



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par :

- 1. DEBBAB Taoufik**
- 2. TOUAOUA Mohammed El Habib**

Intitulé :

**Microstructure et performances mécaniques d'un béton de sable
contenant des déchets industriels**

Soutenue le : 29/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : FETHIZA ALI Boubaker

Président

Dr : KHELAIFA Hamad

Examineur

Dr : AMMARI Mohammed Seghir

Encadreur

Année académique : 2024/2025

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**, Maître assistant à l'Université d'El-Oued, pour tous les efforts qu'il a fournis pour faciliter notre travail et nous aider à accomplir ce mémoire.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur **Dr. FETHIZA ALI Boubaker**, Maître de conférences à l'université d'El-Oued et Monsieur **Dr. KHELAIFA Hamad**, Maître assistant 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) et « **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.

إهداء

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام وآخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين.

"إلى أبي الغالي"

إلى نور يضيئ عمتي عندما تطفئني الأيام والظروف... إلى غيمة تظلني وتسقيني دون رغبة بردي
لجميلها... إلى الأيدي التي تمد لي العون عندما أتعثر... إلى الرجل العظيم الذي شجعني للوصول إلى
طموحاتي سندي ورفيق دربي....

"إلى أمي الغالية"

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها، التي وهبتي العطف ورعتني بالحب، إلى من جعل الله من
نبض قلبها أول صوت يسمع إلى أمي حفظها الله ورعاها.

"إلى اخوتي واخواتي"

إلى من استمد من محبتهم قوة ومن دعائهم أملا وكانوا لي مصدر دعم

"إلى أصدقائي"

إلى من شاركوني لحظات التعب والانجاز

إهداء

إلى أمي العزيزة

التي كانت دائماً سندي وأول مصدر لإلهامي، بصلواتها التي ترافقتني في كل خطوة وبعطفتها الذي يمنحني القوة عندما أضعف

وإلى روح والدي الحبيب، رحمه الله

الذي علمني أنه لا يتحقق شيء بدون جهد، وأن الكفاح هو طريق النجاح

كل لحظة دراسة، وكل نجاح أحققه، هو إهداء إلى قلوبكما الطاهرة

رحمك الله يا أبي، وحفظك الله يا أمي

إلى كل اخوتي الأعزاء، حفظهم الله

إلى كل أساتذتي الكرام

إلى كل زملائي "دفعة 2025"

تواوة محمد الحبيب

SOMMAIRE

RESUMES	IV
NOMENCLATURE	V
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
INTRODUCTION GENERALE	01

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction	03
I.2. Béton de sable	03
I.2.1. Introduction	03
I.2.2. Aperçu historique	04
I.2.3. Définition	06
I.2.4. Constituants du béton de sable	07
I.2.4.1. Sables	07
I.2.4.2. Ciment	07
I.2.4.3. Eau de gâchage	07
I.2.4.4. Fines d'ajouts	07
I.2.4.5. Adjuvants	09
I.2.4.6. Autres ajouts	09
I.2.5. Propriétés essentielles du béton de sable	11
I.2.6. Domaines d'utilisation des bétons de sable	11
I.2.6.1. Fondations profondes	11
I.2.6.2. Bâtiment	11
I.2.6.3. Autres applications	12
I.2.7. Formulation d'un béton de sable	13
I.2.7.1. Définition	13
I.2.7.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable	13
I.3. Comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire	23
I.4. Valorisation des déchets dans le domaine de génie civil	24

I.4.1. Définition	24
I.4.2. Valorisation des déchets	24
I.4.3. Méthodes de la valorisation	25
I.4.3.1. Valorisation matière	25
I.4.3.2. Valorisation énergétique	25
I.4.3.3. Valorisation chimique	25
I.4.4. Différents déchets utilisés en génie civil	25
I.4.5. Valorisation des déchets de verre	26
I.4.5.1. Définition	26
I.4.5.2. Recyclage des déchets de verre en béton	26
I.4.5.3. Propriétés du verre	27
I.4.5.4. Effet de la poudre de verre sur le comportement mécanique du béton	27
I.4.6. Valorisation des déchets de craie dans le béton	28
I.4.6.1. Définition de la craie et de ses sources de déchet	28
I.4.6.2. Propriétés physiques et chimiques des déchets de craie	29
I.4.6.3. Utilisation des déchets de craie dans le béton	29
I.4.6.4. Effet des déchets de craie sur la Propriétés du béton	29
I.7. Conclusion	29

CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction	31
II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés	31
II.2.1. Sable	31
II.2.1.1. Analyse granulométrique	32
II.2.1.2. Caractéristiques physiques	33
II.2.1.3. Caractéristiques chimiques	36
II.2.2. Ciment	37
II.2.3. Filler calcaire	37
II.2.4. Poudre de verre	39
II.2.5. Poudre de craie	40
II.2.6. Eau de gâchage	42

II.2.7. Adjuvant	42
II.3. Techniques expérimentale	43
II.3.1. Malaxage et conservation	43
II.3.2. Caractérisation du béton frais	43
II.3.3. Caractérisation du béton durci	45
II.3.3.1. Masse volumique apparente	45
II.3.3.2. Essai d'absorption d'eau par immersion totale	45
II.3.3.3. Etude des propriétés mécaniques	46
II.3.3.3.1. Résistance à la flexion	46
II.3.3.3.2. Résistance à la compression	47
II.3.3.4. Analyse de la microstructure	48
II.3.3.4.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	48
II.3.3.4.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	49
II.4. Conclusion	50

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction	51
III.2. Compositions des bétons étudiés	51
III.3. Caractérisation du béton frais	54
III.3.1. Etude de la maniabilité	54
III.4. Caractérisation du béton durci	56
III.4.1. Masse volumique	56
III.4.2. Absorption d'eau par immersion totale	56
III.4.3. Etude de la mécanique	57
III.4.3.1. Résistance à la flexion	57
III.4.3.1. Résistance à la compression	59
III.4.4. Analyse de la microstructure	61
III.4.4.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)	61
III.4.4.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)	64
III.4. Conclusion	65
CONCLUSION GENERAL	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHES	68

RESUMES

RESUME

Cette étude a été menée dans le cadre de la valorisation des ressources locales et de la réutilisation des déchets industriels sous forme de poudres. Elle vise à améliorer les propriétés mécaniques du béton de sable par l'ajout de poudres de verre (PV) et de craie (PC), avec des taux de substitution variant de 0 à 20% avec un pas de 5%. Les matériaux valorisés sont des sables locaux, dunaires et alluvionnaires, se trouvant en grandes quantités dans la région d'El-Oued et les déchets réutilisés sont des fillers calcaires provenant des déchets de concassage de granulats, des verres provenant des déchets industriels et des craies, issue des déchets scolaires. Les résultats obtenus ont montré que la densité des bétons a diminué en fonction de l'augmentation du dosage de poudre de verre et de craie. De plus, les résultats mécaniques ont montré une amélioration intéressante. L'ajout optimal qui constitue le meilleur compromis entre les propriétés étudiées est de 10 % des ajouts minéraux. Par ailleurs, un examen de la microstructure a montré que l'incorporation de poudre de verre et de craie diminue les pores dans la matrice cimentaire et présente une bonne homogénéisation. Enfin, il est à noter que les résultats obtenus sont très encourageants pour le développement d'un béton innovant.

Mots clés : Béton de sable, Matériaux locaux, Déchets industriels, Propriétés mécaniques, Microstructure.

المخلص

تم إجراء هذه الدراسة في إطار استغلال الموارد المحلية وإعادة استخدام النفايات الصناعية على شكل مسحوق. كما تهدف إلى تحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة الرملية عن طريق إضافة مسحوق الزجاج (PV) والطباشير (PC)، مع معدلات استبدال تتراوح من 0 إلى 20% بخطوة 5%. المواد المستغلة هي الرمال المحلية، رمال الكثبان ورمال الأودية الموجودة بكميات كبيرة في منطقة الوادي، والنفايات المعاد استخدامها هي حشوات الحجر الجيري من نفايات سحق الركام، والزجاج من النفايات الصناعية والطباشير من نفايات المدارس. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن كثافة الخرسانة انخفضت مع زيادة نسبة مسحوق الزجاج والطباشير. وبالإضافة إلى ذلك، أظهرت النتائج الميكانيكية تحسناً مثيراً للاهتمام. الإضافة المثالية التي تشكل أفضل حل وسط بين الخصائص المدروسة هي 10% من الإضافات المعدنية. علاوة على ذلك، أظهر فحص البنية المجهرية أن إضافة مسحوق الزجاج والطباشير يقلل من المسام في مصفوفة الأسمنت ويقدم تجانساً جيداً. وأخيراً، تجدر الإشارة إلى أن النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية لتطوير الخرسانة المبتكرة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية، مواد محلية، نفايات صناعية، خصائص ميكانيكية، البنية المجهرية.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

d	: Dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire.
D	: Dimension du plus grand grain de l'étendue granulaire.
D _{max}	: Dimension de plus gros grain de l'étendue granulaire.
G	: Gravillons.
S	: Sable.
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 80μm, et D _{max} .
e	: Volume d'eau.
v	: Volume de vide piégé.
f	: Surface spécifique exprimée en cm ² /g du constituant.
ρ	: Densité du constituant exprimée en g/cm ³ .
K	: Constante comprise entre 0.2 et 0.25.
R _f	: Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5.
R _c	: 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.
PV	: Poudre de verre.
V _{sable}	: Volume de sable.
V _{adj}	: Volume d'adjuvant.
V _E	: Volume d'eau.
V _C	: Volume de ciment.
V _{air}	: Volume de d'air.
MVAT	: Masse volumique apparente théorique.
MVAR	: Masse volumique apparente réelle.
MV _{sable}	: Masse volumique absolue du sable.

