisé est un mélange entre les deux sables (SAD) [Amrani et al., (2020)]. Le sable est préparé selon un rapport massique déterminé en corrigeant la courbe granulométrique du sable alluvionnaire, dans sa partie fine, par ajout de sable dunaire (SA/SD = 1.7) [Bederina et al., (2005) ; Ammari et al., (2020) ; Ammari et al., (2021)].

II.2.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des différents éléments constituant le sable. La masse de l'échantillon pour l'essai de l'analyse granulométrique dépend des dimensions des éléments les plus gros qu'il contient. Cet essai est défini par la norme NF P 18 560. Les résultats de l'analyse granulométrique des deux sables ainsi que leur mélange sont présentés par les courbes granulométriques de la **Figure II.2**.

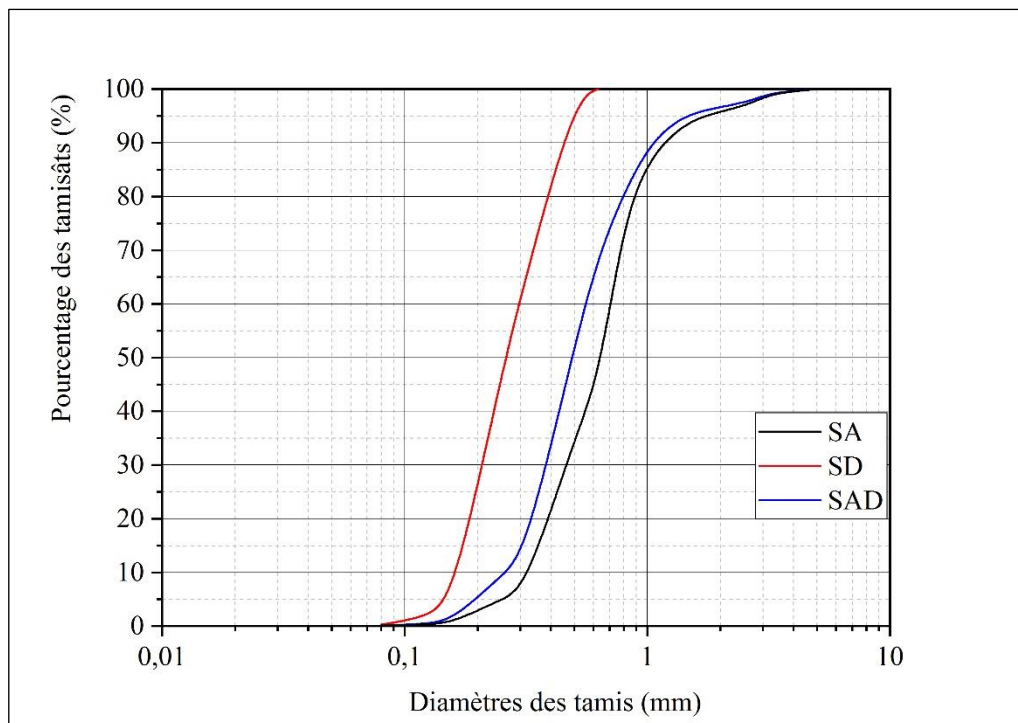


Figure II.2. Courbe granulométrique des sables utilisés.

D'après la courbe granulométrique, 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 de sable mélange est étalée, bien graduée et sa continuité bien répartie. De plus, la courbe granulométrique du sable mélange (SAD) s'inscrit mieux dans le fuseau recommandé pour les bétons, ce qui a été fait en corrigeant le sable alluvionnaire, dans sa partie fine, par l'ajout de sable de dune.

II.2.1.2. Caractéristiques physiques

II.2.1.2.1. Masses volumiques

Les masses volumiques ont été mesurées selon la norme NFP 18-555.

1) Masse volumique apparente

C'est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

La masse volumique apparente est définie par la relation suivante :

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

Où :

γ : Masse volumique apparente ;

M : Masse du matériau ;

V : Volume total du matériau.

2) Masse volumique absolue

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. La masse volumique absolue est définie par la relation suivante :

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

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). Il est défini comme le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 et 5 (mm).

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

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. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. L'essai consiste à plonger une masse définie de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sable propre + éléments fins (H1) et du sédiment + sable propre seulement (H2).

On détermine : ESV (équivalent de sable visuel) et ESP (équivalent de sable au piston). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$ES = \frac{H2}{H1} \times 100 \quad (\text{II. 4})$$

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 :

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

Où

p : est la porosité.

II.2.1.2.5. Synthèse des résultats

Le **Tableau II.1.**, regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur le sable mélange utilisé.

Tableau II.1. Caractéristiques physiques du sable utilisé (SAD).

D_{max} (mm)	γ (kg/m³)	γ_s (kg/m³)	ESV (%)	ESP (%)	Mf	Cp (%)	p (%)
5	1577	2570	92.02	77.13	2.2	61.36	38.64

Le tableau ci-dessus montre que :

- Le sable mélange utilisé est très propre si l'on se réfère aux valeurs de l'équivalente de sable recommandé 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 2.2 et 2.8 [**Dreux et al., (1998)**] ;
- Le diamètre maximum est plus petit dans le cas de granulats d'un 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.2.1.3. Caractéristiques chimiques

Les résultats des analyses chimiques des sables alluvionnaire et dunaire sont menées par diffraction des rayons X (DRX).

Cette analyse, révèle la présence prépondérante d'atomes Si et O₂, ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO₂ (silice). L'analyse montre que ces deux types de sables sont essentiellement de nature siliceuse (**Figures II.3., et II.4.**). En plus, on note la présence de quelques traces d'espèces de carbonate de calcium (CaCO₃) dans le cas de sable alluvionnaire.

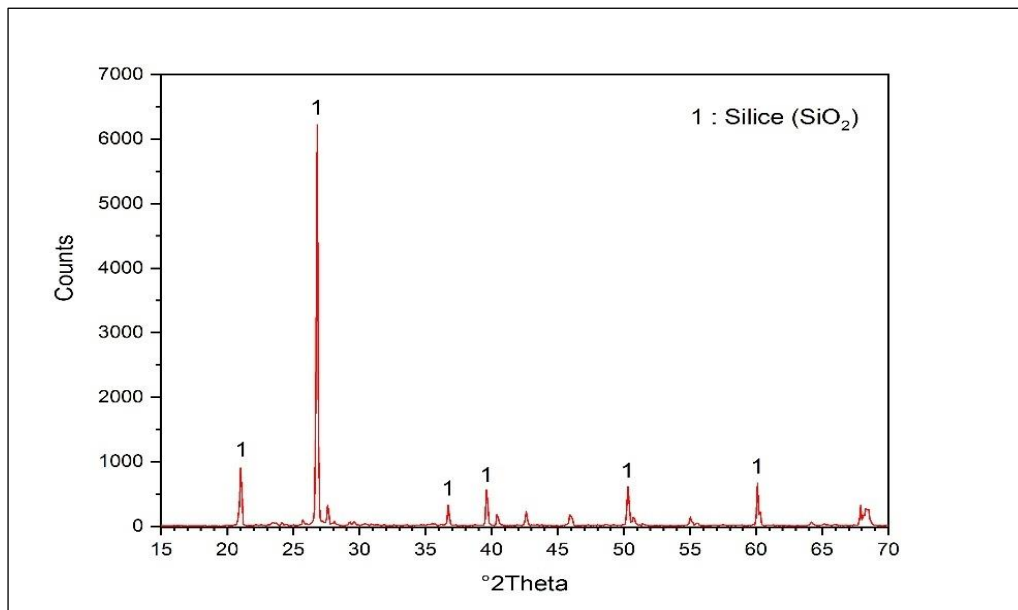


Figure II.3. Analyse chimique par DRX du sable de dune.

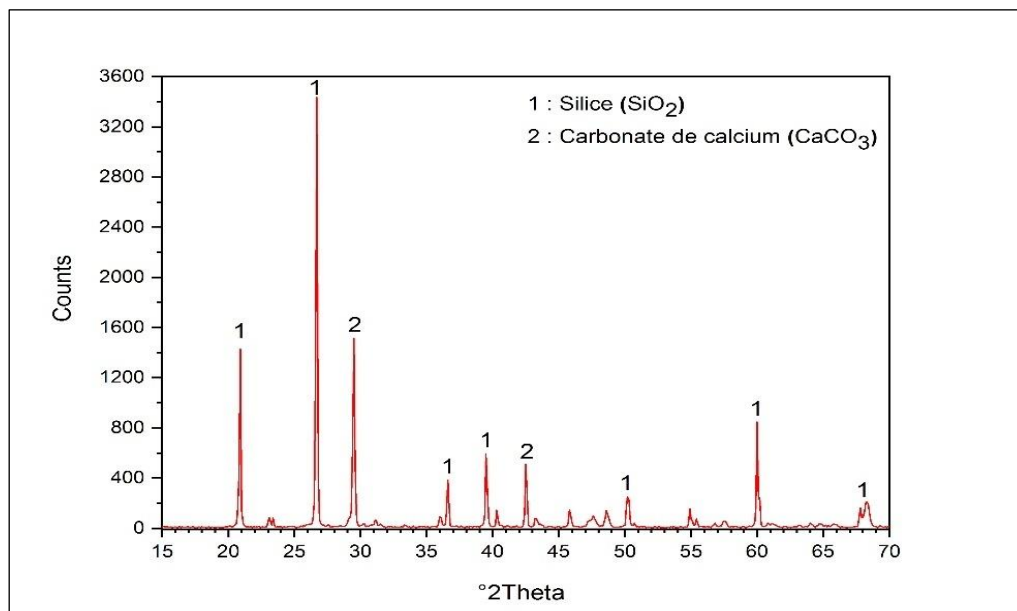


Figure II.4. Analyse chimique par DRX du sable alluvionnaire.

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé dans l'ensemble des essais expérimentales est un ciment portland composé CEM II / B42.5N selon la norme NA 442 et EN 197-1, le ciment a été fourni par la société LAFARGE (type : MATINE), Bab Ezzouar (Alger)- Algérie. Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement 3080 kg/m³ et 975 kg/m³. La surface spécifique Blaine est 449 m²/kg.

Les résultats de l'analyse chimique du ciment sont présentés dans le **Tableau II.2**. De plus, l'analyse chimique par rayons X (DRX) a montré l'existence des compositions chimiques suivantes : l'oxyde de calcium (CaO), le carbonate de calcium (CaCO₃), la silice (SiO₂), l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), l'oxyde de fer (Fe₂O₃), le trioxyde de soufre (SO₃), le silicate de calcium (Ca₂SiO₄) et le silicate de calcium (Ca₃SiO₅), comme le montre la **Figure II.5**.

Tableau II.2. Analyse chimique du ciment utilisé.

Elément	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Cl	Na ₂ O	Libre CaO	P.A.F	Résidus Insolubles
Quantité (%)	18.84	60.03	1.81	4.90	3.21	2.65	0.68	0.017	0.09	0.67	8.49	1.13

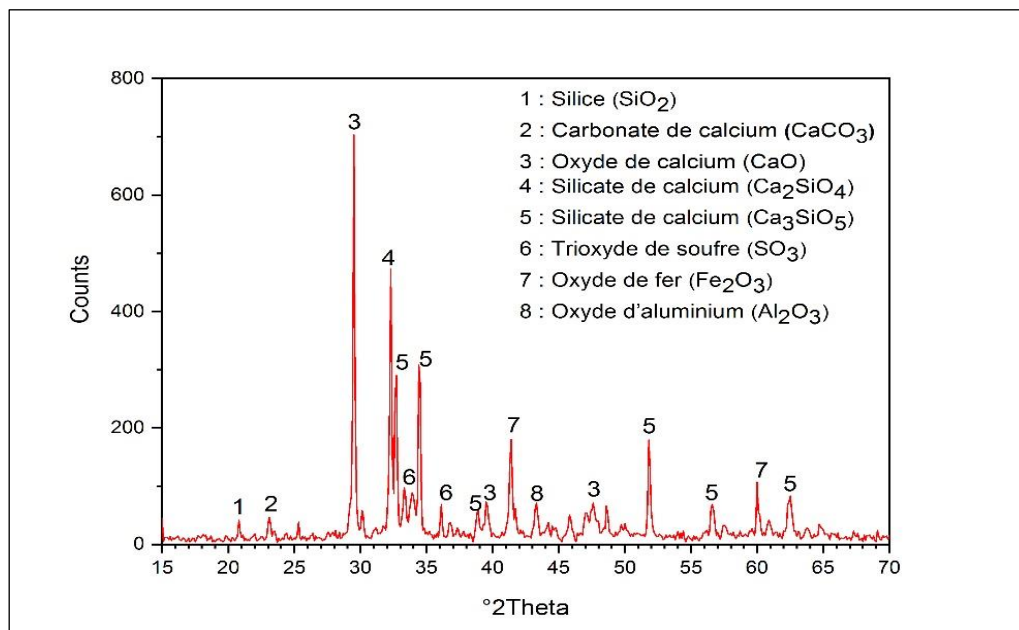


Figure II.5. Analyse chimique par DRX du ciment utilisé.

II.2.3. Filler calcaire

En général, le filler est considéré comme ajout inerte. Il est utilisé pour compléter la courbe granulométrique du sable dans la partie fine et à combler les vides [Chauvin et al., (1988) ; Sablocrete, (1994)]. Le filler utilisé dans notre étude est de nature calcaire obtenu par tamisage des restes de concassage (au tamis 80 µm) d'une carrière située à la sortie nord de la ville de HASSI MESSAOUD- OUARGLA (Figure II.6.). La masse volumique absolue et apparente du filler calcaire utilisé sont respectivement 2500 kg/m³ et 981 kg/m³.

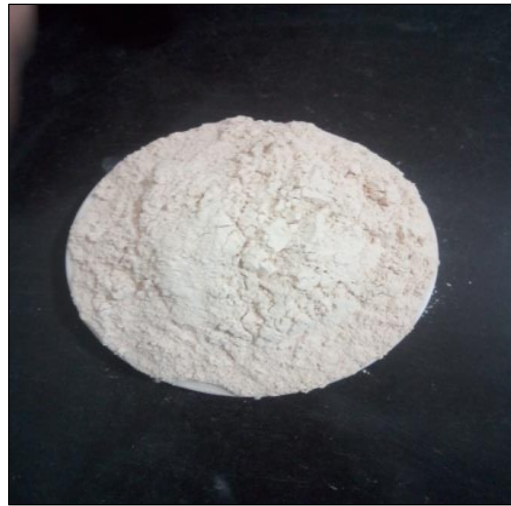


Figure II.6. Filler calcaire utilisé.

L'analyse chimique du filler calcaire par l'essai de diffractométrie aux rayons X (DRX) est montrée dans la **Figure II.7**. Cette analyse a montré la présence de l'espèce de carbonate de calcium (CaCO_3) avec un pourcentage important. D'autres espèces ont été notées, telles que le silice (SiO_2) et l'oxyde de calcium (CaO), mais avec des pourcentages faibles, ce qui confirme que le filler est de nature purement calcaire.

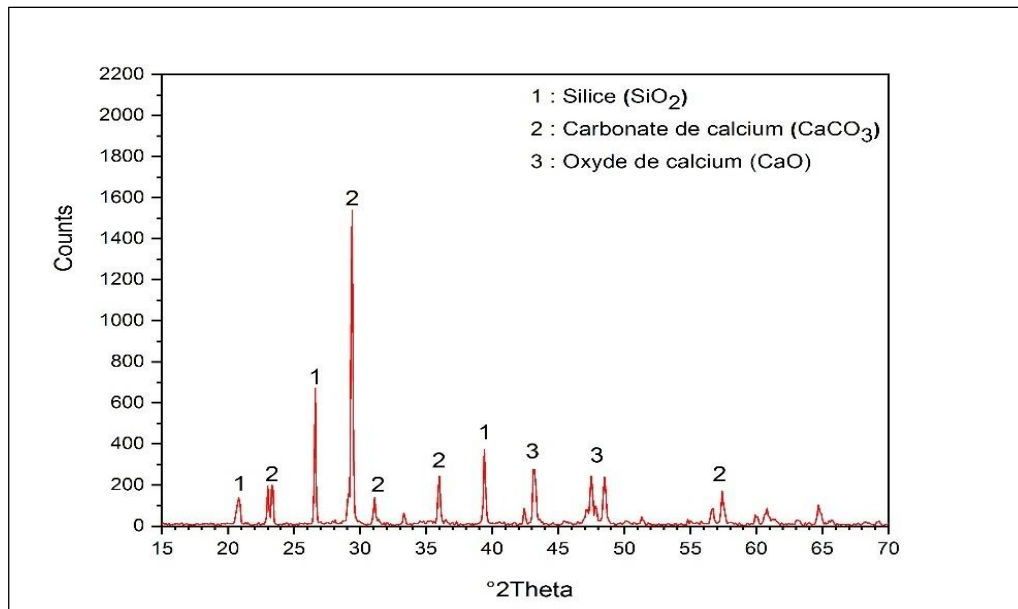


Figure II.7. Analyse chimique par DRX du filler calcaire utilisé.

II.2.4. Poudre de verre

L'utilisation du verre broyé en substitution partielle du ciment dans les bétons (ordinaire, haute performance et auto plaçant) est relativement récente. La poudre de verre est un ajout alternatif de couleur blanche. L'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [Idir et al., (2011) ; Jain et al., (2010) ; Zidol, (2009) ; Schwarz et al., (2008) ; Shayan et al., (2004, 2006) ; Shi et al., (2005)].

Le verre utilisé dans la composition de béton de sable pour l'extrait la poudre est un déchet de verre industriels. La masse volumique absolue et la surface spécifique Blaine sont respectivement 2570 kg/m^3 et $288 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Le processus de broyage de verre s'est déroulé selon les étapes suivantes (Figure II.8.) :

- 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 $80 \mu\text{m}$, le reste est ramené au broyeur.



Figure II.8. Poudre de verre utilisée.

Les résultats de l'analyse chimique de la poudre de verre utilisée en (%) sont présentés dans le Tableau II.3. [Youcef et al., (2017)]. Ces résultats ont été confirmés par l'essai de diffractométrie aux rayons X (Figure II.9.).

Tableau II.3. 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
Quantité (%)	70.26	0.85	2.03	8.92	1.71	0.18	0.58	5.00	0.62

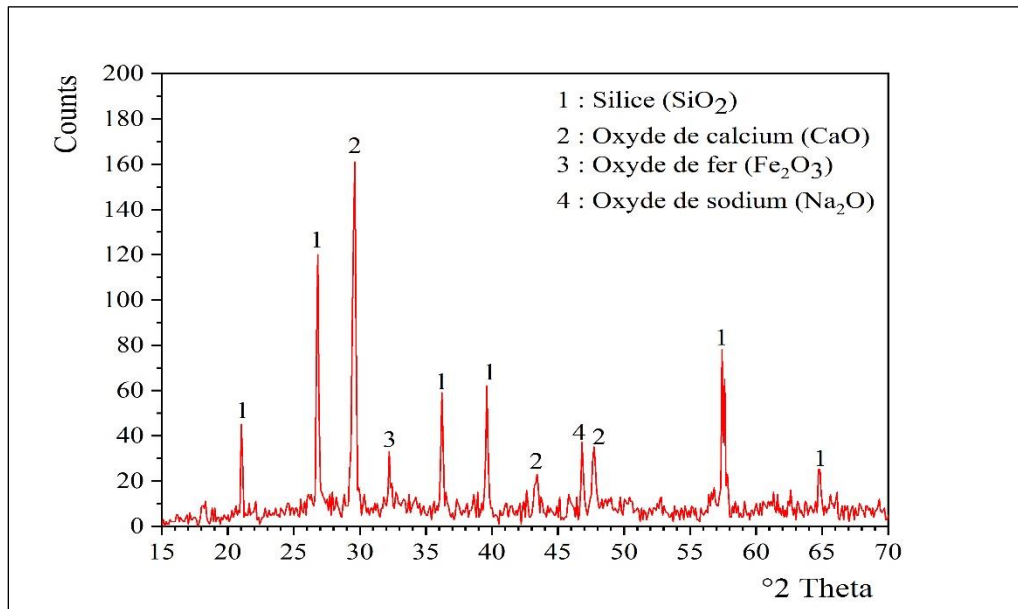


Figure II.9. Analyse chimique par DRX de la poudre de verre utilisée.

D'après la figure, l'analyse par DRX a montré l'existence des compositions chimiques suivantes : la silice (SiO₂), l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et l'oxyde de sodium (Na₂O). Puisque la poudre de verre est contenue de pourcentage plus élevé de silice (SiO₂ ≥ 70%), ce qui montre que le verre utilisé est de nature siliceuse.

II.2.5. 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 Kaouther). L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P18 303.

II.2.6. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un super-plastifiant algérien du type « MEDAFLOW 30 » produit par la société « GRANITEX », Oued Smar (Wilaya d'Alger). 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 super-plastifiant sont présentées dans le **Tableau II.4.** [Notice Technique, (2005)].

Tableau II.4. Caractéristiques du super plastifiant utilisé [Notice Technique, (2005)].

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

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. 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 minute 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 [Amrani et al., (2020)].

Après malaxage, le matériau est introduit dans des moules de (100×100×100) mm³ et (40×40×160) mm³ pour les essais programmés dans notre étude. 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. 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.

Les principes essentiels de l'essai (**Figure II.10.**) :

- On remplit le cône en béton ;
- Le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige (25 coups / 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 et arrondi au centimètre le plus proche.

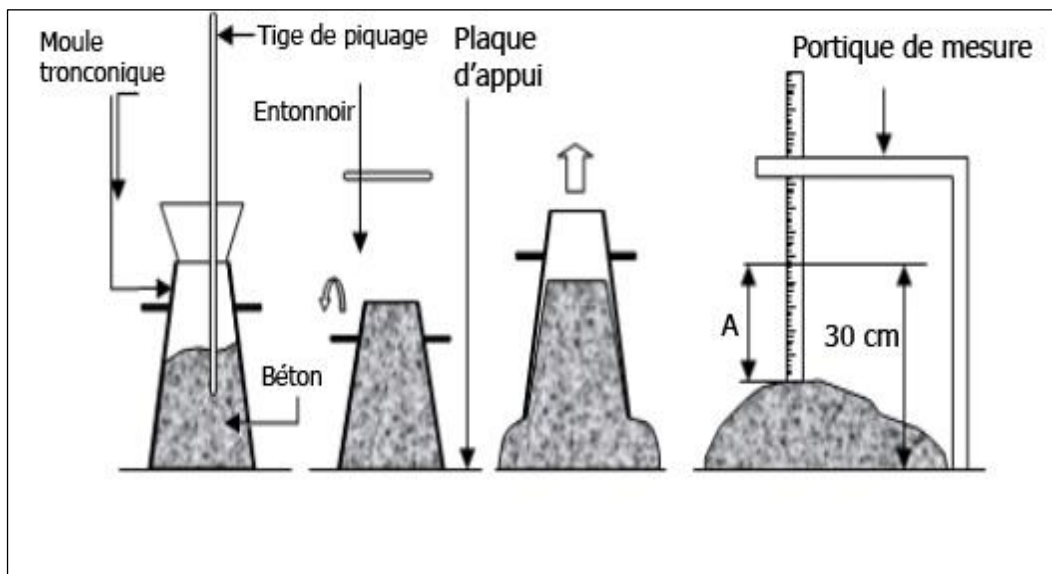


Figure II.10. Dispositif de mesure d'affaissement.

Par ailleurs, la norme européenne EN 206-1 définit les différentes classes d'affaissement d'un béton indiquées dans le **Tableau II.5.** Plus l'affaissement est important, plus le béton est mou ou fluide.

Tableau II.5. Classes de consistance du béton.

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.3.3. 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 EN 12390-7. Elle est déterminée par pesée de l'échantillon et mesure de son volume.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

γ : Masse volumique (kg/m^3) ;

M : Masse de l'échantillon (kg) ;

V : Volume de l'échantillon (m^3).

II.3.3.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression est mesurée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($100 \times 100 \times 100$) mm^3 à raison de trois éprouvettes par composition (**Figure II.11.**). Cet essai a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de type « CONTROLS » à double quadrant ayant une capacité maximale de 1500 kN. 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 (2.5 kN/s) permettant aux plateaux de comprimer l'éprouvette jusqu'à la rupture. L'essai a été réalisé conformément à la norme NF P18 406. La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

F_c : Force de compression ;

A : Surface transversale de l'éprouvette.

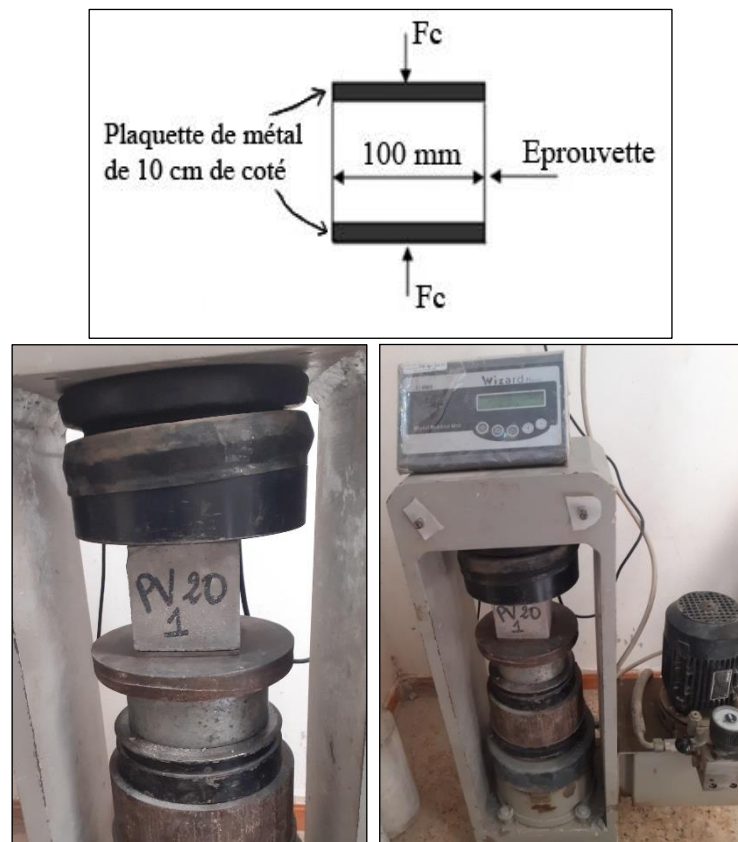


Figure II.11. Dispositif de l'essai de la résistance à la compression.

II.3.3.3. Variations dimensionnelles

Le retrait du béton est mesuré conformément à la norme NF P15 433. L'essai consiste à mesurer la variation de la longueur entre deux faces opposées d'éprouvettes prismatiques (40×40×160) mm³, équipées de plots métalliques à chaque extrémité. La mesure se fait à l'aide d'un appareil spécifique muni d'un comparateur digital qui permet le suivi de sa longueur (**Figure II.12.**).

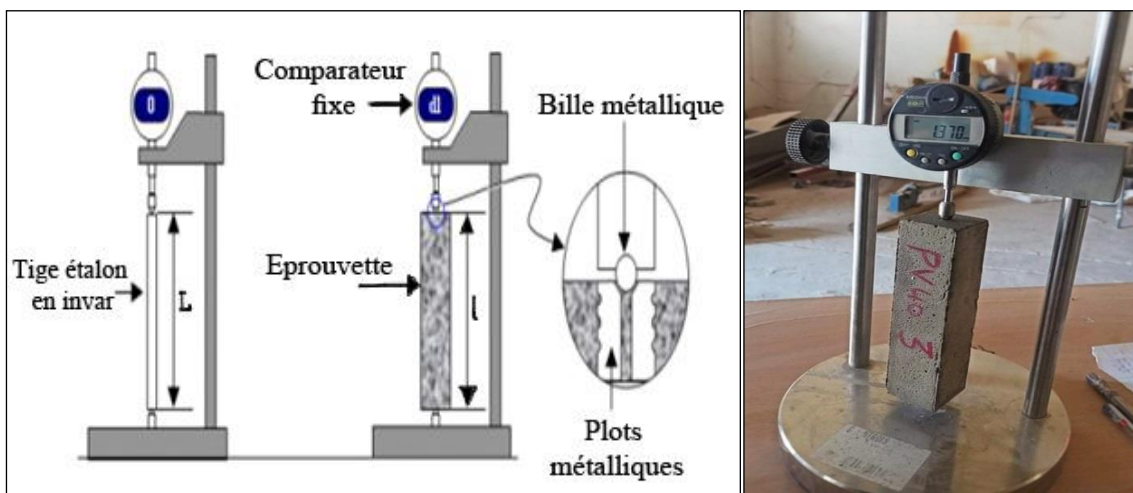


Figure II.12. Dispositif de mesure de retrait.