Nomenclature

SA	: Sable alluvionnaire.
SD	: Sable de dune.
SAD	: Sable alluvionnaire-dunaire.
S _A	: Fraction massique du sable alluvionnaire.
S _D	: Fraction massique du sable de dune.
γ	: Masse volumique apparente.
M	: Masse du matériau.
V	: Volume total du matériau.
γ_s	: Masse volumique absolue.
M _s	: Masse du matériau solide.
V _s	: Volume total du matériau solide.
M _f	: Module de finesse.
ES _p	: Equivalent de sable au piston.
H1	: Hauteur de sable propre +éléments fins.
H2	: Sédiment + sable propre seulement.
p	: Porosité.
C _p	: Compacité et porosité.
A(cm)	: Affaissement.
A%	: Coefficient d'absorption d'eau.
P _s	: Masse du matériau sec.
P _h	: Masse du matériau humide.
R _t	: Résistance à la flexion.
R _c	: Résistance à la compression.
F _c	: Force de compression.
DRX	: Diffraction aux rayons X.
MEB	: Microscope électronique à balayage.
PV	: Poudre de verre.
PC	: Poudre de craie.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Figure I.1.	Colisée un monument emblématique de Rome	04
Figure I.2.	Phare de Port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte)	05
Figure I.3.	Pont de Brooklyn 1871-72 (New York)	05
Figure I.4.	Proportion du gravillon dans le béton	10
Figure I.5.	Panneau 3D en béton de sable projeté	12
Figure I.6.	Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines	15
Figure I.7.	Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable	16
Figure I.8.	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e +v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée	17
Figure I.9.	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)	19

Chapitre II : Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Figure II.1.	Sables utilisés	32
Figure II.2.	Courbe granulométrique des sables utilisés	33
Figure II.3.	Analyse chimique par DRX du sable de dune	36
Figure II.4.	Analyse chimique par DRX du sable alluvionnaire	36
Figure II.5.	Ciment utilisé	37
Figure II.6.	Filler calcaire utilisé	38
Figure II.7.	Analyse chimique par DRX de filler calcaire utilisé	38
Figure II.8.	Poudre de verre utilisée	39
Figure II.9.	Poudre de craie utilisée	41
Figure II.10.	Analyse par diffraction des rayons X de la Poudre de craie	41
Figure II.11.	Dispositif de mesure d'affaissement	44
Figure II.12.	Essai d'absorption d'eau par immersion totale	46

Figure II.13.	Dispositif de l'essai de la résistance à la traction par flexion	47
Figure II.14.	Dispositif de l'essai de la résistance à la compression	48
Figure II.15.	Diffractomètre de type (PROTO)	49
Figure II.16.	Microscopie électronique à balayage « Thermo Scientific prisma E »	49

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III.1.	Représentation triangulaire de 15 combinaisons étudiés	52
Figure III.2.	Masse volumique à 28 jours des différents bétons étudiés	56
Figure III.3.	Evolution de la résistance à la flexion	58
Figure III.4.	Evolution de la résistance à la compression	60
Figure III.5.	Diffractogramme du béton de sable sans ajouts minéraux (C1)	62
Figure III.6.	Diffractogramme du béton de sable avec poudre de verre (C11)	62
Figure III.7.	Diffractogramme du béton de sable avec ajouts minéraux (C13)	63
Figure III.8.	Diffractogramme du béton de sable avec poudre de craie (C15)	63
Figure III.9.	Analyse au MEB du béton témoin (C1)	65
Figure III.10.	Analyse au MEB du béton avec PV et PC (C13)	65

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Tableau I.1.	Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment	08
Tableau I.2.	Comparaison entre le béton de sable et le béton classique	23

Chapitre II : Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Tableau II.1.	Caractéristiques physiques du sable utilisé (SAD)	35
Tableau II.2.	Analyse chimique du ciment utilisé	37
Tableau II.3.	Analyse chimique de la poudre de verre	40
Tableau II.4.	Caractéristiques du superplastifiant utilisé	42
Tableau II.5.	Classes de consistance du béton	44

Chapitre III : Résultats et Discussions

Tableau III.1.	Les 15 essais donnés par la méthode des plans d'expériences	53
Tableau III.2.	Compositions des bétons étudiés	54
Tableau III.3.	Maniabilité des compositions étudiées	55
Tableau III.4.	Absorption d'eau par immersion des bétons étudiés	57
Tableau III.5.	Evolution de la résistance à la flexion	58
Tableau III.6.	Evolution de la résistance à la compression	60

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies, le secteur de la construction a connu une croissance rapide et urbanisation accélérée, faisant du béton un élément central de divers projets de construction, tant d'infrastructures que résidentiels. Cela est dû à sa disponibilité, à sa facilité de préparation et à son coût raisonnable par rapport à d'autres matériaux de construction. Cependant, la forte dépendance au béton traditionnel s'est accompagnée de nombreux problèmes environnementaux et économiques, notamment ceux liés à la consommation excessive de ressources naturelles (gravier, ciment), en plus des émissions polluantes qui accompagnent la production de ces matériaux, en particulier le CO₂, qui est devenu une préoccupation mondiale à la lumière des défis climatiques actuels [Mehta et al., (2014)].

D'autre part, dans certaines régions, comme le sud de l'Algérie, des obstacles supplémentaires apparaissent liés à la rareté des gros granulats et à la difficulté de leur transport, ce qui fait de l'idée de valorisation des ressources locales comme le sable de dune, le sable alluvionnaire et le grand gisement de fines naturels, tous cela nous incite à envisager le remplacement du béton ordinaire par un autre type de béton, tels que le béton de sable [Cnerib, (1992)]. Des études ont montré que ce type de béton peut présenter des propriétés mécaniques satisfaisantes, à condition que les rapports de mélange soient contrôlés, que la granulométrie soit ajustée et que des additifs appropriés soient intégrés pour en maximiser les performances [Bederina et al., (2005)].

Par ailleurs, les enjeux liés à la gestion et à la valorisation des déchets se sont intensifiés au cours des vingt dernières années. La sensibilisation à l'environnement et à la gestion des déchets a suscité une préoccupation majeure dans le monde entier. L'industrie de la construction a enregistré de grands progrès dans le recyclage des déchets industriels. Le recyclage de ces déchets par leur transformation en agrégats ou en poudre permet non seulement d'économiser de l'espace dans les décharges, mais aussi de réduire la demande d'extraction de matières premières [Rakshvir et al., (2006)].

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

L'objectif de ce travail a principalement porté sur la recherche de la possibilité de substituer partiellement le ciment par d'autres ajouts. Dans ce contexte, une partie du ciment (20 %) a été remplacée par diverses proportions de poudre de verre et de craie afin d'apprécier l'effet de ces remplacements et d'optimiser leurs effets combinés sur les propriétés mécaniques du béton de sable. Pour atteindre ces objectifs, on a utilisé la technique des plans de mélanges [Pachon-Rodriguez, (2011) ; Ebanga, (2012)].

Plan de travail

Le travail 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 de base utilisés, ainsi qu'une description détaillée des différentes techniques de mesures expérimentales employées dans cette étude ;
- Le troisième chapitre est consacré à une étude des propriétés mécaniques et à l'analyse de microstructure 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 constitue une compilation des recherches bibliographiques issues de divers documents en lien direct avec le composite analysé, à savoir les bétons de sables. Par ailleurs, étant donné l'incorporation de la poudre de verre et de la poudre de craie en tant qu'additions minérales dans ce composite, une présentation générale sur la valorisation des déchets et leurs impacts sur les bétons est également proposée.

I.2. Béton de sable

I.2.1. Introduction

Comme dans de nombreux pays en voie de développement, l'Algérie est un grand consommateur de granulats, avec une demande qui augmente d'année en année. Dans certaines régions, les réserves de gros granulats s'épuisent progressivement, tandis que d'autres zones en sont déjà dépourvues. Cependant, notre pays, et en particulier le sud algérien, possède d'importants gisements de sables aux origines variées (dune, alluvionnaires, concassage), ainsi que des réserves significatives de fines naturelles et artificielles. Cela rend indispensable la réflexion sur la mise au point de nouveaux types de bétons, tels que les bétons de sable [Cnerib, (1992)].

Le béton de sable se distingue du béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou un très faible dosage, de gravillon. Il diffère également des mortiers par un dosage en ciment plus faible, mais surtout par son domaine d'application. L'emploi de béton de sable en remplacement des bétons classiques peut constituer une variante de structure rigide intéressante sur le plan économique lorsque le sable est facilement accessible et moins coûteux que les granulats traditionnels [Sablocrete, (1994)].

I.2.2. Aperçu historique

Le béton de sable remonte à l'Antiquité, il y a plus de deux mille ans, lorsque les Romains découvrirent que le mélange de sable d'origine volcanique avec de la chaux vive permettait d'obtenir des matériaux d'une grande résistance. Ce mélange fut utilisé pour la construction de monuments emblématiques tels que le Panthéon et le Colisée de Rome (**Figure I.1.**), qui témoignent encore aujourd'hui de la durabilité et de la solidité des matériaux composites à travers l'histoire des techniques industrielles. Cependant, l'utilisation à grande échelle du béton de sable, au sens moderne du terme, a réellement commencé en France dans la seconde moitié du 19^e siècle. Cela fait suite aux travaux de F. Coignet, qui réalisa un mélange sans gravillons composé de sable, de faibles quantités d'eau, de cendres, de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, ainsi que de chaux hydraulique. Ces mélanges furent utilisés pour construire divers ouvrages, constituant ainsi les premières applications de cette technique, dont certains sont encore en usage aujourd'hui.



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

En 1869, le phare de Port-Saïd, situé en Égypte, s'élève à une hauteur de 52 mètres. Sa construction a été réalisée en béton aggloméré, un matériau fabriqué à partir de sable provenant des plages locales et de chaux importée de France. Ce phare est un exemple historique de l'utilisation du béton de sable dans des ouvrages d'envergure (**Figure I.2.**). F. Coignet exporte sa technique jusqu'aux USA, où son entreprise "New York and Longisland Coignet stone compagny" construit en 1871-72 en blocs de béton aggloméré le pont de Brooklyn à New York (**Figure I.3.**) [Piaton, (2014)].



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



Figure I.3. Pont de Brooklyn 1871-72 (New York).

Vers la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, marquant la période de l'apparition du béton utilisant des granulats de gros calibres ainsi que l'utilisation de ciment à la place de la chaux qui a engendré une augmentation de résistance (allant jusqu'à 20MPa) furent facilement obtenus. A compter de là, le béton aggloméré ancêtre du béton de sable a cédé la place au béton connu jusqu'à nos jours [Maillot, (2001)]. En 1918 une expérience a été faite à St-Petersburg, par le conte **M. Nicolas** de Rochefort. Elle consistait à broyer en même temps 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 ciment (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Ces idées furent reprises après quelques décennies plus tard au milieu du XX siècle (1954) par le professeur académicien **REHBINDER** comme base de ces propres recherches sur le béton de sable, et le mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker.

Il conclut que le principe physique du phénomène semble être qu'au concassage on libère des surfaces physico-chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant, ce qui permet l'utilisation de ce matériau dans de nombreux domaines (chaussées, pistes d'aviation, éléments de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, etc.).

L'utilisation des gros granulats, permettant d'atteindre des niveaux élevés de résistance, a conduit le béton de sable à être délaissé pendant un certain temps. Cependant, à la fin de la Seconde Guerre mondiale, le béton de sable a regagné en popularité grâce à ses propriétés spécifiques, à la rareté des gros granulats dans certaines régions et, bien sûr, à l'abondance de grands gisements de sable disponibles [**Benaissa et al., (1993)**].

I.2.3. Définition

La norme Française AFNOR **NF P 18500** définit le béton de sable comme suit : Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau ; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s) et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons [**AFNOR, (1987)**].

Le béton de sable est un matériau constitué principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre $D_{\max} = 5 \text{ mm}$.

Une question pourrait se poser : quelle est la différence entre le béton de sable et le mortier ? Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable ($D_{\max} = 5\text{mm}$), il ne consomme que (250 à 400) kg/m^3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimale étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400 à 600) kg/m^3 [**Baron, (1982)**].

I.2.4. Constituants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants, etc.

I.2.4.1. Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes **NF P 18 540** et **NF P 18 101**. 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. Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homo-métrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté [**Sablocrete, (1994) ; Boudaoud, (1996)**].

I.2.4.2. Ciment

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme **NF P 15-301**. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Il est à noter que pour un même usage, le dosage en ciment pour les bétons de sable est généralement plus élevé que les bétons classiques [**Sablocrete, (1994)**].

I.2.4.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme **NFP18-303**. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables. L'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables [**Sablocrete, (1994)**].

I.2.4.4. Fines d'ajouts

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

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

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes, et ces fines sont du ciment, puisque la qualité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle bien connue de :

$$C = 550/\sqrt[5]{D} \text{ ou } C = 700/\sqrt[5]{D} \quad (\text{I.1})$$

Selon l'usage du béton, donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé (**Tableau I.1.**).

Tableau I.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [**Les experts, (2017)**].

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	1.904	290	370	BÉTON
0/20	1.821	300	385	
0/16	1.741	315	400	
0/8	1.516	360	460	
6.3/0	1.445	380	480	MORTIER
0/4	1.320	415	530	
0/2	1.149	480	610	
0/1	1.000	550	700	

On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fumé de silice, pouzzolanes broyées, etc.) et les fines inertes (fins calcaires, ou de broyage de roches massives, etc.). Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 Kg/m³ et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influencer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

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

Nous utiliserons dans notre étude un type de fines : les fillers calcaires. L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage, etc.) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration, etc.) [Menadi, (2008)].

L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe. Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif. Son avantage est sa finesse qui peut être utilisée pour optimiser la granulométrie de mélanges de béton [Neville, (2000)].

Les fillers peuvent également affecter le processus d'hydratation, occuper les pores capillaires (rendant ainsi plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [Boudaoud, (1996) ; Bederina, (2000)].

I.2.4.5. Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires. On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés.

La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage du plastifiants ou superplastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P18-340 [Sablocrete, (1994) ; Les experts, (2017)].

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)]. 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 domination de béton de sable d'une façon pratique (**Figure I.4.**), on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70 [Les experts, (2017)].

$$\frac{G}{S} < 0.7 \quad (I.2)$$

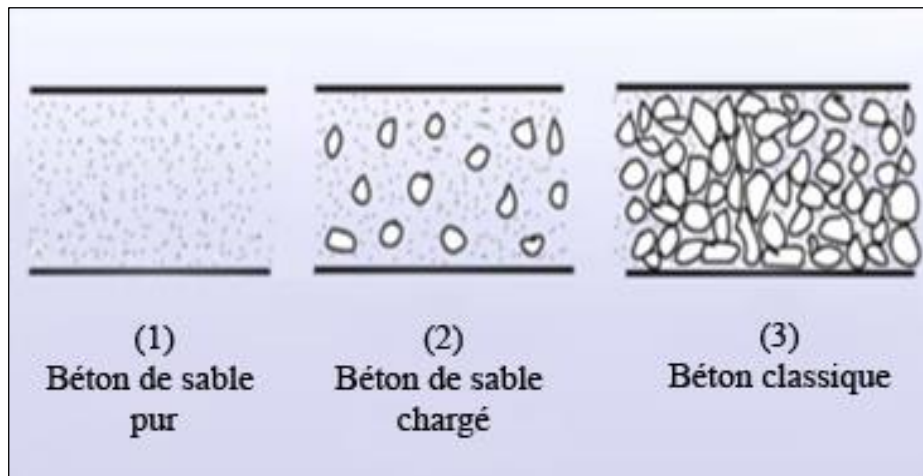


Figure I.4. Proportion du gravillon dans le béton.

➤ Colorants

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps [Les experts, (2017)].

I.2.5. Propriétés essentielles du béton de sable

Un concepteur qui retient le béton de sable comme matériau pour un élément de construction a une démarche de « pensée béton », c'est-à-dire qu'il adopte un matériau répondant aux critères qui ont permis le succès du béton, en termes de performances et durabilité, mais aussi d'image et de comportement. Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. La maniabilité dépend non seulement du rapport E/C, mais aussi du module de finesse de sable, et elle dépend surtout du type et de la teneur en fines d'ajouts. Nous avons vu qu'il nécessite plus d'eau qu'un béton classique. D'autre part, il apparaît évident que le mélange ciment- sable présentera une porosité plus élevée que la porosité du béton traditionnel. Cet inconvénient est compensé par l'ajout de fines de bonne nature pour améliorer la compacité. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granululaire. Il s'agit de trouver un compromis entre la maniabilité du béton et sa compacité [Oukil et al., (2017)].

I.2.6. 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.2.6.1. 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 [Bouziani, (2013)].

I.2.6.2. 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.2.6.3. Autres applications

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

I.2.6.3.1. 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.2.6.3.2. 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.5.**), 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.5. Panneau 3D en béton de sable projeté [Benaïssa et al., (2008)].

I.2.6.3.3. Bétons de sable fluides

Les bétons de sable sont naturellement maniabiles 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.2.7. Formulation d'un béton de sable

I.2.7.1. 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.2.7.2. 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 :

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

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.2.7.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable

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

1- Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 µm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable ;

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

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D_{\max})^{\frac{1}{5}} \quad (I.4)$$

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 ($< 80 \mu\text{m}$) et le volume des vides associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

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

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

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente (**Figure I.6.**).

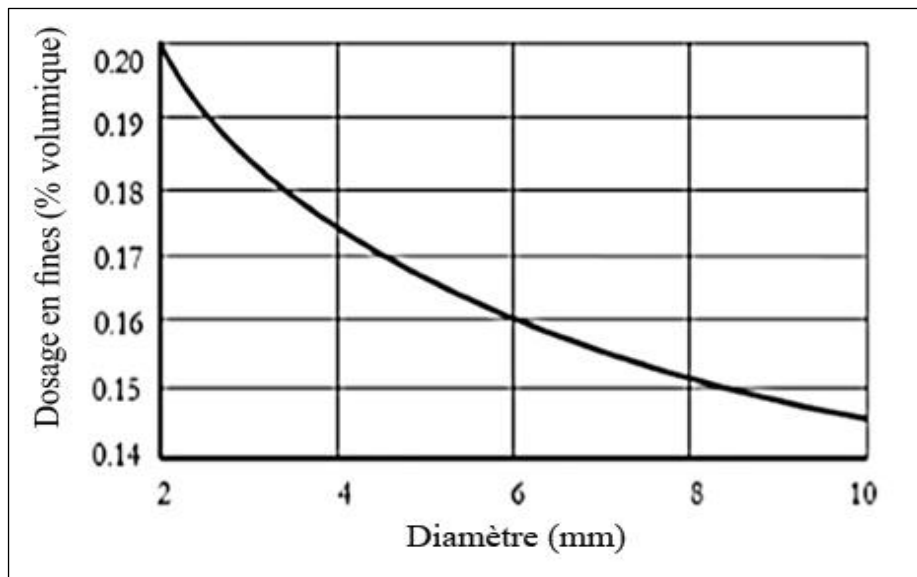


Figure I.6. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.

I.2.7.2.2. 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 .

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

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

$$d = (60 / (f)) \text{ mm} \times \rho \quad (\text{I. 7})$$

Où :

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

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

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés :

La dimension des floccs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale (**Figure I.7.**) [Sablocrete, (1994) ; Ghrieb, (2003)].

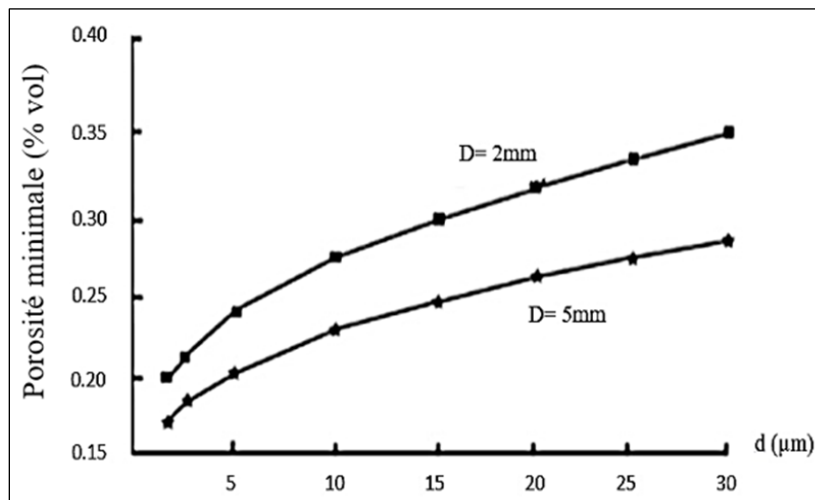


Figure I.7. Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable.

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

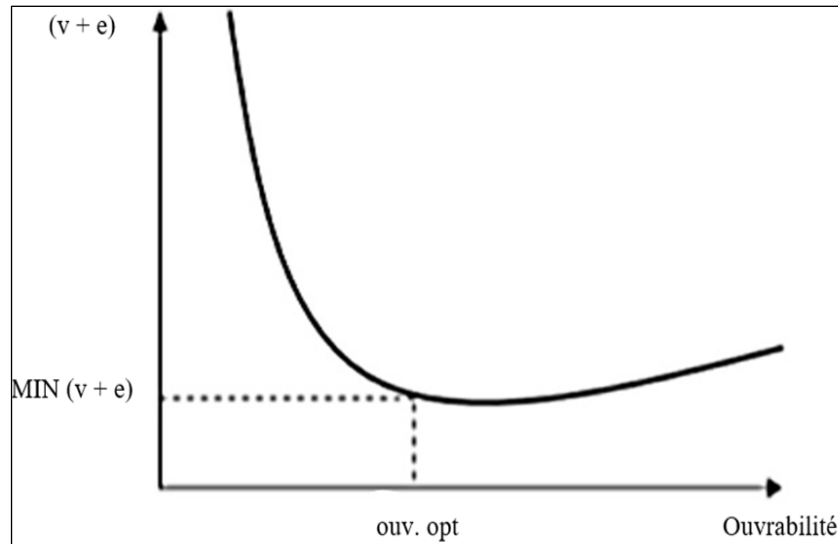


Figure I.8. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en oeuvre donnée.

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%.

$$[\text{Vides}] = K [\text{eau}] \quad (\text{I.8})$$

Avec :

K : Constante comprise entre 0.2 et 0.25.

I.2.7.2.3. 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).