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon de longueur $L = 160$ mm. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré :

$$l = L + dl(t) \quad (\text{II. 8})$$

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera :

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad (\text{II. 9})$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad (\text{II. 10})$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même bloc de moules. Les éprouvettes ont été conservées à l'air libre et les mesures ont été effectuées dans les conditions ambiantes du laboratoire.

II.3.3.4. Caractéristiques thermiques

De nombreuses méthodes de mesure des caractéristiques thermiques des matériaux s'appuient donc sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps. Les essais de la caractérisation thermiques dans notre étude sont réalisés à l'aide d'une sonde Hot Disk TPS 500 (TPS : Transient Plane Source) qui est une technique proposée pour des études de transport thermique de matériaux solides [Gustavsson et al., (1994)]. La méthode est pratique et très rapide car aucune forme particulière n'est requise pour l'échantillon testé et la taille de cet échantillon est relativement limitée. En plus de sa rapidité et de la facilité d'utilisation, le principal avantage de cette technique est la possibilité de la détermination simultanée de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique ainsi que la capacité thermique des échantillons à partir d'un seul enregistrement (**Figure II.13.**).



Figure II.13. Procédé de l'essai de la sonde Hot Disk TPS.

II.3.3.5. Analyse de la microstructure

II.3.3.5.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction de rayons X a été effectuée grâce à un diffractomètre de type « PROTO » (**Figure II.14.**) sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm . Les diffractogrammes sont des intensités de phases (pic) en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Le programme de diffraction de rayons X adopté est $2\theta : 15^\circ - 70^\circ$ et est en fonction de la nature de l'échantillon.



Figure II.14. Diffractomètre de type « PROTO ».

II.3.3.5.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

La microstructure a été examinée aussi par microscopie électronique à balayage (MEB) de type Phenom ProX, qui consiste à balayer successivement, ligne par ligne la surface de l'échantillon avec un faisceau d'électrons puis transmettre le signal du détecteur à un écran. Les observations au MEB ont été effectuées sur des surfaces d'échantillons d'environ 5g découpés des échantillons d'éprouvette (40×40×160) mm³ (**Figure II.15.**).

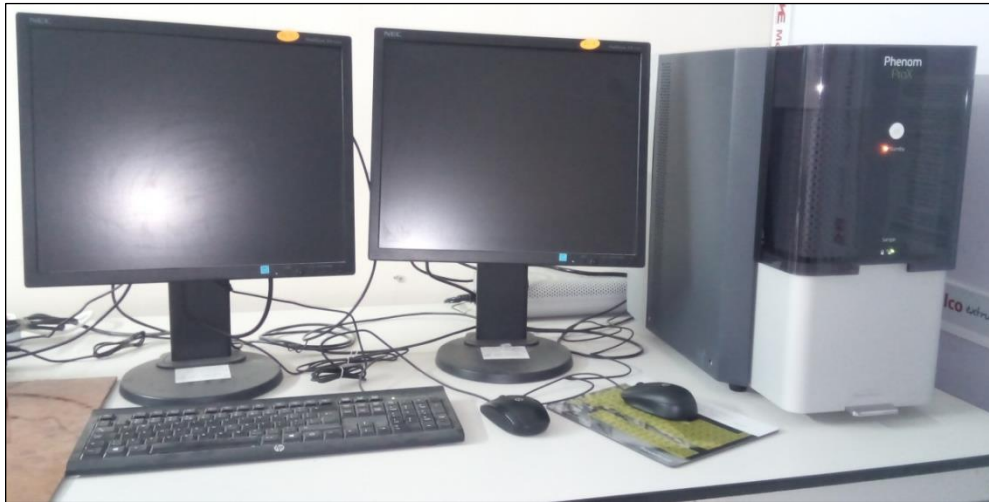


Figure II.15. Microscopie électronique à balayage « Phenom ProX ».

II.3.3.6. Essai de la carbonatation accélérée

La carbonatation est la réaction chimique entre le dioxyde de carbone présent dans l'air et la portlandite qui donne du carbonate de calcium CaCO₃, ou calcite. La diminution du pH du béton engendrée par cette pathologie entraîne la dépassivation puis la corrosion des armatures en acier dont les produits expansifs provoquent l'éclatement du béton d'enrobage et l'apparition de tâches de rouille sur le parement. La carbonatation est un phénomène très lent dans l'atmosphère, c'est pourquoi, il a fallu trouver un moyen pour accélérer la carbonater du matériau ciment aire en garantissant des résultats représentatifs de ce phénomène naturel. Cet essai est appelé « essai de la carbonatation accélérée ».

Le principe de l'essai de la carbonatation accélérée consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur de béton carbonaté dans des bétons conservés dans un mélange gazeux (50% CO₂ +50% air) dans l'enceinte de carbonatation avec contrôle de l'humidité relative qui doit être comprise entre 40% et 80%. Certains essais ont été réalisés avec 100% de CO₂ sous une pression de 15 atm [**Ollivieret al., (2008)**].

L'essai est réalisé selon le protocole d'essai AFPC-AFREM [Norme XP P18-458, (1997)] (Figure II.16.). La mesure de la profondeur de carbonatation s'effectue sur des éprouvettes (100×100×100) mm³.

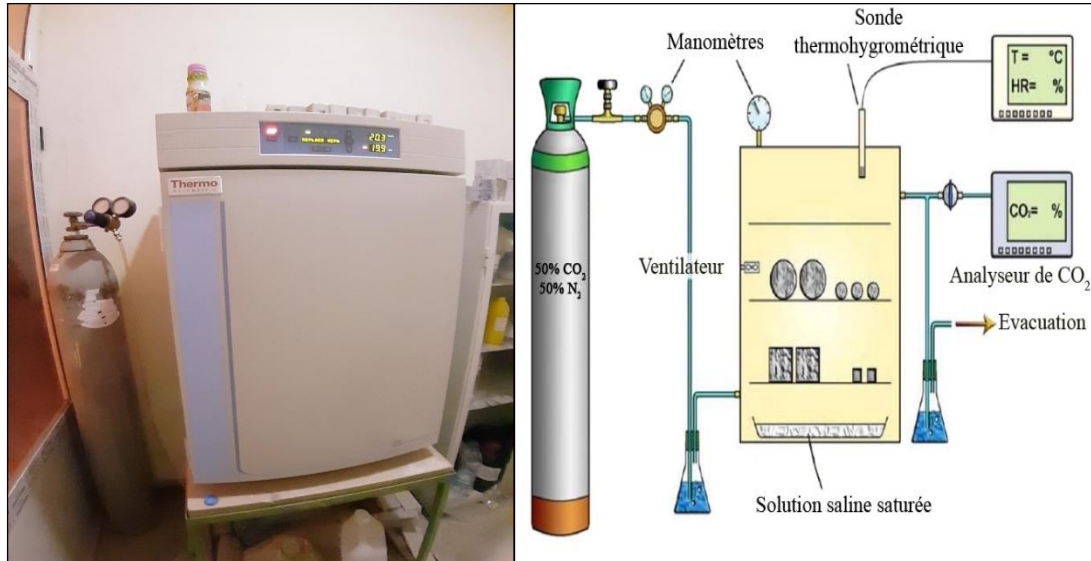


Figure II.16. Schéma d'une station de carbonatation accélérée.

Le pré-conditionnement de l'essai est comme suit :

- Les éprouvettes subissent une cure en ambiance humide (humidité relative supérieure à 95% ou dans l'eau) pendant 28 jours, selon le mode opératoire recommandé pour déterminer la masse volumique apparente et la porosité. A l'issue de cette phase, les corps d'épreuve sont pesés.
- Ils sont placés dans une étuve à $40 \pm 2^\circ\text{C}$, pendant deux jours, ensuite pesés [Ollivier et al., (2008)].
- Les éprouvettes sont posés dans une enceinte, espacés de 2 cm l'un de l'autre (Figure II.17.). L'indicateur utilisé, pour mettre en évidence le béton carbonaté, est une solution de phénolphtaléine en flacon pulvérisateur dosée à 1/100 dans l'alcool.
- Les deux faces carrées de chaque échantillon doivent être recouvertes avec du papier aluminium adhésif afin d'orienter la diffusion du CO₂ (Figure II.18.).

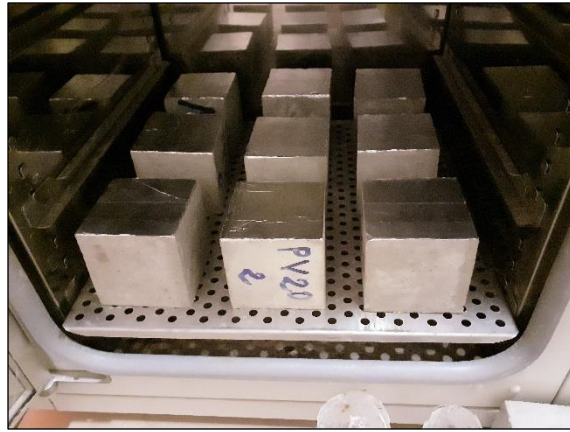


Figure II.17. Disposition des éprouvettes dans l'enceinte.



Figure II.18. Echantillons recouverts d'aluminium adhésif.

II.3.3.7. 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 ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) jusqu'à saturation du matériau, puis retirées et pesées (soit P_h). Les valeurs sont prises par la moyenne de trois pesées par éprouvettes de chaque composition. La capacité d'absorption d'eau est donnée par la formule suivante :

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

II.3.3.8. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons moulées ou carottées, non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures des taux d'absorptions, les éprouvettes sont pré-conditionnées selon les recommandations de la procédure AFREM. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de $(40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3)$. Le protocole de cet essai consiste à sécher des éprouvettes prismatiques à l'étuve à $105 \pm 50^\circ\text{C}$ pendant 72 heures. Les surfaces latérales des éprouvettes sont ensuite imperméabilisées à l'aide d'une matière plastique étanche, et ce pour assurer la remonter unidirectionnelle de l'eau par capillarité. Les éprouvettes sont ensuite pesées, soit M_0 . Les mêmes éprouvettes sont posées dans un récipient sur leurs faces les plus petites $(40 \times 40 \text{ mm}^2)$, et séparées d'au moins 1 cm de son fond. Le récipient est ensuite rempli en eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient partiellement immergées (environ 5 mm). Il faut noter que le niveau d'eau doit rester constant tout au long de l'essai. Les éprouvettes sont retirées et pesées à des moments précis (**Figure II.19.**). L'essai est terminé après 24 heures. Le taux d'absorption par capillarité est défini par la relation suivante :

$$i(t) = \frac{M(t) - M(0)}{\rho_w \cdot A} \quad (\text{II. 12})$$

Avec :

$i(t)$: Quantité d'eau absorbée par unité de surface (mm) ;

$M(t)$: Masse de l'échantillon humide à l'instant en grammes ;

$M(0)$: Masse initiale de l'échantillon à l'état sec en grammes ;

A : Section de la base de l'éprouvette en mm^2 ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm^3).

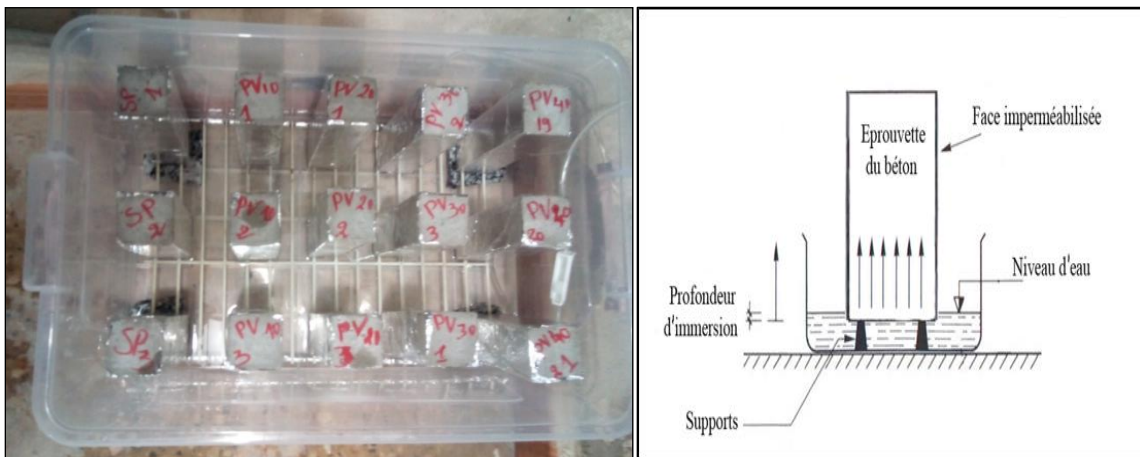


Figure II.19. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

II.3.3.9. Essai « gel – dégel »

Il existe un certain nombre de protocoles d'essais pour tester la durabilité d'un béton au gel - dégel. Ces procédures varient d'un pays à l'autre selon la sévérité du climat. Dans notre cas, et selon la classification de norme française AFNOR P18 205, le type de gel qui caractérise les conditions climatiques locales est le « gel faible ». Pour ces raisons-là, nous avons opté pour l'essai recommandé par la norme ASTM D 560. Cet essai comprend douze cycles de vieillissements accélérés où chacun est caractérisé par quatre heures de gel suivies par une immersion totale dans l'eau jusqu'au dégel complet (quatre heures environ). Le gel a été effectué dans l'air à une température de -5°C et le dégel dans l'eau à une température de 23°C . Les cycles gel - dégel, variant donc de -5°C à 23°C , ont commencé à l'âge de 28 jours. Les éprouvettes utilisées sont des cubes ($100\times 100\times 100\text{ mm}^3$) comme le montre la **Figure II.20**.

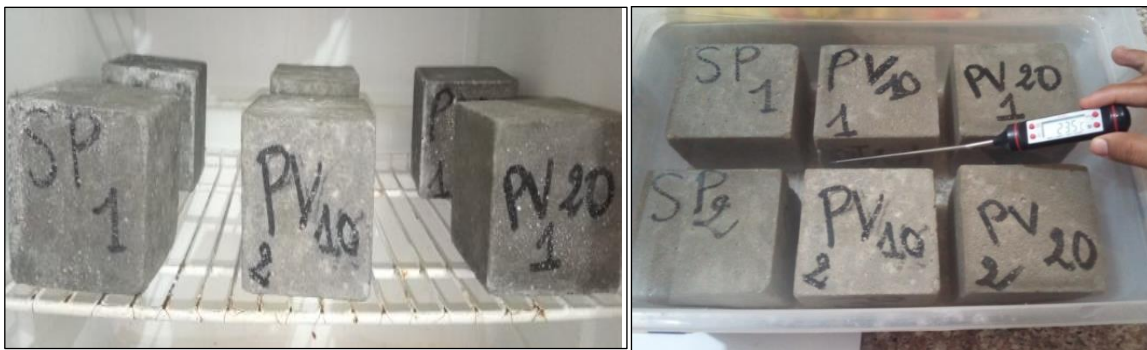


Figure II.20. Essai gel - dégel.