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (\text{I. 9})$$

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.2.7.2.4. 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)].

$$R_b = \frac{R_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+k_1+k_2)}\right)^2} \quad (\text{I. 10})$$

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) ;

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

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

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

$$0 < k_{fil} \leq 0.4 K_1 < 0.2 ;$$

K₁ : Coefficient pouzzolanique ;

K₂ : Coefficient d'activité du filler calcaire (**Figure I.9.**) ;

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

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

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

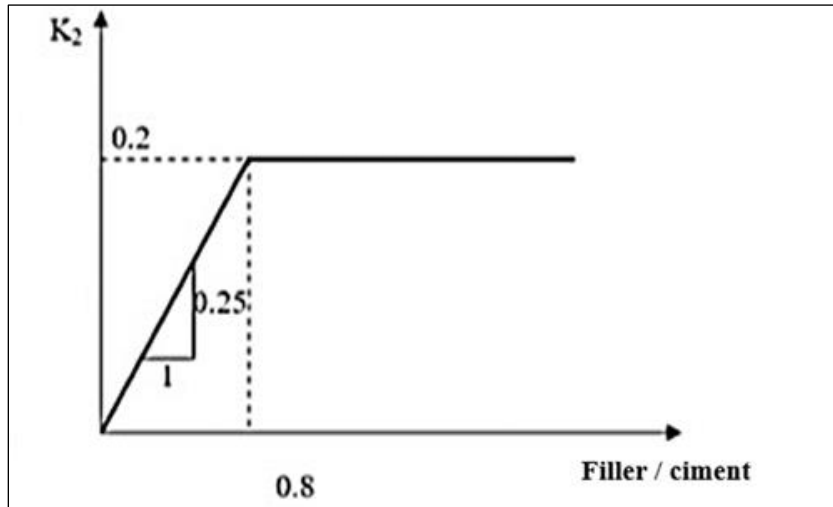


Figure I.9. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).

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.2.7.3. 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.2.7.3.1. 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/m³).

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m³), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 kg de ciment, et 250 litres pour 400 kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

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

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

$$V_{air} + V_C + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \text{ (En litre)} \quad (I. 11)$$

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule d'un mètre cube du béton S (kg/m³).

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

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

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

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

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V \times MV_{\text{sable}} \quad (\text{I. 12})$$

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 :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (\text{I. 13})$$

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

Une comparaison de quelques propriétés entre le béton ordinaire et le béton de sable est montré dans le **Tableau I.2.**

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

Catégorie	Béton de sable	Béton ordinaire
Composants	- Ciment ; - Sable ; - Filler ; - Eau : plus quantité d'eau.	- Ciment ; - Sable ; - Gravier ; - Eau : moins quantité d'eau.
Qualités essentielles	- 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 des bétons de sable pour mouiller toutes les particules fines.	- 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.
Méthodes de formulation	- Méthode théorique et méthode expérimentale ; - Méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées.	- Méthode à granularité continue de Bolomey ; - Méthode de Vallette ; - Méthode de Faury ; - Méthodes générales du C.E.S (centre d'essai des structures) : • Évaluation de l'humidité des granulats ; • Utilisation d'abaque (Méthode Dreux).

Particularités	- 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.	- 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, plus fiables que ceux des bétons classiques.
Domaines d'emploi	- Bâtiments ; - Fondations ; - Voiries ; - Travaux des réparations ; - Projection des surfaces ; - Travaux d'injection ; - Comblement de cavités.	- 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 » [Dupain et al., (2000)].

I.4.2. Valorisation des déchets

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.4.3. Méthodes de la valorisation

I.4.3.1. 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.4.3.2. Valorisation énergétique

Elle est appelée également, recyclage énergétique, elle vise la production d'énergie calorifique [Michel, (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.4.3.3. 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.4.4. 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 [Courard, (1998)].

I.4.4.1. 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.4.4.2. 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.4.4.3. 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, (2017)].

I.4.4.4. 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.4.4.5. 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.4.5. Valorisation des déchets de verre

I.4.5.1. Définition

Le verre est un matériau solide et inorganique composé principalement de silice (SiO_2) et produit en faisant fondre du sable avec du carbonate de sodium et du carbonate de calcium, puis en le refroidissant rapidement pour éviter la cristallisation. Le verre a une structure transparente et amorphe, une bonne résistance à la corrosion et aux facteurs environnementaux, et n'est pas biodégradable, ce qui en fait l'un des matériaux les plus courants dans les déchets solides. Le verre est l'un des matériaux les plus recyclables et les plus utilisables dans l'industrie de la construction, à condition qu'il soit correctement traité [Shao et al., (2000)].

I.4.5.2. Recyclage des déchets de verre en béton

La quantité croissante de déchets de verre générés par les activités urbaines et industrielles a conduit à envisager des solutions environnementales alternatives, notamment l'intégration de ces déchets dans l'industrie du béton. Le verre moulu peut être utilisé sous forme de poudre fine comme substitut partiel du ciment, ou sous forme d'agrégat (fin ou grossier) comme substitut du

sable ou du gravier. Cette valorisation contribue non seulement à réduire l'épuisement des ressources naturelles, mais aussi à réduire les émissions de dioxyde de carbone résultant de la fabrication du ciment [Taha et al., (2009)].

I.4.5.3. Propriétés du verre

I.4.5.3.1. Propriétés physiques

Le verre a une densité comprise entre 2,4 et 2,8 g/cm³ et apparaît transparent ou translucide. Une fois broyé, son comportement physique change en fonction du degré de finesse, les particules fines (moins de 80 microns) acquérant une propriété pouzzolanique. La porosité et la douceur de la surface affectent également directement son interaction dans le milieu cimentaire [Du et al., (2014)].

I.4.5.3.2. Propriétés thermiques

Le verre a un coefficient de dilatation thermique relativement faible et peut résister à des températures allant jusqu'à 600 °C sans se décomposer. Cela le rend adapté à une utilisation dans des environnements où le béton est exposé à la chaleur, sans affecter de manière significative ses propriétés structurelles [Du et al., (2014)].

I.4.5.3.3. Propriétés chimiques

La composition chimique du verre est principalement constituée de silice (> 70 %), en plus d'autres oxydes tels que les oxydes de sodium, de calcium et d'aluminium. Il est également résistant aux attaques chimiques, notamment en milieu alcalin, ce qui le rend adapté aux mélanges cimentaires en termes de réaction à long terme [Du et al., (2014)].

I.4.5.4. Effet de la poudre de verre sur le comportement mécanique du béton

I.4.5.4.1. Définition de la poudre de verre

La poudre de verre est un produit résultant du broyage de déchets de verre en particules très fines à l'aide de broyeurs à rouleaux ou à boulets. Lorsqu'il est utilisé comme additif au ciment, il présente des propriétés pouzzolaniques qui affectent directement les propriétés du béton frais et durci. C'est une alternative durable au ciment Portland, car il contribue à réduire les émissions de carbone. Des propriétés physiques telles qu'une extrême douceur et une teneur élevée en silice

font également de la poudre de verre un ingrédient actif dans la réaction cimentaire [Shayan et al., (2006)].

I.4.5.4.2. Réaction pouzzolanique de la poudre de verre

Lorsque les déchets de verre sont broyés à un niveau de finesse élevé, en particulier en dessous de 80 microns, les particules commencent à montrer une activité pouzzolanique prononcée. Là où il réagit avec l'hydroxyde de calcium résultant de l'hydratation du ciment, produisant des composés d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) qui améliorent la résistance du béton et la cohésion de sa microstructure. Cette réaction peut réduire l'expansion causée par la réaction alcali-silice (ASR) si elle est utilisée avec précaution [Shi et al., (2005)].

I.4.5.4.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton lorsque la poudre de verre est utilisée comme substitut partiel du ciment dépend du taux de remplacement et de la finesse de la poudre. Des expériences ont montré que des taux de remplacement compris entre 10% et 20% n'affectent pas négativement la résistance, mais peuvent même l'améliorer après 28 jours grâce à la réaction pouzzolanique, qui conduit à la production de plus de composés C-S-H. Cependant, dans les premiers stades (moins de 7 jours), la résistance peut diminuer en raison de la réaction plus lente du verre par rapport au ciment conventionnel [Islam et al., (2017)].

I.4.5.4.4. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est un indicateur de la ductilité et de la cohésion interne du béton. Des études ont montré que l'ajout de quantités modérées de poudre de verre peut améliorer la résistance à la flexion, en particulier si la taille et la distribution des grains sont contrôlées. La finesse élevée contribue également à une meilleure interaction entre la pâte de ciment et les granulats, ce qui donne un béton plus dense et moins poreux [Limbachiya et al., (2012)].

I.4.6. Valorisation des déchets de craie dans le béton

I.4.6.1. Définition de la craie et de ses sources de déchets

La craie est une roche sédimentaire à texture molle, géologiquement classée comme calcaire microcristallin, composée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3). Ce minéral est produit à partir de l'accumulation d'organismes marins microscopiques et est généralement de couleur blanche et très poreux. Les déchets de craie sont principalement générés par les processus

de fabrication et de broyage dans les industries chimiques et de la construction, et sont souvent disponibles sous la forme d'une poudre fine qui n'est pas exploitée économiquement [Lothenbach et al., (2008)].

I.4.6.2. Propriétés physiques et chimiques des déchets de craie

Les déchets de craie sont principalement constitués de carbonate de calcium, à plus de 90 %. Il contient également de petites quantités d'oxydes de fer, de magnésium et de silice. Ses particules constitutives sont extrêmement fines, ce qui améliore leur capacité à combler les vides fins dans le mélange de béton. Ces propriétés en font un enduit capable d'améliorer la microstructure du béton sans présenter d'activité pouzzolanique évidente [Borziak et al., (2018)].

I.4.6.3. Utilisation des déchets de craie dans le béton

En remplaçant jusqu'à 15 % du ciment par de la poudre de craie, on peut obtenir un béton avec une résistance mécanique acceptable dans des environnements aux exigences modérées. La présence de craie améliore la consistance du mélange et augmente sa maniabilité. La combinaison de poudre de craie et de fibres naturelles améliore également la résistance à la traction et à la flexion du béton par rapport aux mélanges traditionnels [Sathiyapriya et al., (2023)].

I.4.6.4. Effet des déchets de craie sur les propriétés du béton

L'ajout de poudre de craie réduit la capacité du béton à absorber l'eau et diminue la perméabilité du mélange, améliorant ainsi sa résistance aux cycles thermiques (gel/dégel). La composition fine contribue également à réduire la porosité et à améliorer la densité globale du béton, en particulier dans les bétons destinés aux travaux de génie civil tels que les routes et les structures urbaines [Borziak et al., (2018)].

I.5. Conclusion

À la lumière de l'analyse bibliographique, il est possible de déduire que :

Les bétons de sable peuvent remplacer les bétons ordinaires dans certains domaines d'application. De nombreuses réalisations variées ont déjà été menées avec succès. Pour assurer une maniabilité satisfaisante, l'utilisation d'adjuvants est indispensable afin de réduire le dosage en eau et d'augmenter la résistance. Il est également essentiel de sélectionner des sables avec une bonne répartition granulaire, tout en privilégiant les diamètres les plus gros possibles. Pour

combler les vides intergranulaires, il est nécessaire d'ajouter des fines de bonne qualité, avec une finesse élevée, et de veiller à des dosages appropriés, comme l'utilisation de fillers calcaires, qui sont particulièrement adaptés aux bétons de sable. Cependant, l'ajout de fines, qui augmente la compacité, réduit la maniabilité, ce qui rend essentiel de trouver un équilibre entre ces deux paramètres.

De plus, depuis plusieurs décennies, le ciment Portland demeure le matériau de construction le plus largement utilisé à travers le monde. Cependant, sa fabrication exige une quantité considérable d'énergie et entraîne une émission importante de CO₂ ainsi que de poussières, contribuant ainsi à la pollution de l'environnement.

Enfin, l'ajout de matériaux minéraux dans les bétons et les mortiers contribue à l'amélioration de leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques. En outre, cette pratique permet de préserver les ressources naturelles tout en assurant une meilleure protection de l'environnement.

CHAPITRE II :

Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

CHAPITRE II :

Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

II.1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'étude des matériaux de base utilisés dans la préparation des formulations de béton. Il est divisé en deux parties principales.

La première partie est consacrée à la présentation des propriétés physico-chimiques des matériaux de base utilisés dans la préparation des bétons. La seconde partie présente les différentes expériences de laboratoire effectuées pour évaluer la performance de ces formulations, tant à l'état frais qu'après durcissement, dans le but de comprendre le comportement du béton sous différentes conditions.

II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés

II.2.1. Sable

Dans cette étude, deux types de sable différents ont été utilisés, dans le but de comparer les caractéristiques de chaque type et leur influence sur le mélange de béton.

Le premier type est le sable de dune (SD), qui a été prélevé dans la région sud de la ville d'El Oued. Ce sable se caractérise par des grains relativement fins, avec un diamètre maximal d'environ 0,63 mm. De plus, la proportion de grains très fins, c'est-à-dire ceux dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm – ne dépasse pas 5 %, ce qui en fait un sable à granulométrie limitée. Ceci a été illustré dans la **Figure (II.1.a)**.

Le deuxième type est le sable alluvionnaire (SA), qui a été extrait de la région de Djamaa (Wilaya d'El Meghaier). Ce type de sable présente des grains de taille plus grande par rapport au premier, avec un diamètre maximal atteignant environ 5 mm, ce qui le rend plus adapté à certaines utilisations du béton nécessitant une large granulométrie. Cela a été illustré dans la **Figure (II.1.b)**.

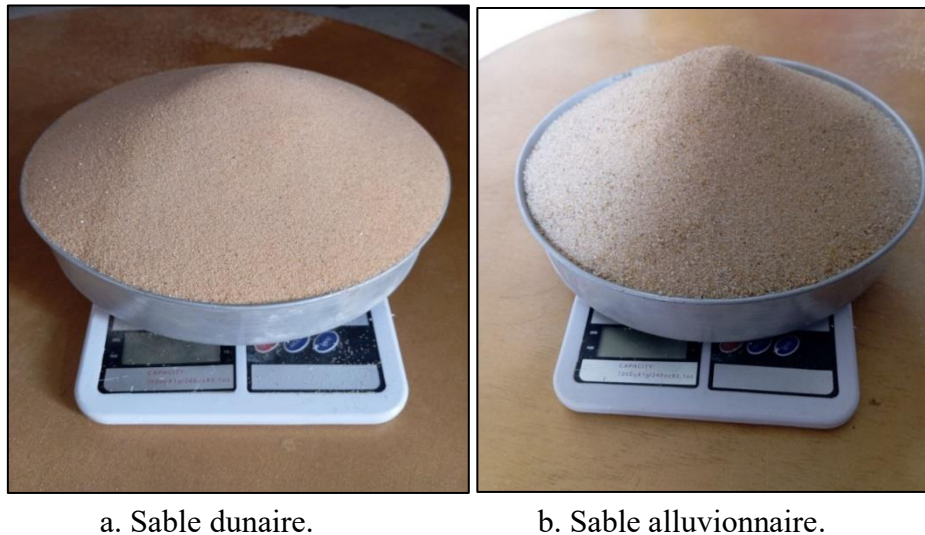


Figure II.1. Sables utilisés.

Selon des études précédentes, le sable utilisé est un mélange entre les deux sables (SAD). Il est constitué d'un mélange entre le sable alluvionnaire (SA) et le sable de dune (SD), dans le but d'améliorer la granulométrie et de rendre l'agrégat fin plus conforme aux spécifications requises pour le béton ont indiqué que ce type de mélange améliore les propriétés du béton, en particulier à l'état frais. Ce mélange a été préparé selon un rapport massique défini ($SA/SD = 1.7$), où la granulométrie du sable alluvionnaire a été corrigée dans sa fraction fine par l'ajout de sable de dune, qui contient une proportion plus élevée de fines particules [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. L'essai est défini par la norme **NF P 18 560**.

L'essai consiste à sécher l'échantillon, puis à le tamiser à travers une série de tamis de diamètres différents. Après le tamisage, le pourcentage en masse de chaque fraction est calculé et les résultats sont représentés sous forme de courbe de distribution granulométrique.

Cette analyse permet de vérifier l'aptitude du granulat à être utilisé dans les formulations de béton en termes de granulométrie et de densité. Les courbes graphiques présentent les résultats de l'analyse des sables utilisés (**Figure II.2.**)

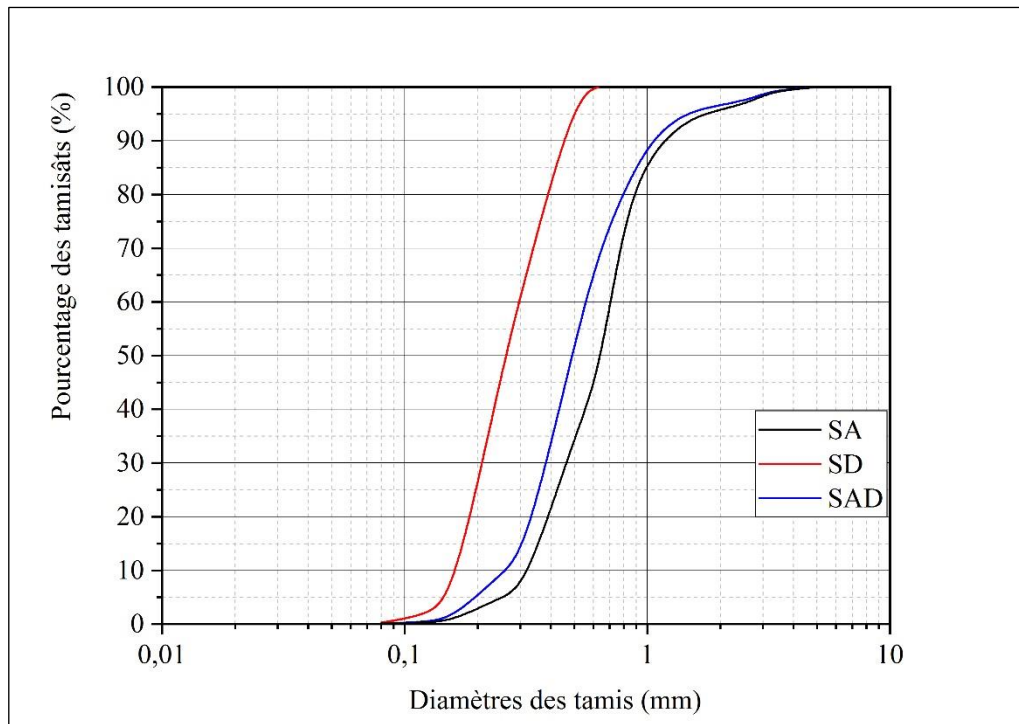


Figure II.2. Courbe granulométrique des sables utilisés.

D'après la figure, on constate que 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

1) Masse volumique apparente

Selon la norme **NF P 18-555**, la masse volumique apparente représente la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Elle 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

La norme **NF P 18-555**, est défini la masse volumique absolue par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Elle 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 (M_f). 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).

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

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 (H_1) et du sédiment + sable propre seulement (H_2).

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

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

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 :

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

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	C_p (%)	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 norme **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 sur dosage en ciment et combler les vides [Chauvin et al., (1988)].

II.2.1.3. Caractéristiques chimiques

D'après Ammari et al., l'analyse chimique des sables alluvionnaire et dunaire menées par diffraction des rayons X (DRX) montre que la nature de deux sables est essentiellement de nature siliceuse (Figures II.3., et II.4.) [Ammari et al., (2021)].

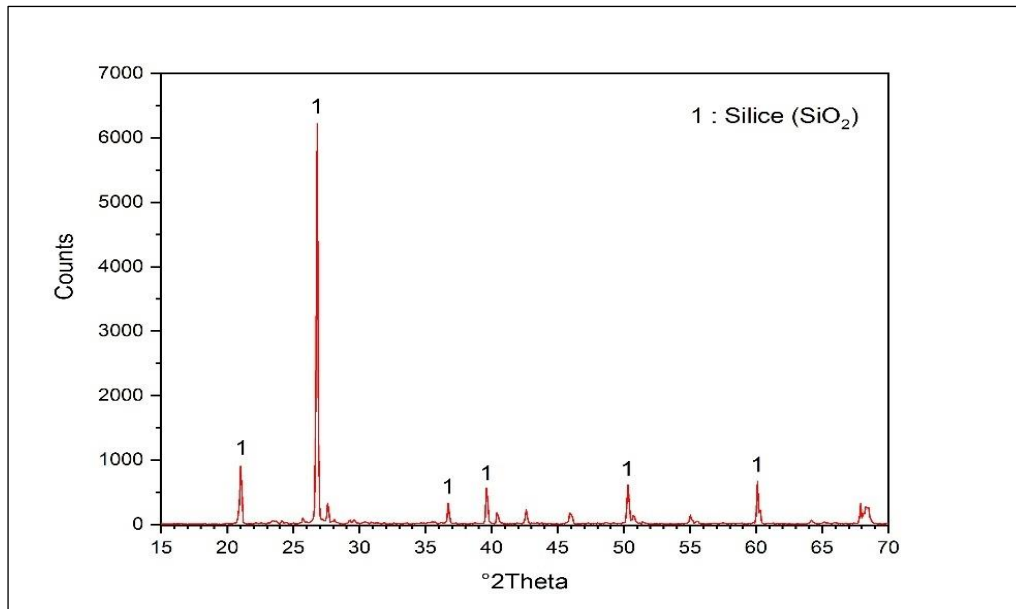


Figure II.3. Analyse chimique par DRX du sable de dune.

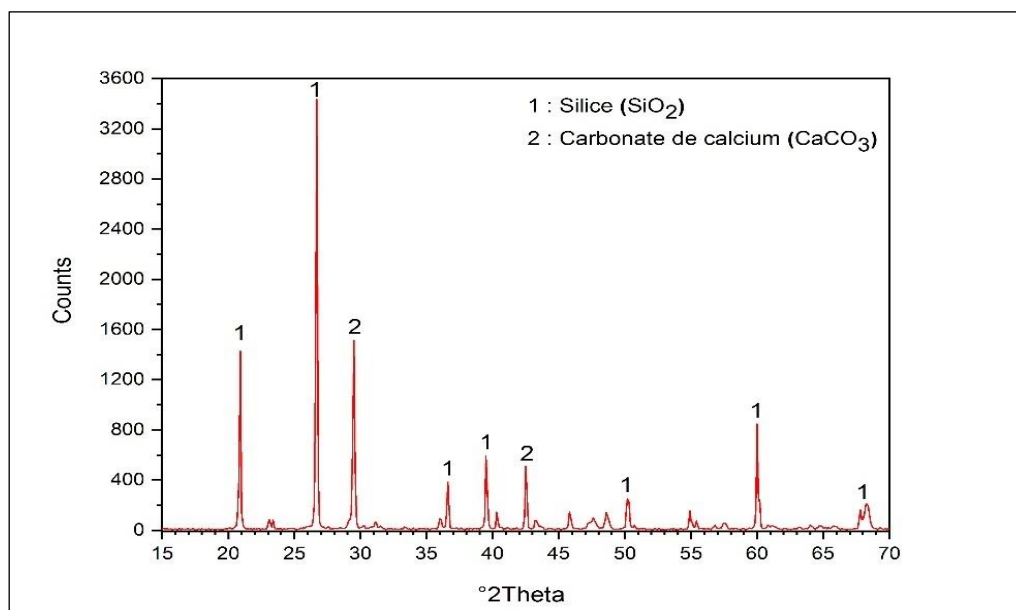


Figure II.4. Analyse chimique par DRX du sable alluvionnaire.