II.3.3.10. Essai « mouillage – séchage »

Il comprend douze cycles de vieillissement accélérés dont chacun consiste à immerger les éprouvettes cubiques dans l'eau à une température de 23°C pendant cinq heures, suivi par un séchage à l'étuve pendant 42 heures à 70°C . Les cycles mouillage-séchage, ont aussi commencé à l'âge de 28 jours avec des éprouvettes cubiques de dimensions ($100\times 100\times 100\text{ mm}^3$) comme le montre la **Figure II.21**. L'essai est réalisé selon la norme ASTM D 559.



Figure II.21. Essai mouillage - séchage.

II.3.3.11. Résistance aux milieux acides (5% HCl)

L'essai de la résistance aux attaques acides, consiste à suivre l'évolution de la masse et l'analyse chimique d'échantillons immergés dans une solution saturée en acide. Les éprouvettes testés sont de forme prismatique ($40 \times 40 \times 160$) mm³. L'essai a été réalisé après 28 jours de conservation des échantillons dans l'eau. Ensuite, les éprouvettes ont été sortis et laissés dans une ambiance de 23°C pendant 30 minutes pour déterminer la masse M_0 avant leurs immersions dans des solutions d'acide.

L'acide chlorhydrique (concentration de 5%) a été préparé dans des récipients résistants à l'acide (**Figure II.22.**). Les échantillons sont alors disposés et espacés de 2 cm et recouvert d'environ de 2 cm de solution acide (ASTM C 267). De plus, un papier pH a été utilisé pour surveiller les niveaux du pH chaque deux jours ($\text{pH} < 4$) (**Figure II.23.**). Les échantillons sont évalués physiquement par la variation de la masse et chimiquement par les analyses DRX et MEB.

Pour suivi de variation de la masse, les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le béton altéré et puis on les laisse sécher pendant 30 minutes. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières. Cette opération est effectuée après 7, 14, 21, 28, et 60 jours. Dans le cas où le pH a changé son état ($\text{pH} > 4$), la solution est renouvelée (d'environ chaque 7 jours d'immersion).

La variation de la masse est calculée à partir de la relation suivante :

$$V_m = \left(\frac{M_0 - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

V_m : Variation de la masse en (%) ;

M_0 : Masse de l'éprouvette avant exposition à l'attaque acide en (gramme) ;

M_i : Masse de l'éprouvette au moment i d'attaque en (gramme).

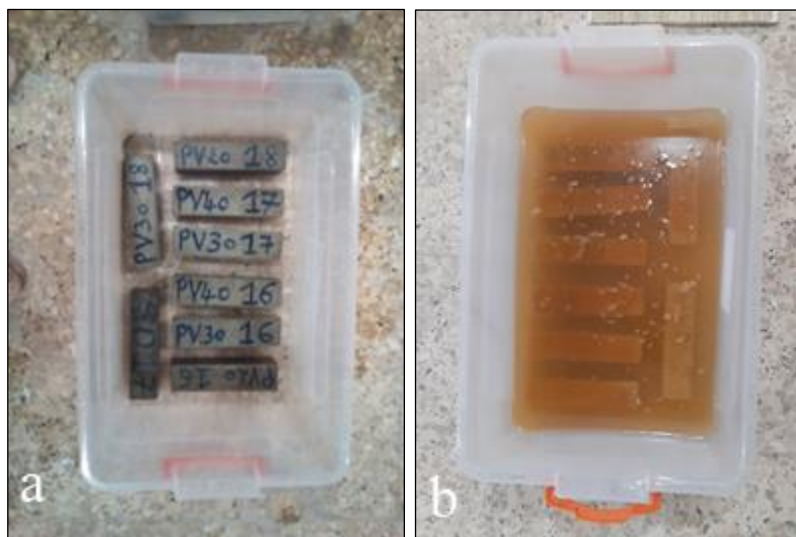


Figure II.22. Bacs de conservation des éprouvettes dans la solution (HCl). (a) Cas de renouvellement de la solution. (b) Cas des éprouvettes après une semaine dans la solution.



Figure II.23. Papier de pH utilisé.

II.4. Conclusion

D'une façon générale, on peut conclure que les différentes analyses physiques et chimiques menées sur les matériaux de base nécessaires pour la fabrication des bétons étudiés, montrent qu'il n'y a aucun risque qui peut affecter les propriétés des bétons.

En deuxième partie de ce chapitre, les techniques expérimentales qui ont été utilisées pour la détermination des différents paramètres étudiés ont été présentées. Pour toutes ces techniques, nous avons présenté les procédures détaillées.

Enfin, on note que les résultats présentés dans ce chapitre contribueront, sans aucun doute, à la bonne interprétation des résultats obtenus lors de la présente étude.

CHAPITRE III :

Résultats et Discussions

Chapitre III :

Résultats et Discussions

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'effet de poudre de verre sur la durabilité des bétons étudiés. Les principaux essais de durabilité étudiés sont la carbonatation accélérée, l'absorption d'eau par capillarité, l'absorption d'eau par immersion totale, le retrait, les propriétés thermiques, l'essai "gel-dégel", l'essai "mouillage-séchage" et la résistance à l'acide chlorhydrique (HCl). Une analyse sommaire et des tentatives de discussion et d'exploitation des résultats ainsi obtenus sont donnés.

III.2. Compositions des bétons étudiés

Les bétons étudiés dans notre recherche sont des bétons de sables alluvionnaire-dunaire à base de poudre de verre. Les mélanges sont préparés avec des fractions volumiques de 10% jusqu'à 40%, avec un intervalle de 10% de poudre de verre (par rapport à la quantité massique du ciment). Donc cinq compositions ont été choisies pour déterminer l'influence de la poudre de verre sur la durabilité des bétons étudiés. 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**).

Par ailleurs, la composition optimale de béton de sable à base de poudre de verre est inspirée des travaux précédents [Amrani et al., (2020)]. Le détail de cette composition est donné dans le **Tableau III.1**.

Tableau III.1. Compositions des bétons étudiés.

Matériaux	SPV	PV10	PV20	PV30	PV40
Ciment (kg/m ³)	400	360	320	280	240
Sable (kg/m ³)	1296	1296	1296	1296	1296
Filler calcaire (kg/m ³)	150	150	150	150	150
Poudre de verre (%)	0	10	20	30	40
Eau de gâchage (l/m ³)	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.3.3. Caractérisation du béton frais

III.3.3.1. 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.2.**

Tableau III.2. 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

D'après les résultats, 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.

Ce résultat peut s'expliquer 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 la **Figure III.1**.

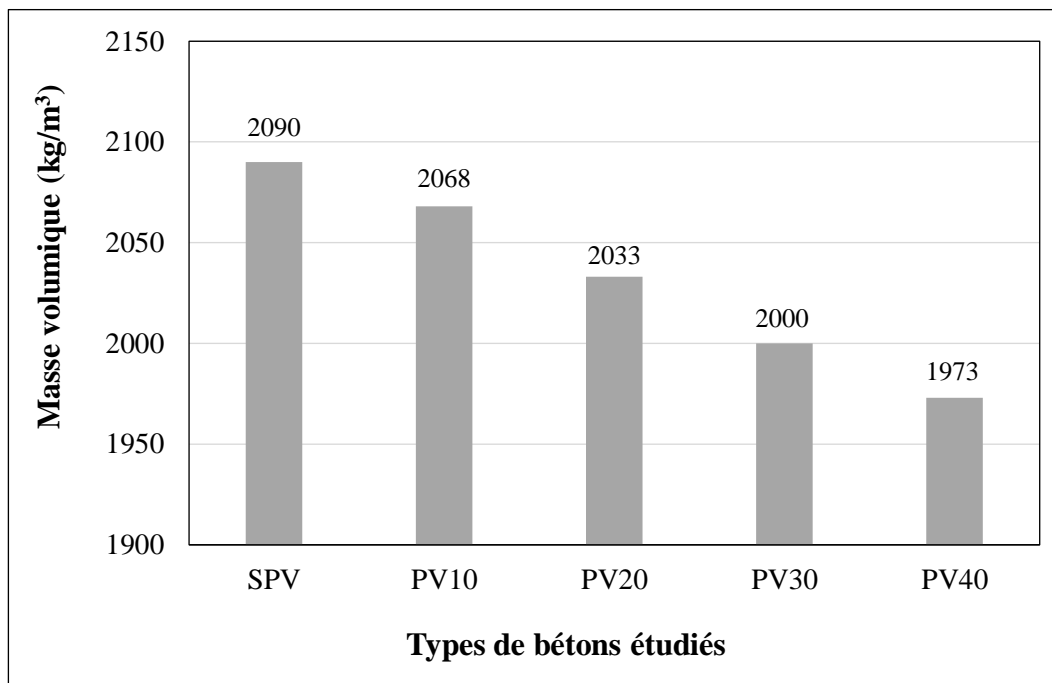


Figure III.1. Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés.

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 de 1.05% (PV10) à 5.60% (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 varié entre 800 kg/m³ et 2000 kg/m³. Dans notre cas, nous constatons que la masse volumique des bétons étudiés 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. Résistance à la compression

Les valeurs moyennes de la résistance à la compression mesurées à 28 jours des différents types de bétons étudiés sont présentées par la **Figure III.2**.

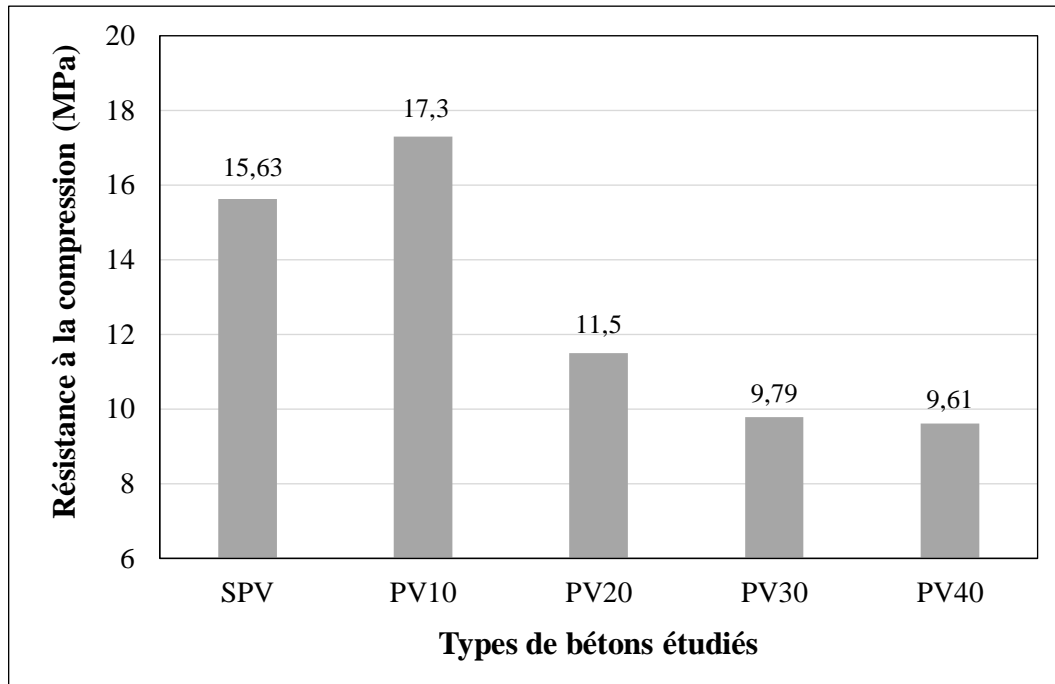


Figure III.2. Evolution de la résistance à la compression à 28 jours.

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 17.3 MPa. Cette amélioration de la résistance peut être expliquée par l'effet physique et chimique de la poudre de verre. La poudre 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). Également, on peut expliquer que la matrice cimentaire avec de 10% de poudre de verre a donné une microstructure plus compacte et donc plus résistante.

Par contre, avec l'augmentation du pourcentage de poudre de verre (cas de 20%, 30% et 40%), on constate que les valeurs de la résistance à la compression ont tendance à diminuer, cette diminution peut être expliquée par une mauvaise compacité. Pour ces teneurs, les taux de diminution de la résistance à la compression des PV20, PV30 et PV40 par rapport à PV10% sont d'environ 33.50%, 43.40% et 44.40% respectivement.

II.3.2.3. Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles ont été analysées par le suivi du retrait des composites étudiés dans le temps jusqu'à 28 jours. Les valeurs de retrait ainsi obtenus sont données dans le **Tableau III.3.**, et illustrées par la **Figure III.3.**

Tableau III.3. Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées.

Type des bétons étudiés		SPV	PV10	PV20	PV30	PV40
		Retrait mm/m				
Age en jours	0	0	0	0	0	0
	3	0.273	0.117	0.135	0.156	0.179
	7	0.519	0.417	0.438	0.460	0.498
	14	0.656	0.567	0.592	0.635	0.706
	21	0.800	0.631	0.750	0.823	0.888
	28	0.808	0.642	0.763	0.829	0.894

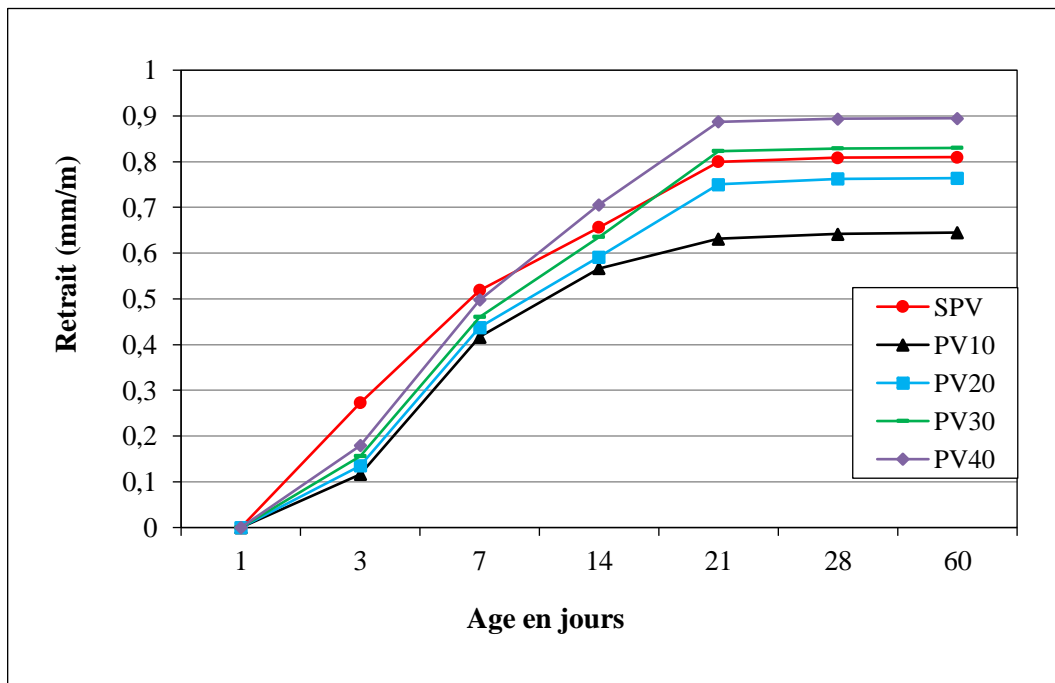


Figure III.3. Evolution du retrait en fonction de l'âge des compositions étudiées.