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II / B42.5N selon la norme NA 442et EN 197-1, le ciment a été fourni par la société LAFARGE de type : MATINE (**Figure II.5**), Bab Ezzouar (Alger)-Algérie. Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement 3080 kg/m³ et 975 kg/m³. Les résultats de l'analyse chimique du ciment sont présentés dans le **TableauII.2**.

Tableau .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

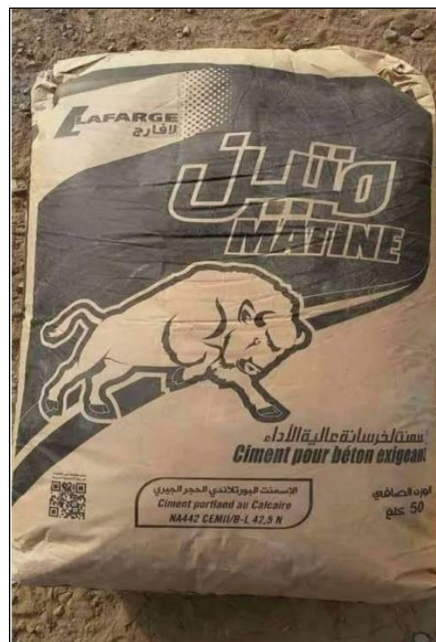


Figure II.5. Ciment utilisé.

II.2.3. Filler calcaire

Dans cette étude, nous avons utilisé le filler de type calcaire. Il est utilisé pour compléter la courbe granulométrique du sable dans la partie fine et à combler les vides [**Chauvin et al., (1988)**]. Son utilisation peut compenser le manque de fines particules dans le ciment ou le sable, puisque sa taille ne dépasse pas 80 µm, ce qui améliore les propriétés du béton telles que la réduction de la perméabilité et l'augmentation de la cohésion. Sa présence dans les pores capillaires limite également la pénétration de l'eau, ce qui augmente la résistance du béton aux

agents environnementaux. Il a été obtenu d'une carrière située au sud de HASSI MESSAOUD-OUARGLA (**Figure II.6.**). La masse volumique réelle et apparente du filler utilisé est respectivement de 2500 kg/m³ et 981 kg/m³.



Figure II.6. Filler calcaire utilisé.

L'analyse chimique du filler par 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, ce qui confirme que le filler utilisé est de nature calcaire [Ammari et al., (2021)].

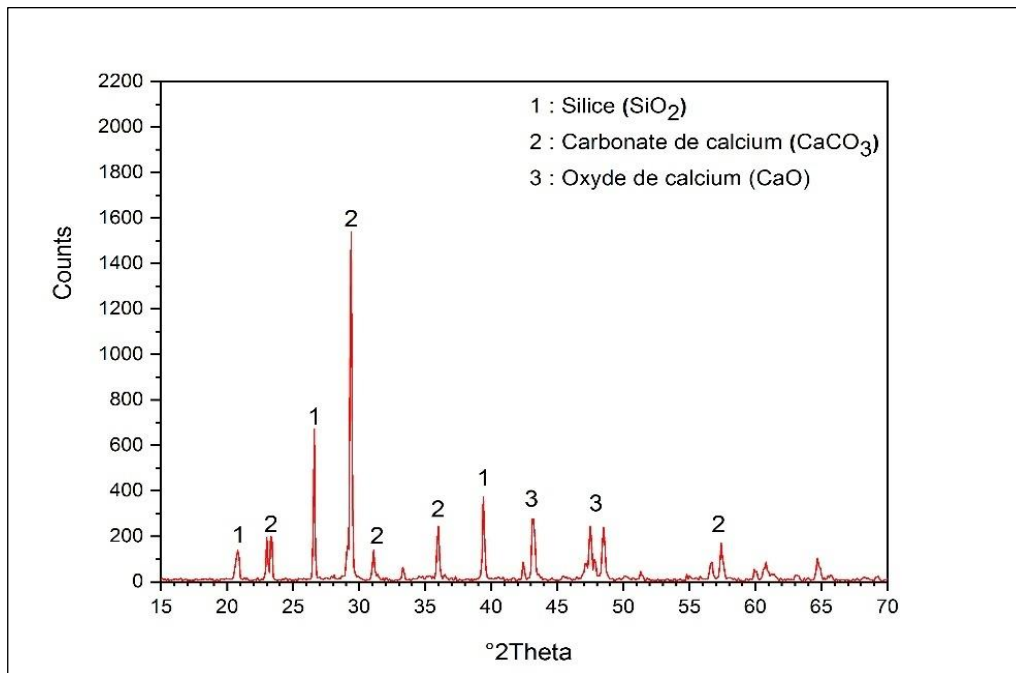


Figure II.7. Analyse chimique par DRX du filler calcaire utilisé.

II.2.4. Poudre de verre

L'utilisation de la poudre de verre comme ajout minéral dans la fabrication du béton a connu un développement remarquable ces dernières années, notamment avec l'essor de l'approche durable et du recyclage des déchets industriels. Le verre broyé, issu généralement de déchets de verre non réutilisables, est utilisé comme matériau de substitution partielle au ciment dans le béton ordinaire, à haute performance ou auto-compactant. Il se caractérise par sa couleur blanche et ses propriétés pouzzolaniques après avoir été traité à une finesse appropriée. Des études récentes indiquent que l'ajout de poudre de verre selon un certain pourcentage peut améliorer la durabilité du béton et sa résistance aux chlorures, tout en réduisant son impact environnemental en diminuant les émissions de dioxyde de carbone liées à la production du ciment conventionnel [Idir et al., (2011) ; Jain et al., (2010) ; Schwarz et al., (2008) ; Shi et al., (2005)].

Dans ce travail, des déchets de verre industriel ont été utilisés comme source principale pour obtenir la poudre. La masse volumique absolue de la poudre de verre est d'environ 2570 kg/m^3 , et la surface spécifique Blaine est $288 \text{ m}^2/\text{kg}$, ce qui constitue des valeurs acceptables pour son utilisation comme ajout dans la formulation du béton.

La préparation de la poudre de verre a été réalisée selon les étapes suivantes (**Figure II.8.**) :

1. Collecte et tri des déchets de verre ;
2. Concassage manuel des gros morceaux à l'aide d'un marteau en fer ;
3. Broyage du verre concassé à l'aide d'un broyeur de laboratoire ;
4. Tamisage du produit obtenu à travers un tamis de $80 \mu\text{m}$, et renvoi de la fraction non fine pour un broyage supplémentaire.



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)]**.

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

II.2.5. Poudre de craie

En tant que substitut au ciment dans le béton, la recherche d'alternatives durables au ciment traditionnel constitue l'une des orientations les plus récentes de l'industrie du béton. Cela vise à réduire l'empreinte carbone et à diminuer la dépendance aux ressources naturelles non renouvelables. Parmi ces alternatives, l'utilisation de la poudre de craie s'est distinguée. Ce matériau, riche en carbonate de calcium (CaCO₂), peut être obtenu à partir de sources industrielles ou éducatives sous forme de déchets recyclés.

Des études récentes indiquent que le remplacement du ciment par de 15 % de poudre de craie donnait une amélioration de la maniabilité et réduisait la perméabilité, tout en maintenant la résistance à la compression à des niveaux acceptables **[Zhu et al., (2005)]**.

Sathish et al., a montré que l'intégration de la poudre de craie avec d'autres matériaux tels que les coquilles d'œufs et les fibres de basalte donne des résultats prometteurs en termes de résistance et de durabilité du béton, ce qui montre la possibilité de son usage dans des applications non structurelles ou dans les éléments secondaires des structures **[Kumar, (2012) ; Banupriya et al., (2020)]**.

La poudre de craie se distingue par sa couleur blanche et sa grande finesse, ce qui la rend adaptée pour réagir avec les composés alcalins dans la pâte de ciment. Sa masse volumique est d'environ 2710 kg/m³, tandis que sa surface spécifique mesurée par l'appareil Blaine est d'environ 295 m²/kg.

La préparation de la poudre de verre a été réalisée selon les étapes suivantes (**Figure II.9.**) :

- Collecte et tri des déchets de craie brute à partir de sources scolaires ;
- Concassage manuel des gros morceaux à l'aide d'un marteau en fer ou d'un outil approprié ;
- Broyage de la craie concassée à l'aide d'un broyeur de laboratoire ;
- Tamisage du produit obtenu à travers un tamis de 80 μm , et renvoi de la fraction non fine pour un nouveau broyage.



Figure II.9. Poudre de craie utilisée.

Les résultats de l'analyse chimique de la poudre de craie utilisée par l'essai de diffractométrie aux rayons X sont présentés dans la **Figure II.10.**

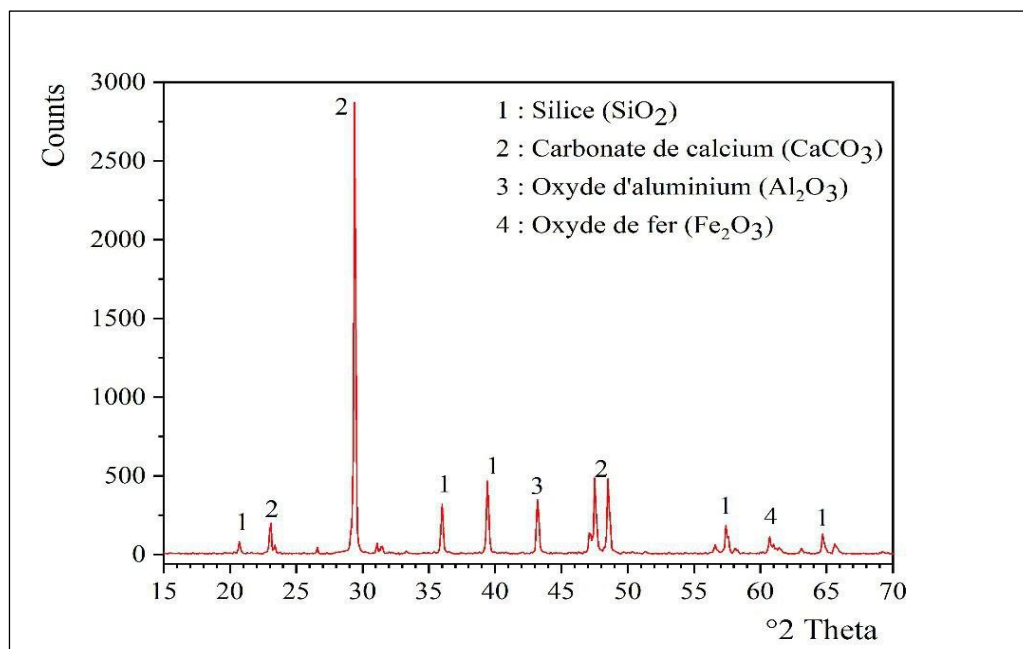


Figure II.10. Analyse par diffraction des rayons X de la poudre de craie.

D'après la figure, l'analyse par DRX a montré que la poudre de craie est contenue de pourcentage plus élevé de carbonate de calcium CaCO_3 , ce qui montre que la craie utilisée est généralement de nature calcaire.

II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour préparer le béton, qu'il soit ordinaire ou à base de sable, doit impérativement être propre, potable et exempte de sels ou de substances minérales nuisibles.

Dans cette étude, l'eau du robinet a été utilisée comme source d'eau de gâchage. Elle a été prélevée d'un réservoir d'eau appartenant à la ville d'El Oued (situé au centre-ville, Cité El-Kawthar). Il est à noter que cette eau utilisée dans la préparation du béton de sable est conforme aux exigences de la norme **NF P18 303**.

II.2.7. Adjuvant

Le superplastifiant utilisé dans cette étude est de type "MEDAFLOW 30", un produit national fabriqué par la société "GRANITEX", Oued Smar - Alger. Ce produit se présente sous forme liquide, de couleur brun clair, se mélange facilement à l'eau de gâchage et est entièrement conforme à la norme européenne **EN 934-2**. Il est utilisé à raison de 1,5 % du poids du (ciment et poudres minérales). Le "MEDAFLOW 30" appartient à la troisième génération de superplastifiants à haute capacité de réduction d'eau. Ce produit se distingue par sa capacité à produire des mélanges de béton et de mortier de haute qualité. En plus de son rôle principal dans l'amélioration de la fluidité du mélange, il permet une réduction importante de la quantité d'eau de gâchage tout en conservant une consistance constante du mélange.

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques techniques de ce produit, selon les données fournies par le fabricant (**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

Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur électrique en acier d'une capacité de 140 litres et d'une puissance de 650 watts, selon les étapes suivantes :

- On mélange à sec le ciment et les poudres minérales (craie et verre) pendant 2,5 minutes à vitesse lente ;
- On ajoute le sable et le filler calcaire, puis on continue le malaxage pendant 2,5 minutes à la même vitesse ;
- Après avoir vérifié l'homogénéité du mélange, on ajoute progressivement 70 % de l'eau de gâchage sans interruption, tout en continuant le malaxage pendant 1,5 minute à vitesse lente ;
- On ajoute 30 % de l'eau de gâchage restante, mélangée avec la quantité de l'adjuvant, puis le mélange est malaxé pendant 1 minute à vitesse lente.

Après le malaxage, le mélange est coulé dans des moules de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³ pour les essais programmés dans cette étude :

- On remplit environ la moitié du moule en premier, avec une légère vibration de 30 coups ;
- On remplit ensuite la deuxième moitié, avec une vibration supplémentaire de 30 coups ;
- La surface est nivelée pour éliminer l'excès de béton ;
- Les moules sont retirés après 24 heures ;
- Les échantillons sont conservés dans la même salle jusqu'au jour de l'essai ;
- La température est maintenue à (25 ± 5) °C et l'humidité relative à $(50 \% \pm 10 \%)$.

II.3.2. Caractérisation du béton frais

II.3.2.1. Maniabilité

La maniabilité du béton est une propriété fondamentale, tout aussi importante que sa densité, car elle influe directement sur la qualité du coulage et la facilité de mise en œuvre du béton sur le chantier. Le choix de la méthode de mesure de la maniabilité dépend généralement des caractéristiques du mélange, en particulier du diamètre maximal des granulats. Dans notre étude, l'essai d'affaissement à l'aide du cône d'Abrams a été adopté. Les étapes de cet essai consistent à remplir le moule en forme de cône avec le béton en trois couches, en compactant chaque couche à l'aide d'une tige métallique par 25 coups. Une fois le moule rempli, il est retiré

délicatement pour permettre au béton de s'affaisser naturellement selon sa consistance. Dès le retrait du cône, le béton commence à s'affaisser à des degrés variés, reflétant son niveau de fluidité et sa maniabilité. L'affaissement est mesuré depuis le point le plus haut de la masse de béton, et doit être effectué dans la minute qui suit immédiatement le retrait du moule. La mesure est ensuite arrondie au centimètre près (**Figure II.11.**)

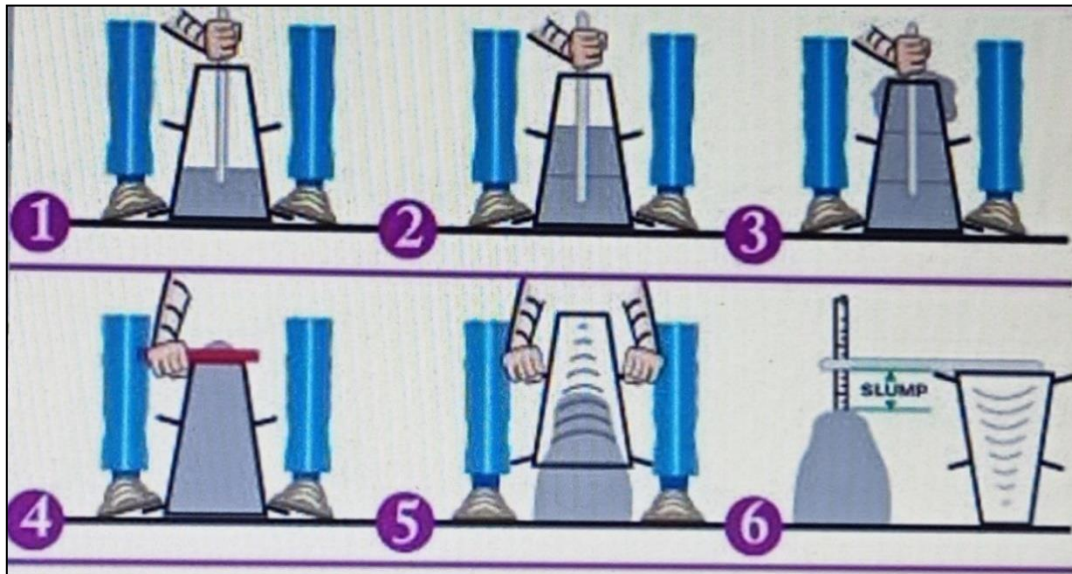


Figure II.11. Dispositif de mesure d'affaissement.

La norme européenne **EN 206-1** stipule une classification du béton en plusieurs classes d'affaissement (consistance), comme indiqué dans le **Tableau II.6.** : Une valeur d'affaissement plus élevée indique que le béton est plus plastique ou fluide, ce qui reflète une grande maniabilité.

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

La masse volumique apparente représente la masse par unité de volume incluant à la fois la matière solide du béton et les pores ou vides qu'il contient. Cette valeur est calculée conformément à la norme **EN 12390-7**, en déterminant le poids de l'échantillon et 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. Essai d'absorption d'eau par immersion totale

Cet essai repose sur la mesure de la quantité d'eau que le béton peut absorber après durcissement. Cette valeur indique le degré de porosité du matériau et la qualité de sa composition. La méthode consiste à mesurer la différence entre le poids de l'échantillon sec et son poids saturé en eau, selon les étapes suivantes (**Figure II.12.**) :

- Séchage des éprouvettes de béton dans un four à 70°C jusqu'à stabilisation du poids (P_s) ;
- Immersion des éprouvettes séchées dans de l'eau à $20 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 48 heures ;
- Retrait des éprouvettes et essuyage de la surface par un chiffon ;
- Mesure du poids saturé (P_h) pour chaque échantillon ;

La capacité d'absorption d'eau est donnée par la formule suivante :

$$A \% = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \% \quad (\text{II. 7})$$

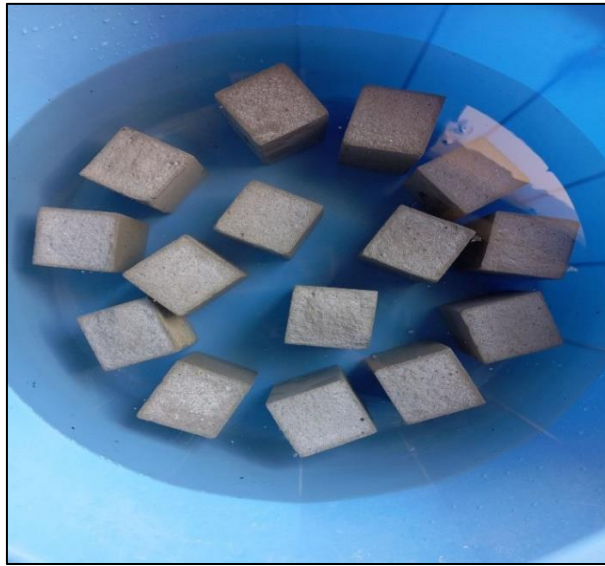


Figure II.12. Essai d'absorption d'eau par immersion totale.

II.3.3.3. Etude des propriétés mécaniques

II.3.3.3.1. Résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³, selon la norme **NF P18-407 (Figure II.13.)**. L'essai s'effectue sur une machine automatique de flexion du type " CONTROLS " ayant une capacité maximale 2000 kN ; la vitesse de chargement a été réglée à 5 kg par seconde jusqu'à la rupture. La contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est calculée comme suit :

$$R_t = \frac{1.5F_t \times L}{b^3} \quad (\text{II. 8})$$

Où :

F_t : Charge de rupture ;

L : Longueur entre les axes des deux appuis ;

b : Largeur de la section transversale de l'éprouvette.