D'après les résultats obtenus, on note que dans l'ensemble, l'ajout de 10% et 20% de poudre de verre diminue le retrait par rapport au SPV. Les taux de diminution enregistrés sont d'environ 20.50% pour le cas de PV10 et 5.60% pour le cas de PV20. Par contre, l'augmentation de poudre à plus de 20% conduit à une augmentation de retrait où les taux d'augmentation sont d'environ 2.60% (cas de PV30) et 10.60% (cas de PV40).

Si et al., montre que le retrait du mélange de géopolymères à base de métakaolin contenant 0% à 20% de déchets de verre en poudre était généralement réduit par rapport à celui des échantillons sans poudre de verre, où la composition de 10% a donné le meilleur résultat [Si et al., (2020)]. Également, Shayan et al., montre que le retrait diminue avec l'incorporation de poudre de verre [Shayan et al., (2006)].

III.3.2.4. Caractérisation thermique

Le **Tableau III.4.**, est mentionné les résultats des propriétés thermiques des bétons étudiés. D'après les résultats obtenus, on note une diminution de la conductivité thermique dans les compositions contenant la poudre de verre par rapport à la composition de référence SPV, où les taux de diminution sont 12.74% pour le cas PV10, 17.87% pour le cas PV20, 22.59% pour le cas PV30 et 28.67% pour le cas PV40.

Du et al., montre que l'ajout de 25% de poudre de verre dans le ciment a diminué la conductivité thermique avec de taux 24.05% [Du et al., (2021)]. Ces valeurs sont considérées comme bons pour la recherche de béton de sable à isolation thermique.

Également, la composition de PV10 a donné la valeur le plus faible de diffusivité thermique qui caractérise la notion de l'inertie thermique et la chaleur spécifique. La diffusivité thermique a augmenté avec l'augmentation de poudre de verre, alors que on a enregistré une diminution de la chaleur spécifique, où le taux de diminution varié entre 7.80% (cas de PV10) à 27.70% (cas de PV40) par rapport à la composition de référence SPV.

Tableau III.4. Propriétés thermiques des bétons étudiés.

Composition	Conductivité thermique λ (W/m .K)	Chaleur spécifique C (J/m ³ .K)	Diffusivité thermique E (m ² /s) x10 ⁻⁶
SPV	1.695	1526.870	0.531
PV10	1.479	1407.731	0.508
PV20	1.392	1345.398	0.509
PV30	1.312	1247.145	0.526
PV40	1.209	1103.898	0.555

II.3.2.5. Analyse de la microstructure

III.3.2.5.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

Les analyses par diffraction de rayons X (DRX) ont été effectuées sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm des bétons étudiés. Les **Figures III.4., III.5.**, montrent une comparaison entre les bétons étudiés sans et avec de poudre de verre.

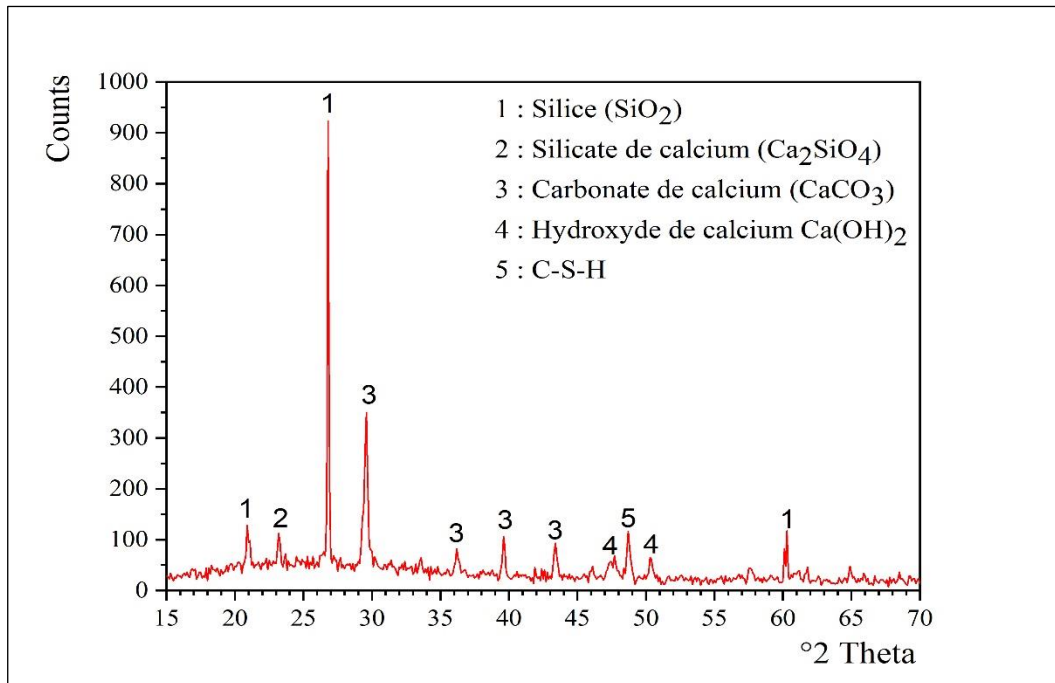


Figure III.4. Diffractogramme du béton de sable sans poudre de verre.

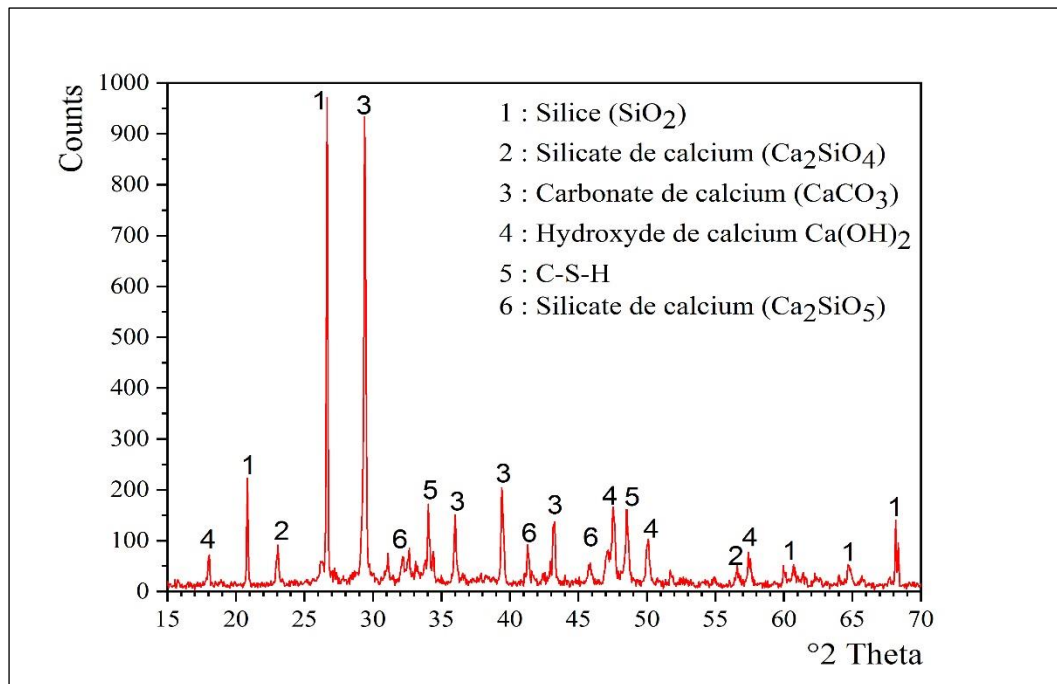


Figure III.5. Diffractogramme du béton de sable avec poudre de verre.

D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'ajout de poudre de verre contribue favorablement au développement des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Les résultats peuvent être expliqués dans les points suivants :

- L'augmentation de l'intensité des pics de dioxyde de silicium (SiO_2), ceci pourra s'expliquer par la présence de poudre de verre qui est riche en silice ($\text{SiO}_2 \geq 70\%$).

- Bien que le carbonate de calcium (CaCO_3) soit abondant dans le sable alluvionnaire et le filler calcaire, mais l'intensité des pics est augmentée, ceci pourra s'expliquer par la réaction chimique d'oxyde de calcium (CaO) en présence de dioxyde de carbone (CO_2), la réaction se fait par l'équation suivante :



- L'augmentation de l'intensité des pics d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), ceci pourra s'expliquer par la réaction chimique entre l'oxyde de calcium (CaO) et l'eau (H_2O), selon l'équation suivante :



- L'augmentation de l'intensité des pics de C-S-H (silicate de calcium hydraté) en raison de réaction chimique entre l'eau (H_2O) et le silicate de calcium (silicate bicalcique (Ca_2SiO_4) et silicate tricalcique (Ca_3SiO_5)).

III.3.2.5.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

Les **Figures III.6., III.7.**, présentent l'analyse des images menées par MEB des composites étudiés. Ces images présentent un aspect relativement homogène et compact en surface, on peut dire que la présence de poudre de verre dans la composition cimentaire n'altère pas l'adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre, la matrice avec la poudre de verre présente une porosité plus élevée par rapport à la matrice de référence, où nous enregistrons beaucoup de cavités sphériques de taille différente.

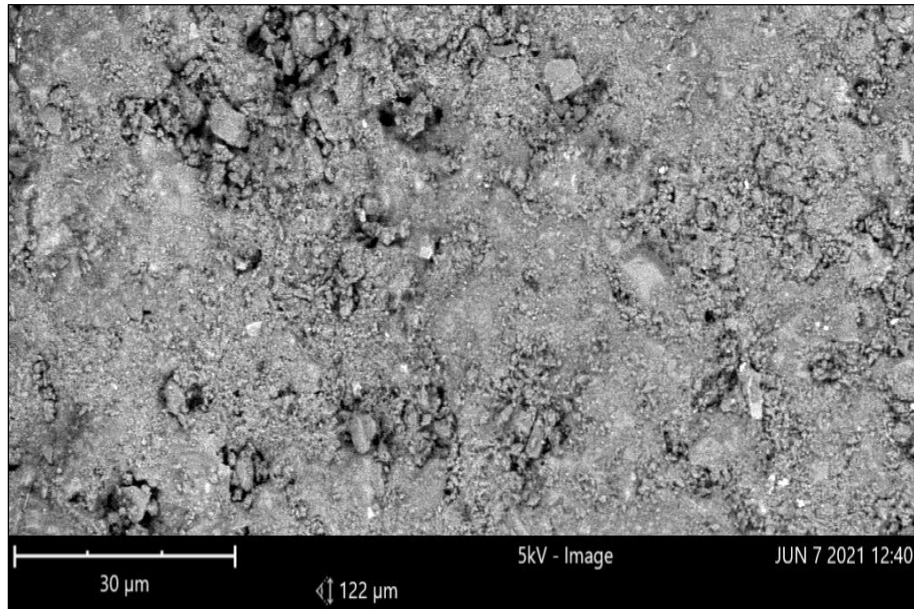


Figure III.6. Analyse au MEB des bétons étudiés (sans poudre de verre).

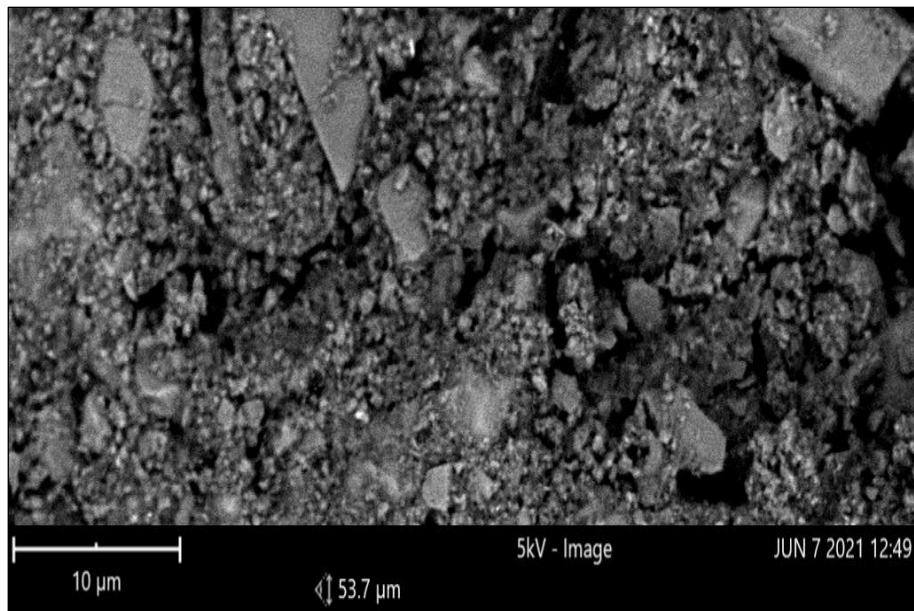


Figure III.7. Analyse au MEB des bétons étudiés (avec poudre de verre).

III.3.2.6. Essai de la carbonatation accélérée

III.3.2.6.1. Mesure de l'épaisseur du béton carbonaté

La mesure de la profondeur de carbonatation est réalisée à l'aide d'un double décimètre. Cinq lectures sont déterminées pour chaque face. Nous retenons comme résultat la moyenne arithmétique des épaisseurs mesurées à savoir :

- ✚ La distance la plus faible ;
- ✚ La distance la plus importante ;
- ✚ La moyenne relative aux trois distances intermédiaires.

La **Figure III.8.**, présente des photos prises à 28 jours de carbonatation. Notons que la zone carbonatée des échantillons prend la couleur du béton, alors que la zone saine prend une couleur rose. Le front qui sépare les deux zones est très net, ce qui montre sa régularité pour toutes les bétons étudiés.

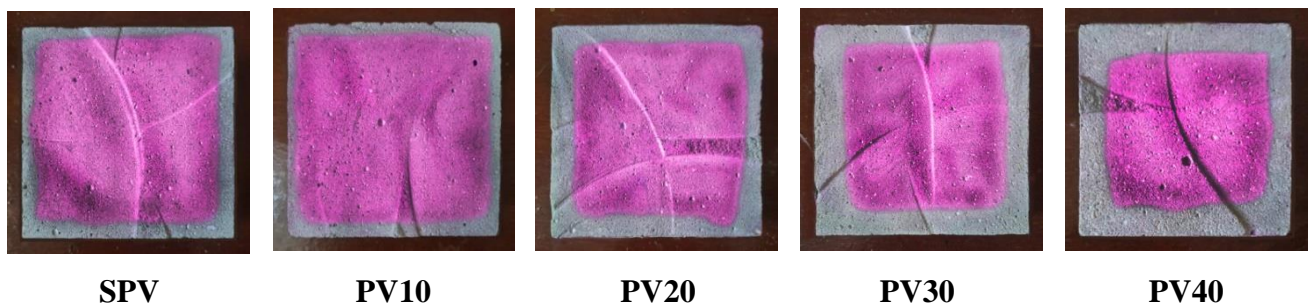


Figure III.8. Fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphtaléine des bétons étudiés à 28 jours.

D'après la figure, on remarque que l'ajout de 10% de poudre de verre a un effet positif sur la carbonatation accélérée par rapport au cas de référence SPV. Au-delà de 10%, l'augmentation du pourcentage de poudre de verre entraîne une augmentation de l'épaisseur du béton carbonaté.

La **Figure III.9.**, présente les valeurs moyennes des profondeurs de carbonatation des bétons étudiés à 28 jours.

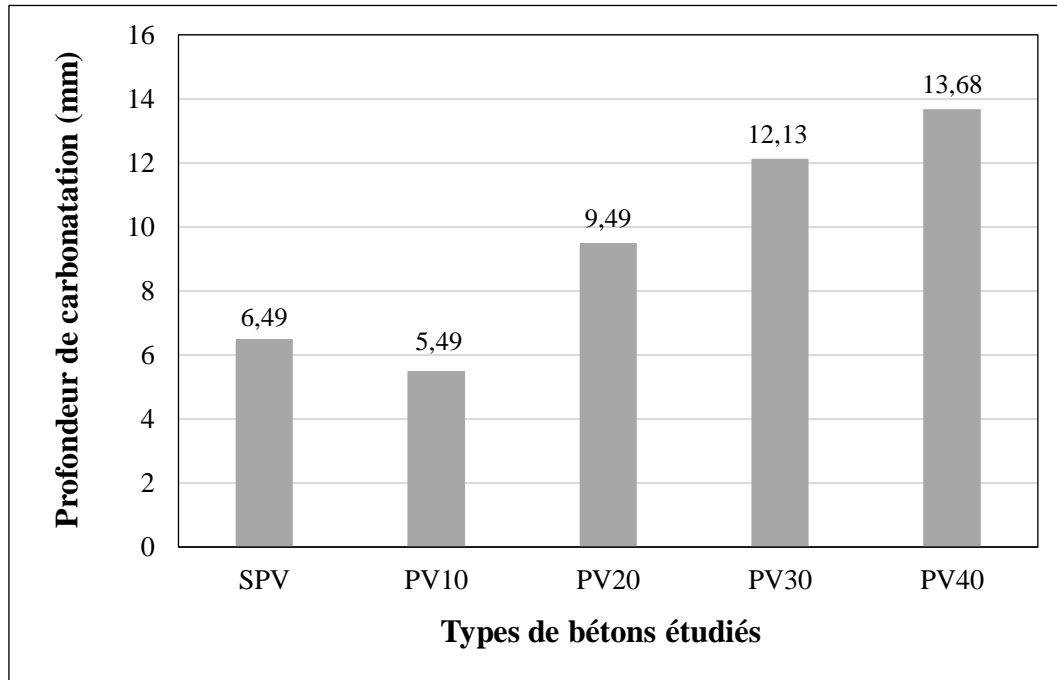


Figure III.9. Profondeur de carbonatation accélérée des bétons étudiés à 28 jours.

D'après les résultats obtenus, on constate une diminution de la profondeur de carbonatation pour le cas PV10 par rapport à la composition de référence SPV, où le taux de diminution est d'environ 15.40%. Par contre, l'augmentation de poudre de verre est suivie par une augmentation de la profondeur de carbonatation. Le taux d'augmentation varie entre 46.23% (cas de PV20), et 110.78% (cas de PV40).

La composition PV10 a donné de bons résultats, cela peut s'expliquer par sa bonne résistance mécanique. Selon des travaux antérieurs, la profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît [Tsukayama et al., (1980) ; Nischer, (1986) ; Parrott, (1987)].

III.3.2.6.2. Evolution du gain de masse

Parallèlement aux mesures des profondeurs carbonatées, un suivi de l'évolution du gain de masse a été réalisé sur l'ensemble des échantillons à 7, 14 et 28 jours, les résultats obtenus sont présentés sur la **Figure III.10.**

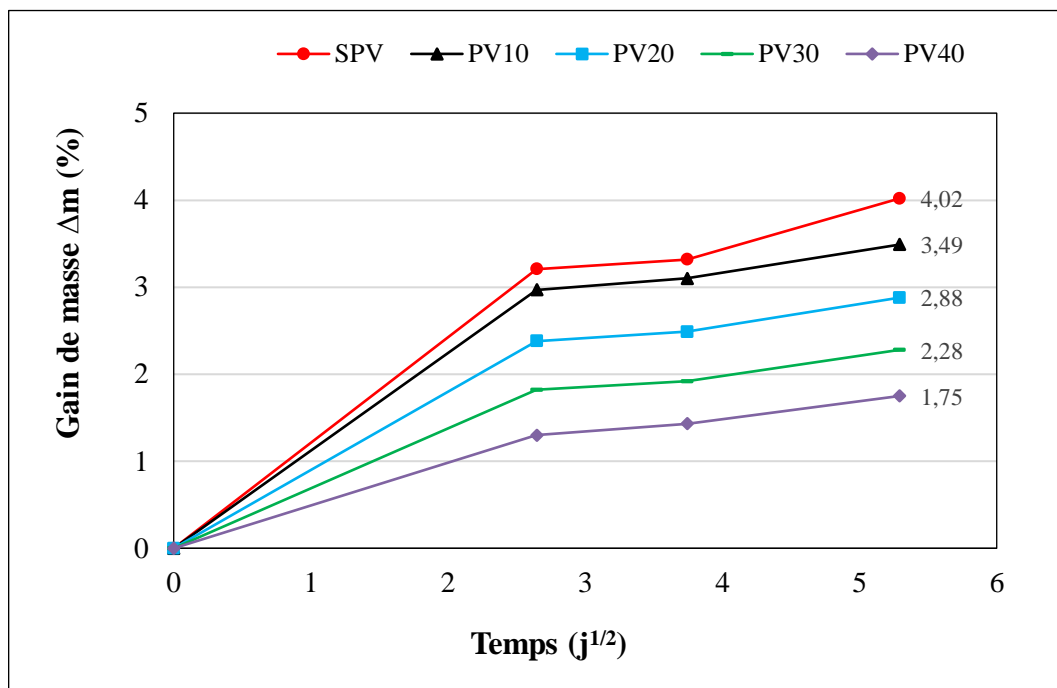


Figure III.10. Evolution du gain de masse des bétons étudiés.

D'après les résultats, on constate que l'ajout de poudre de verre au béton de sable a diminué le gain de masse par rapport au béton de référence SPV. A 28 jours, les pourcentages des diminutions enregistrés varient de 13.18% à 56.47%. Il est clair que le PV40 a donné la valeur la plus faible, comparé aux autres compositions.

Dans les 7 premiers jours, nous notons une augmentation rapide de la valeur de gain de masse pour toutes les compositions. Ensuite, et jusqu'à 28 jours, le gain de masse évolue avec une cinétique lente et parallèlement, l'une par rapport à l'autre.

Toutefois, ces résultats confirment que l'utilisation de poudre de verre donne une protection supplémentaire du béton de sable vis-à-vis du phénomène de carbonatation en comparaison avec le béton sans poudre de verre.

III.3.2.7. 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.5**.

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

Compositions	SPV	PV10	PV20	PV30	PV40
Ab (%)	6.24	6.69	6.98	7.12	7.23

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 de référence SPV. Cette légère augmentation peut être expliquée par l'augmentation des vides dans la matrice.

III.3.2.8. Essai d'absorption d'eau par capillarité

La Figure III.11., présente les valeurs moyennes des coefficients d'absorption pendant 24 heures d'essai sur les composites étudiés.

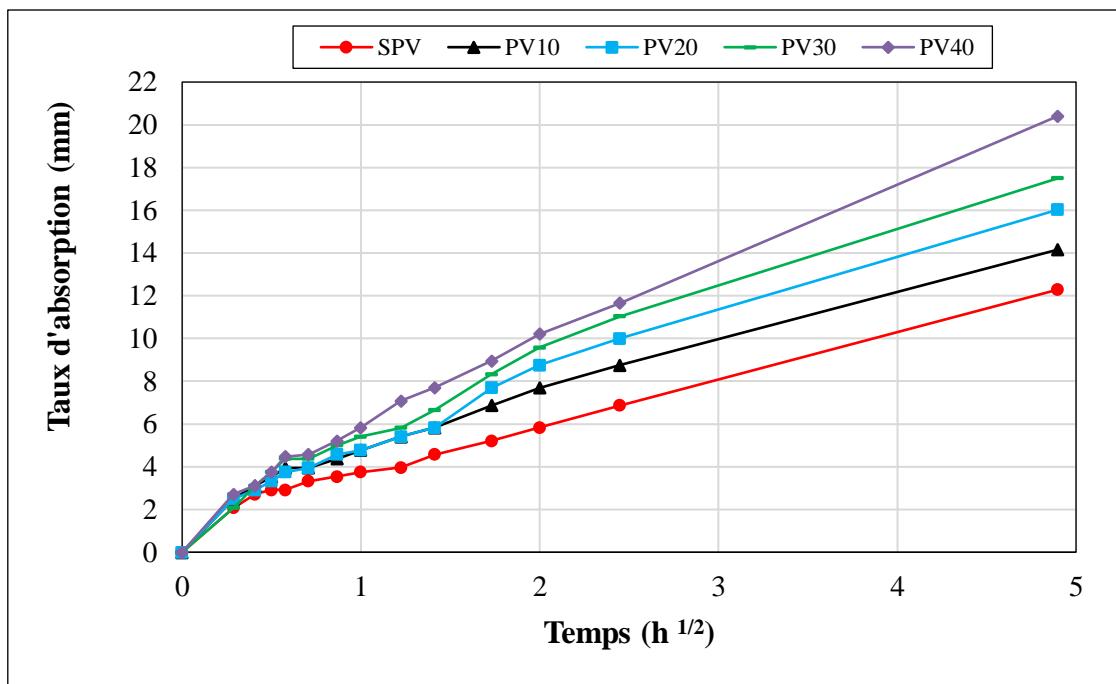


Figure III.11. Evolution de l'absorption capillaire des bétons étudiés en fonction du temps.

D'après la figure, on remarque que les taux d'absorptions sont compris entre 12 et 21 mm, pour toutes les compositions étudiées. L'allure des courbes d'absorption d'eau évolue de la même cinétique pour tous les bétons. Il est, encore, nettement visible que l'absorption d'eau par capillarité

augmente en fonction du temps. Cette augmentation est progressive et proportionnelle au dosage de poudre de verre incorporée dans le béton de sable. La valeur maximale du taux d'absorption d'eau est enregistrée au dosage 40% (20.41 mm).

Les taux d'augmentations des bétons à base de poudre de verre au béton de référence SPV après 24 heures sont : 15.21% (cas de PV10), 30.43% (cas de PV20), 42.39% (cas de PV30) et 66.07% (cas de PV40). En fonction du temps, l'absorption par capillarité augmente avec une vitesse lente. Ceci a été remarqué pour toutes les compositions étudiées, surtout dans le cas de SPV. On peut conclure que la poudre de verre amplifie sur la capacité d'absorption d'eau du béton, elle augmente avec l'augmentation de dosage de poudre de verre.

III.3.2.9. Essai « gel - dégel »

Dans une optique de durabilité, la résistance aux cycles de gel-dégel est une caractéristique fondamentale pour les ouvrages extérieurs dans les pays froids. Elle est liée à plusieurs autres propriétés du béton telles que la porosité, la perméabilité, la structure de ses pores et les caractéristiques de ses granulats.

Afin de déterminer les taux des pertes (résistance et masse), nous avons enregistré, pour toutes les compositions étudiées les variations causées par les cycles « gel-dégel ». Les résultats obtenus sont regroupés dans le **Tableau III.6**.

Tableau III.6. Influence des cycles "gel-dégel" sur la résistance à la compression et la masse des bétons étudiés.

Compositions	Perte en résistance λ_R^g (%)	Perte en masse τ_g (%)
SPV	3.19	5.98
PV10	2.89	3.58
PV20	4.52	2.51
PV30	5.10	1.85
PV40	6.13	1.47

D'après les résultats ainsi obtenus, on remarque, d'une manière générale, une légère diminution des résistances à la compression, suite à l'essai gel-dégel dans toutes les compositions étudiées. De plus, on constate aussi que, dans le cas de présence de 10% de poudre de verre (PV10), le taux de perte de la résistance à la compression est inférieur à celui enregistré dans le cas de référence (SPV) et les autres cas de présence de poudre de verre.

Par contre, on constate que la présence de poudre de verre diminue les taux de pertes de masses des bétons. L'augmentation du dosage de poudre, en particulier, provoque une nette diminution des taux de pertes de masses. Il est clair que le dosage de 40% de poudre a donné le taux le plus bas (soit 1.47%).

Enfin, il faut noter que les résultats montrent que l'effet de cet essai est quand même remarquable. Cet effet peut être attribué par l'ajout de poudre de verre dans le béton de sable qui crée des pores aléatoires au sein de la matrice ; ces pores sont remplis par l'eau absorbée au moment de l'essai, et c'est cette eau qui cause la dégradation interne du béton par l'effet de cycles gel-dégel.

III.3.2.10. Essai « mouillage – séchage »

L'essai est utile pour simuler la tenue dans le temps du béton exposé à un environnement humide ou marin, en étudiant la variation de la résistance en compression et de la masse avant et après les cycles « mouillage-séchage ». Les résultats obtenus sont regroupés dans le **Tableau III.7**.

Tableau III.7. Influence des cycles " mouillage - séchage " sur la résistance à la compression et la masse des bétons étudiés.

Compositions	Perte en résistance λ_R^g (%)	Perte en masse τ_g (%)
SPV	5.75	5.45
PV10	3.41	2.56
PV20	4.13	2.02
PV30	6.33	1.80
PV40	7.49	1.27

On observe, d'une manière générale, une légère diminution des résistances à la compression suite à l'essai mouillage-séchage, et ceci, quel que soit le type du béton étudié. L'effet de cet essai est plus remarquable dans le cas du béton à base de 40% de poudre de verre. La présence de 10% de poudre de verre réduit le taux de perte de la résistance à la compression des bétons étudiés.

Par contre, les variations en masse, sont plus remarquables dans le cas du béton de référence (SPV). Les résultats montrent que l'augmentation du dosage de poudre de verre diminue le taux de perte de masse des bétons étudiés. Il est clair que le dosage de 40% de poudre de verre a donné le taux le plus bas (soit 1.27%), ce qui confirme le rôle joué par les poudres afin de diminuer les pores dans les bétons, donc une porosité faible.

III.3.2.11. Résistance aux milieux acides (5% HCl)

La variation en masse a été évaluée pour des bétons immergés dans une solution de 5% d'acide chlorhydrique (HCl). Une analyse par diffraction aux rayons X (DRX) et des observations par le microscope électronique à balayage (MEB), ont été utilisées pour mieux examiner la dégradation des bétons exposés à l'acide chlorhydrique (HCl).

III.3.2.11.1. Variation en masse

Les résultats de la variation en masse des bétons étudiés après 60 jours d'immersion dans la solution (HCl), sont montrés dans le **Tableau III.8.**, et illustrés par la **Figure III.12.**

Tableau III.8. Variation en masse des bétons étudiés en fonction de temps.

Type des bétons étudiés		SPV	PV10	PV20	PV30	PV40
		Variation en masse (%)				
Age en jours	0	0	0	0	0	0
	7	2.36	1.20	1.07	1.53	0.97
	14	8.85	7.70	8.15	9.14	9.64
	28	25.38	23.92	25.71	28.98	31.58
	60	51.03	46.89	48.27	49.15	51.11

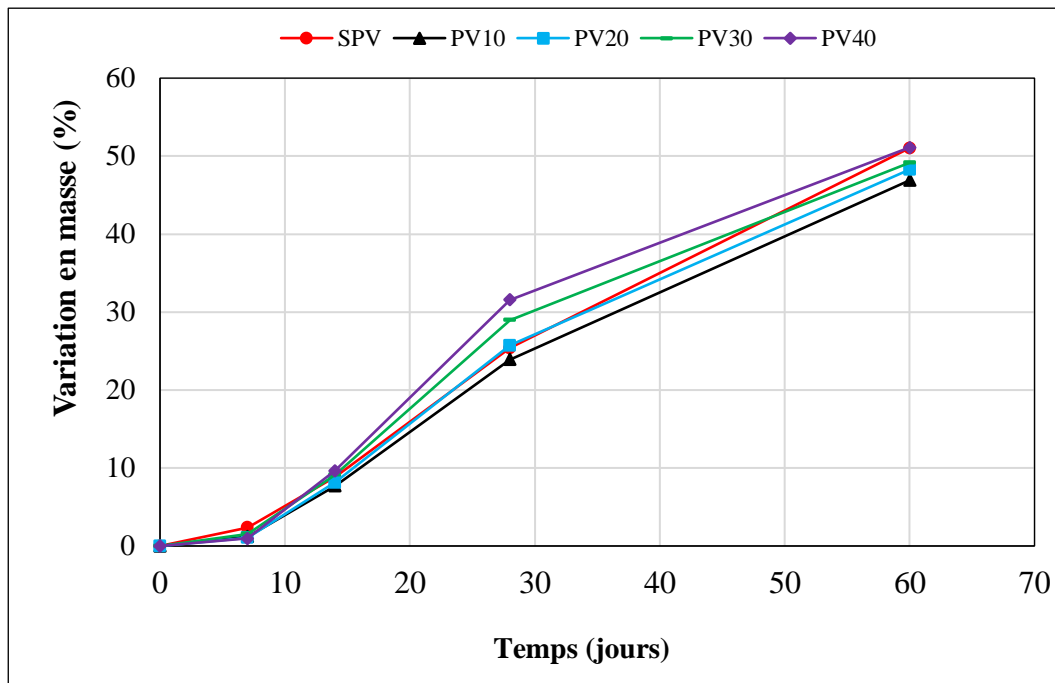


Figure III.12. Variation en masse des bétons étudiés en fonction du temps.

D'après les résultats obtenus, on constate qu'en analysant l'évolution des courbes de la variation en masse des bétons étudiés, nous pouvons constater une perte en masse permanente à partir de la première semaine jusqu'à 60 jours, pour tous les bétons immergés dans la solution à base d'acide chlorhydrique de 5% de concentration. On remarque que les valeurs de la perte en masse de toutes les compositions étudiées sont comprises entre 46.89% (cas de PV10) et 51.11% (cas de PV40). Il est clair que, la présence de 10% de poudre de verre (PV10) a donné le taux le plus faible par rapport les autres compositions.

Généralement, l'augmentation de la perte de masse est due à la réaction chimique entre l'acide chlorhydrique (HCl) et l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), aussi entre l'acide chlorhydrique (HCl) et le carbonate de calcium (CaCO_3). Les deux réactions chimiques ont conduit à la formation de sel de chlorure de sodium (CaCl_2) dans les pores du matériau. L'acide affecte la porosité et la structure du béton par la formation continue de sel provoquant l'expansion de la matrice qui détériore l'éprouvette, d'où une perte de masse sera remarquée.

III.3.2.11.2. Examen visuel

La **Figure III.13.**, montre l'état des éprouvettes après 60 jours d'immersion dans la solution de 5% de HCl. L'examen visuel montre que tous les échantillons immergés dans cette solution, ont subi des dégradations au niveau des coins et des arrêtes.



Figure III.13. Examen visuel des échantillons exposé à 5% de (HCl) après 60 jours.

En comparant les éprouvettes conservées dans l'acide chlorhydrique (HCl) avec les éprouvettes de références, on a observé pour tous les bétons exposés à la solution (HCl), une couche brune déposée sur la surface. Cela est dû aux chlorures de calcium qui se sont précipités à la surface des bétons [Ghrici et al., (2007) ; Aoual-Benslafa et al., (2011)]. De plus, on remarque que les éprouvettes gardent pratiquement leur état de surface et leur forme initiale, mais avec des dimensions légèrement plus faibles d'environ ($30 \times 30 \times 145 \text{ mm}^3$).

III.3.2.11.3. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

Le diffractogramme (Figure III.14., III.15.) montrent la comparaison entre les bétons étudiés sans poudre de verre et avec de poudre de verre par l'attaque d'acide (HCl).

D'après les figures, on constate que la présence ou l'absence de poudre de verre, l'acide affecte presque le même effet sur les bétons étudiés. Ceci s'explique par la stabilité des intensités des pics de carbonate de calcium (CaCO_3) et de la portlandite (hydroxyde de calcium) ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dans les deux cas.

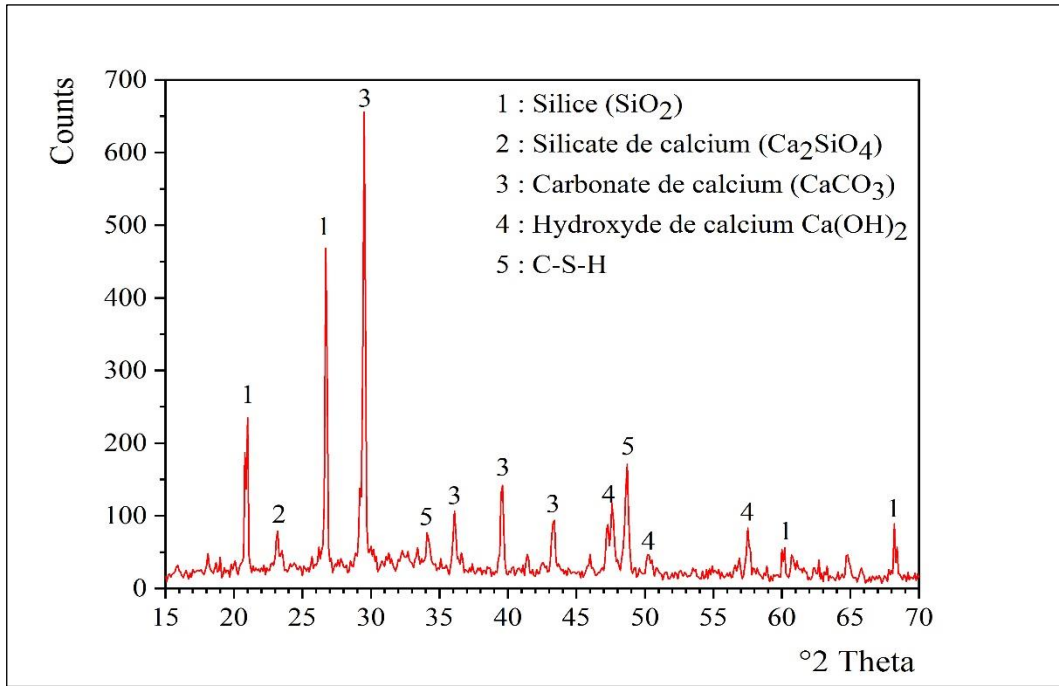


Figure III.14. Diffractogramme du béton de sable sans poudre de verre.

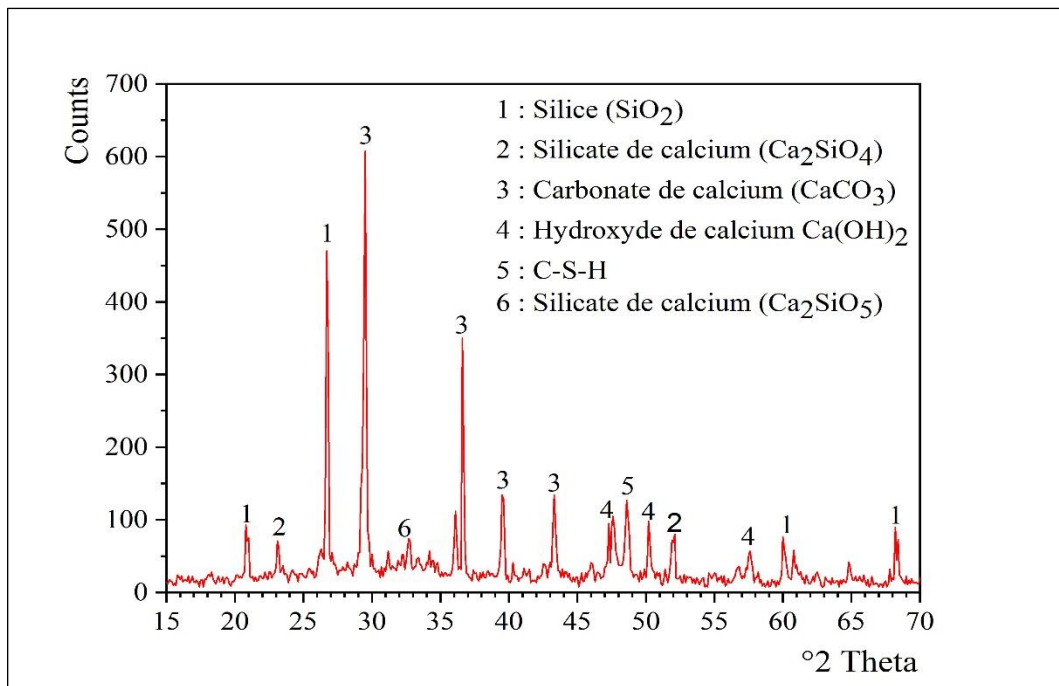


Figure III.15. Diffractogramme du béton de sable avec poudre de verre.

III.3.2.11.4. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

Les analyses par microscopie électronique à balayage (MEB) menées sur les échantillons étudiés, avant et après immersion des éprouvettes dans la solution d'acide (HCl) sont illustrées par les **Figure III.16., III.17.** Par rapport au béton de référence avant attaque d'acide (**Figure III.16.**), l'analyse du béton conservé dans la solution d'acide (HCl) montre que la surface du béton a subi une détérioration significative due à l'attaque d'acide (**Figure III.17.**). Les bétons testés présentent des microfissures sur la surface, ce qui conduit à détériorer la surface des bétons.

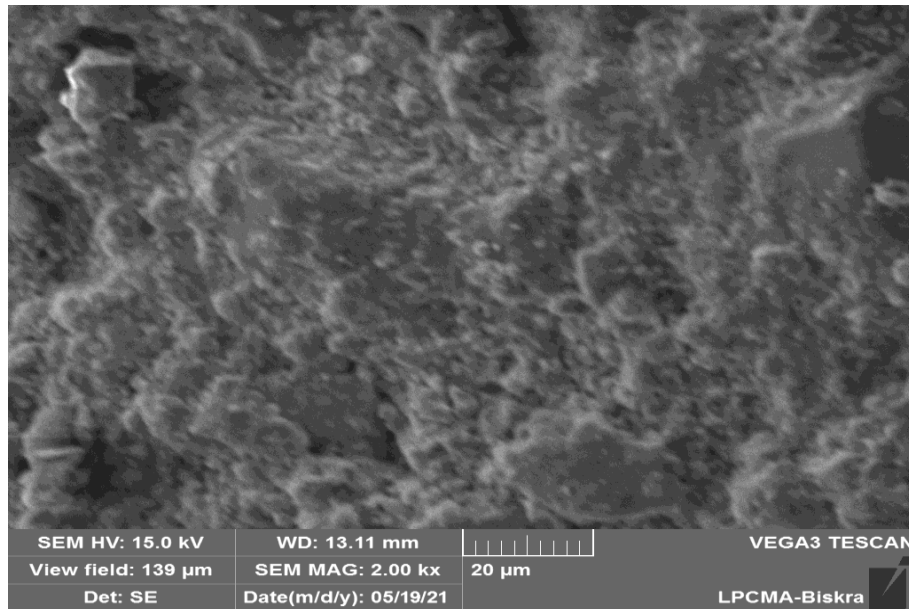


Figure III.16. MEB des bétons étudiés avant attaque d'acide (HCl).

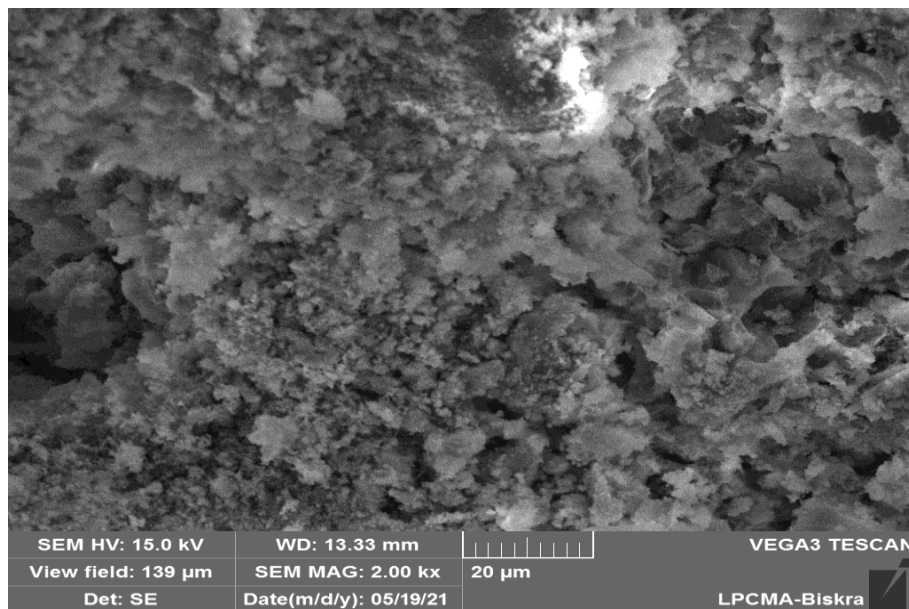


Figure III.17. MEB des bétons étudiés conservés dans d'acide (HCl).

III.4. Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de ce chapitre est une contribution qui vise à mieux apprécier les effets des poudres sur la durabilité des bétons de sables. Sur la base des résultats obtenus, on peut dire que, d'une façon générale, le type de béton de sable à base de poudre de verre, qui constitue les meilleurs compromis entre les résultats obtenus des différents essais de la durabilité est bien le béton (PV10). Ce type de béton peut être une réponse aux problèmes posés par les conditions environnementales.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail étudie la valorisation des matériaux locaux et la réutilisation des divers déchets. Il a pour objectif l'étude de l'influence de poudre de verre sur la durabilité des bétons de sable. Les matériaux étudiés sont des matériaux locaux, des déchets et de matériau artificiel. Les premiers comprennent le sable de dune et le sable alluvionnaire ; les déchets 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 la durabilité de ces derniers, garantit la conservation de la matière première et une protection de l'environnement.

La caractérisation des matériaux utilisés a montré que ces matériaux répondent aux exigences d'utilisation dans la recherche de propriétés rhéologiques et mécaniques du béton de sable acceptable. A la fin de chapitre deuxième, on présente une série d'essais expérimentaux effectués sur le béton à l'état frais et à l'état durci.

Pour mener à bien ce travail, différents pourcentages de poudre de verre ont été incorporés dans le béton étudié. A partir des résultats ainsi obtenus, on a pu conclure les points suivants :

- L'ajout de poudre de verre a conduit à une diminution de la densité des bétons étudiés. L'augmentation du pourcentage de poudre de verre suivi par une diminution de la densité. Les compositions PV30 et PV40 ont trouvés dans la gamme des bétons légers.
- L'incorporation de 10% de poudre de verre dans les compositions des bétons de sable étudiés améliore la résistance à la compression par rapport à la composition de référence (SPV). Par

Conclusion Générale

contre, si le dosage dépasse 10%, cela conduit à une diminution remarquable des valeurs des propriétés mécaniques.

- L'étude des variations dimensionnelles des compositions étudiées a montré que l'ajout de 10% et 20% de poudre de verre a donné une réduction notable de retrait par rapport au béton de référence (SPV).
- En termes d'isolation thermique, la conductivité thermique est une propriété importante pour connaître les isolations thermiques de matériaux. L'étude a montré qu'il y avait une bonne amélioration avec l'augmentation de dosage de poudre de verre par rapport au cas de référence (SPV).
- L'incorporation de 10% de poudre de verre dans le béton de sable minimise le phénomène de carbonatation accélérée avec de taux d'environ 15.40%. Au-delà de 10%, l'augmentation de poudre de verre est suivie par une augmentation de la profondeur de carbonatation. De plus, la poudre de verre amplifie sur la capacité d'absorption d'eau par capillarité du béton et l'absorption d'eau par immersion totale, elles augmentent avec l'augmentation du dosage de poudre de verre.
- L'étude des essais des cycles "gel-dégel" et "mouillage-séchage", a enregistré une légère réduction dans la résistance à la compression pour toutes les compositions étudiées, ainsi qu'une légère perte en masse. Le PV10 a donné le meilleur résultat en termes de la résistance à la compression.
- Les résultats de l'étude d'attaque des bétons étudiés par l'acide chlorhydrique (HCl) montrent que toutes les compositions étudiées présentent une dégradation progressive. De plus, l'analyse au MEB a montré que la surface du béton a subi une détérioration due à l'attaque par l'acide chlorhydrique (HCl), qui est représentée par des microfissures.

D'une façon générale, le type de béton de sable à base de poudre de verre, qui constitue les meilleurs compromis entre les résultats obtenus pour la durabilité est le béton ayant un dosage de 10% de poudre de verre. On peut dire que les résultats trouvés pour cette composition sont très encourageants et ouvrent des perspectives de recherches 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 ;
- ❖ L'ajout de fibre végétal pour l'amélioration d'isolation thermique du béton de sable ;
- ❖ Étude en profondeur la microstructure du béton de sable à base de poudre de verre.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[**Abdalla, (2012)**] Abdalla. A.H., (2012). Optimisation et Performance des Bétons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland. Pro Quest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada).

[**Abdelkibire et al., (2005)**] Abdelkibire. M., et Ben ouelha. F., (2005). Valorisation des déchets de verre comme sable dans la confection des bétons. Mémoire de fin d'études. Université de M'sila.

[**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.

[**Afnor, (1987)**] AFNOR., (1987). Bétons- Bétons de sable. Projet P 18-500.

[**Ambroise et al., (1993)**] Ambroise. J., Pera. J., Sari. M., (1993). L'adjuvantation des bétons de sable. Rapport de recherche. Institut National des Recherches Appliquées. INSA. Lyon. France.

[**Amrani et al., (2020)**] Amrani. Y., Mim. A., Tobchi. M.B., (2020). Effet de poudre de verre sur les propriétés physico- mécaniques du béton de sable. Mémoire de master, université d'El-Oued. Algérie.

[**Ammari et al., (2020)**] Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A., & Quéneudec, M. (2020). Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 233, 117374.

[**Ammari et al., (2021)**] Ammari, M.S., Bederina, M., Belhadj, B., & Quéneudec, M. (2021). Effect of barley straw treatments on desiccation shrinkage and thermal properties of lightweight sand concrete. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 7(3).

[**Aoual-Benslafa et al., (2011)**] Aoual-Benslafa. F.K., Maarouf. H., Semcha. A., & Mekerta. B., (2011). Durabilité des mortiers à base de sédiments de dragage du port d'Oran. In Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime. Ed. 2. 195-98.

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

Références Bibliographiques

- [Bederina, (2000)]** Bederina. M., (2000). Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable. Mémoire de magistère. UAT de Laghouat, Algérie.
- [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.
- [Bederina et al., (2005)]** Bederina, M., Khenfer, M. M., Dheilly, R. M., & Quéneudec, M. (2005). Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cement and concrete research*, 35(6), 1172-1179.
- [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.
- [Benaïssa et al., (2008)]** Benaïssa. A., Kamen. A., Chouïcha. A., Malab. S., (2008). Panneau 3D au béton de sable. *Matériaux et Structures*. Vol 41, pp. 1377-1391.
- [Boudaoud, (1993)]** Boudaoud. Z., (1993). Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda. Mémoire de magistère, université Med Boudiaf de M'sila. Algérie.
- [Bouziani, (2013)]** Bouziani. T., (2013). Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant. Thèse de doctorat, université M'hamed Bougara de Boumerdes. Algérie.
- [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.
- [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.
- [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.
- [Coquillat, (1992)]** Coquillat. G., (1992). Béton de sable à haute performance. Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP). Rapport de recherche. Bordeaux. France.
- [Courardl, (1998)]** Courard. L., (1998). Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil. Notes de cours. Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction.

Références Bibliographiques

- [Cnerib, (1992)] Cnerib, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment., (1992). Bétons de sable. Rapport de recherches, Tipaza, Algérie.
- [Du et al., (2021)] Du. Y., Yang. W., Ge. Y., Wang. S., Liu. P., (2021). Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material, *Journal of Cleaner Production*. 287, 125018.
- [Duval, (1974)] Duval. C., (1974). *Le verre que sais-je*. Edition paris.
- [Dreux et al., (1998)] Dreux. G., Festa. J., (1998). *Nouveau guide du Béton et de ses constituants*. Eyrolles Huitième édition, Paris.
- [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.
- [Guillon, (2004)] Guillon. E., « Durabilité des matériaux cimentaires et modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles ». Thèse de doctorat, d'école normale supérieure de Cachan, France 2004.
- [Ghrieb, (2003)] Ghrieb. A., (2003). *Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques*. Thèse de magister, ENP. Alger.
- [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, pp. 91-95.
- [Gustavsson et al., (1994)] Gustavsson. M., Karawacki. E., Gustafsson. S.E., (1994). Thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of thin samples from transient measurements with hot-disk sensors. *Review of Scientific Instruments*, Vol 65, pp. 3856-3859.
- [Ghrici et al., (2007)] Ghrici. M., Kenai. S., & Said-Mansour. M., (2007). Mechanical properties sand durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 542-549.
- [Hamlaoui Charef et al., (2019)] Hamlaoui Charef, A., & Moussaoui, H., (2019). *Valorisation des déchets de caoutchouc des pneus et déchets de verre dans le béton de sable*. Doctoral dissertation, université Akli Mouhend-Oulhadj de Bouira.
- [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.

Références Bibliographiques

- [**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.
- [**Jeans, (2001)**] Jeans. L., (2001). Barton : composition verrières, l'évolution des verres industriels, revue verre vol 7. N°2 Institut de verre.
- [**Kosmatka, (2008)**] Kosmatka. S.H., Kerkhoff. B., & Panarese. W.C., (2008). *Design and Control of Concrete Mixtures* (14ème éd.). Consulté sur.
- [**Languedoc, (2001)**] Languedoc. R., (2001). Guide pratique des déchets. (Site Internet google.fr).
- [**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.
- [**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.
- [**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.
- [**Michel, (1981)**] Michel. M., (1981). *Valorisations des déchets et des sous-produits industriels*. Ed Massion, 1981, Paris. France.
- [**Nassar et al., (2012)**] Nassar. R.U.D., Soroushian. P., (2012). Green and durable mortar produced with milled waste glass, *Magazine of concrete research*. 64(7) 605-615.
- [**Norme XP P18-458, (1997)**] Norme XP P18-458 (1997). Essai pour béton durci - Essai de carbonatation accélérée - Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté.
- [**Nischer, (1986)**] Nischer. P., (1986). The quality of the concrete texture. *Betonwerk+ Fertigteil-Technik*, 52, 683-696.
- [**Notice Technique, (2005)**] Superplastifiant MEDAFLOW 30., (2005). Granitex, pp. 93.
- [**Ollivier et al., (2008)**] Ollivier. J.P., Vichot. A., (2008). *La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.

Références Bibliographiques

- [**Park et al., (2004)**] Park. S.B., Lee. B.C., Kim. J.H., (2004). Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and concrete research*. 34(12) 2181-2189.
- [**Parrott, (1987)**] Parrott. L.J., (1987). A review of carbonation in reinforced concrete.
- [**Pawel et al., (2015)**] Pawel. S.b., Elzbieta. H., Teresa. R., (2015). The effect of nano-silica and titanium dioxide on the mechanical and self-cleaning properties of waste-glass cement mortar. Warsaw University of Technology, Al. ArmiiL udowej 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.
- [**Rakshvir et al., (2006)**] Rakshvir. M., Barai. S.V., (2006). Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research* 24 (3), 225–233.
- [**Sablocrete, (1994)**] Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées., (1994). Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation. Projet « SABLOCRETE ».
- [**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.
- [**Scholze, (1980)**] Scholze. H, (1980). Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre, Paris.
- [**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 et al., (2004)**] Shayan. A., Xu. A., (2004). Value-added utilization 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., Riefler. C., Wang. H., (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*. 35(5) 987-993.
- [**Si et al., (2020)**] Si. R., Dai. Q., Guo. S., & Wang. J., (2020). Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder, *Journal of Cleaner Production*. 242, 118502.

Références Bibliographiques

- [**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.
- [**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.
- [**Swamy et al., (1984)**] Swamy. R.N., Bahia. H.M., (1985). The effectiveness of steel fiber as shear reinforcement. USA. *Concr. Inst. Des. Const.* Vol 7, N°:3.
- [**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.
- [**Topcu et al., (2004)**] Topcu. I.B., Canbaz. M., (2004). Properties of concrete containing waste glass, *Cement and concrete research*. 34(2) 267-274.
- [**Tsukayama et al., (1980)**] Tsukayama. R., Abe. H., & Nagataki. S., (1980). Long term experiment son the neutralization of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement. *Proc. of 7 the International Congressional on the Chemistry of Cement*, 30-35.
- [**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*.
- [**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.
- [**Zeghichi et al., (2012)**] Zeghichi. L., Mezghiche. B., Benghazi. Z., (2012). Contribution à l'étude des propriétés du ciment blanc et compos, *Communication Science & Technologie*. (10) 27-35.
- [**Zidol, (2009)**] Zidol. A., (2009). Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke.
- [**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.