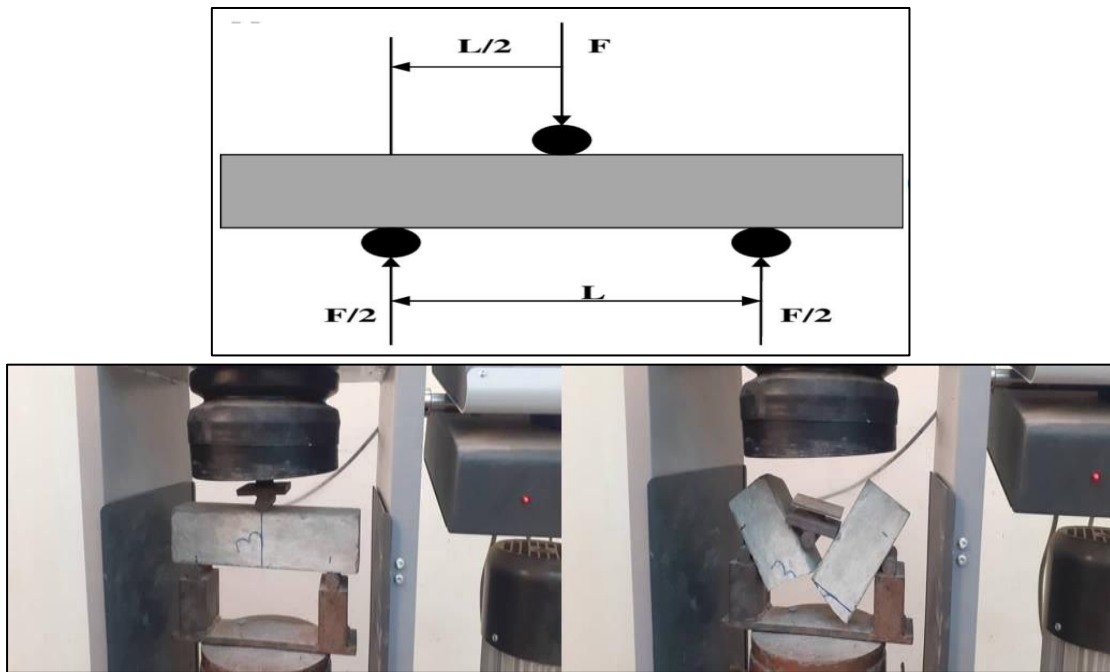


Figure II.13. Dispositif de l'essai de la résistance à la traction par flexion.

II.3.3.3.2. Résistance à la compression

Les deux parties des éprouvettes résultant de l'essai de traction par flexion sont soumises l'une après l'autre à l'essai de résistance à la compression (**Figure II.14.**).

Trois éprouvettes ont été préparées pour chaque formulation de béton afin d'assurer la précision des résultats. L'éprouvette a été placée horizontalement entre les plateaux de la machine, de manière à être en contact avec les deux faces latérales du moule, et son bon centrage a été vérifié. Après la mise en marche de la machine, la charge commence à augmenter automatiquement à une vitesse constante de 2,5 kN/s, ce qui provoque une compression progressive de l'échantillon jusqu'à atteindre le point de rupture.

L'essai a été réalisé conformément à la norme **NF P 18-406**, la résistance à la compression est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{II. 9})$$

Avec :

F_c : Force de compression ;

A : Surface transversale de l'éprouvette.

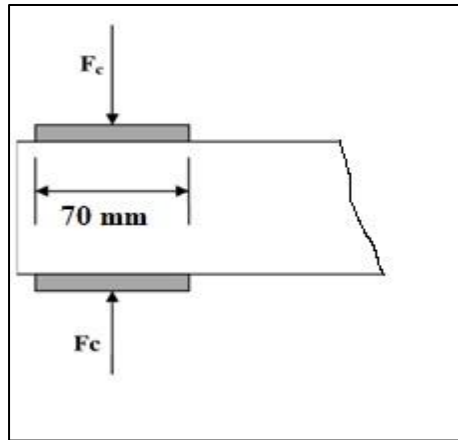


Figure II.14. Dispositif de l'essai de la résistance à la compression.

II.3.3.4. Analyse de la microstructure

II.3.3.4.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée à l'aide d'un AXRD Benchtop de type « PROTO » (**Figure II.15.**) sur des échantillons finement broyés qui ont ensuite été tamisés jusqu'à une taille de $80\ \mu\text{m}$ pour obtenir des résultats précis. Le résultat est un diffractogramme, qui est une courbe montrant l'intensité des phases cristallines (pics) en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Le programme utilisé dans cette analyse couvre la plage d'angles comprise entre 15° et 70° et est modifié en fonction de la nature de l'échantillon.



Figure II.15. Diffractomètre de type « PROTO ».

II.3.3.4.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée à l'aide d'un MEB Thermo Scientific Prisma E (**Figure II.16.**) sur des surfaces d'échantillons de poids d'environ 7 g. L'essai est réalisé au niveau du CRAPC- Biskra.



Figure II.16. Microscopie électronique à balayage « Thermo Scientific Prisma E »

II.4. Conclusion

À travers ce chapitre, les propriétés physiques et chimiques des matériaux de base utilisés dans la fabrication du béton ont été abordées en détail, en plus des méthodes de préparation et de l'analyse de leur influence sur le comportement du mélange étudiés, à l'état frais comme après durcissement. Ces informations sont conformes aux normes en vigueur pour l'évaluation des performances des différents bétons. Ces informations constituent un support essentiel pour le chapitre suivant afin d'extraire des conclusions qui soutiennent l'hypothèse de cette étude.

CHAPITRE III :

Résultats et Discussions

CHAPITRE III :

Résultats et Discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus à partir des expériences menées. Ces résultats représentent le résumé du travail appliqué qui visait à évaluer l'effet de l'ajout de poudre de craie et de poudre de verre, dans différentes proportions, sur les propriétés mécaniques et microstructure du béton de sable. Les principaux essais étudiés sont la résistance à la flexion, la résistance à la compression, la densité et l'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB).

III.2. Compositions des bétons étudiés

Dans cette étude, on a évalué l'effet de substitution partielle du ciment (20%) par d'autres additions minérales (poudre de verre et poudre de craie) sur le comportement du béton de sable étudié, en utilisant la technique de la méthode des plans d'expériences. La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais, sans toutefois toucher à la qualité du produit.

La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais [Bouziani, (2013) ; Goupy, (2013) ; Arandigoyen et al., (2007)]. Les variables ou les facteurs d'étude des plans de mélanges dans ce cas sont : le ciment, la poudre de verre (PV) et la poudre de craie (PC). Ce sont les proportions des constituants du mélange dont la somme des proportions est égale à 100% [Yahia et al., (2001) ; Chauveau et al., (2012)].

$$\Sigma x_i = 100 \% \quad (III.1.)$$

Le nombre de combinaisons est exprimé par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!} \quad (\text{III.2.})$$

Où :

q : est le nombre de facteurs ;

m : le nombre de niveaux.

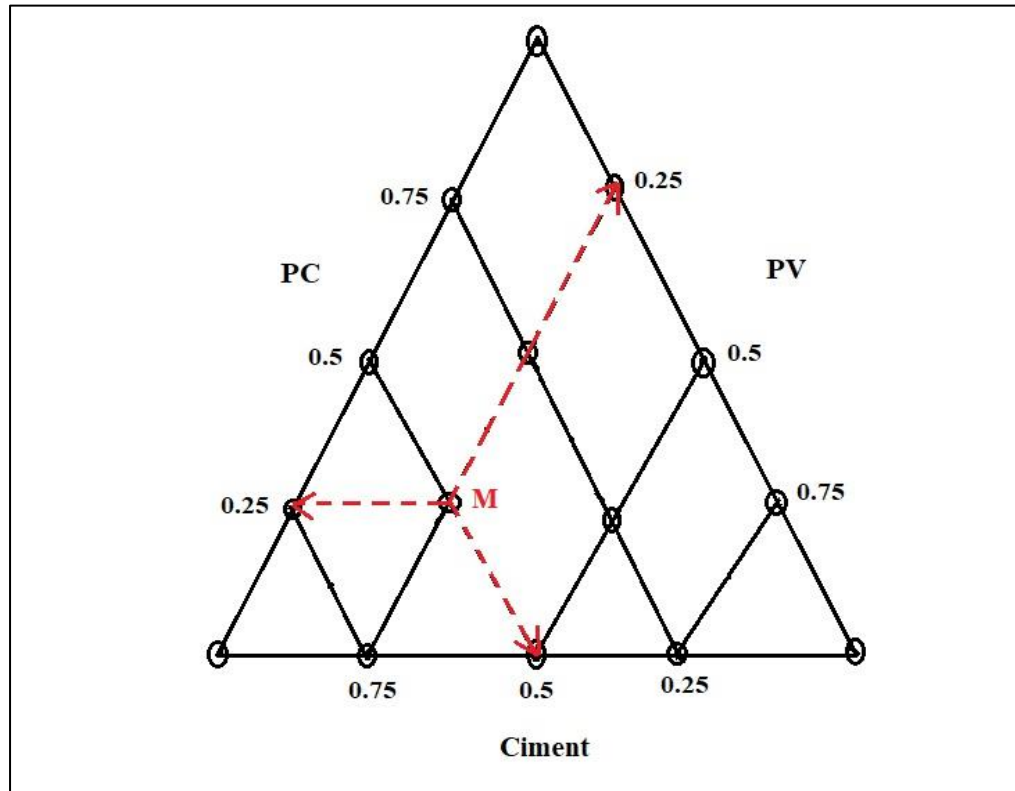


Figure III.1. Représentation triangulaire de 15 combinaisons étudiées.

Avec trois facteurs ($q = 3$) et cinq niveaux ($m = 4$), le nombre de combinaisons à traiter selon l'équation (III.2.) est de 15 (**Tableau III.1.**).

La composition C01 représente le béton témoin contenant 100% de ciment. Les mélanges sont préparés avec des fractions volumiques de 0% jusqu'à 20%, avec un intervalle de 5% des ajouts minéraux (par rapport au ciment).

Tableau III.1. Les 15 essais donnés par la méthode des plans d'expériences.

N°	Ciment (%)	Poudre de verre (%)	Poudre de craie (%)
C01	100	0	0
C02	75	25	0
C03	75	0	25
C04	50	50	0
C05	50	25	25
C06	50	0	50
C07	25	75	0
C08	25	50	25
C09	25	25	50
C10	25	0	75
C11	0	100	0
C12	0	75	25
C13	0	50	50
C14	0	25	75
C15	0	0	100

Par ailleurs, la composition optimale de béton de sable est inspirée des travaux précédents [Ammari et al., (2021)]. Le détail de la composition est donné dans le **Tableau III.2.**

Tableau III.2. Compositions des bétons étudiés.

N°	Sable (kg/m ³)	Filler calcaire (kg/m ³)	Eau de gâchage (l/m ³)	Super- plastifiant (%)	Ciment (kg/m ³) Partie fixe	Matériaux substitués		
						Ciment (kg/m ³)	Poudre de verre (PV) (kg/m ³)	Poudre de craie (PC) (kg/m ³)
C01	1296	150	235	1.5	320	80	0	0
C02						60	16.69	0
C03						60	0	17.60
C04						40	33.38	0
C05						40	16.69	17.60
C06						40	0	35.19
C07						20	50.06	0
C08						20	33.38	17.60
C09						20	16.69	35.19
C10						20	0	52.79
C11						0	66.75	0
C12						0	50.06	17.60
C13						0	33.38	35.19
C14						0	16.69	52.79
C15						0	0	70.39

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

III.3. Caractérisation du béton frais

❖ Etude de la maniabilité

Le **Tableau III.3.**, présente les résultats de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, réalisés sur les différentes compositions de béton étudiées. Les valeurs enregistrées concernant leur ouvrabilité seront utilisées par la suite pour analyser le comportement des mélanges et leur conformité aux exigences de performance.

Tableau III.3. Maniabilité des compositions étudiées.

Type de béton	Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
C01	7.4	Plastique
C02	7.2	Plastique
C03	7.5	Plastique
C04	7	Plastique
C05	7.3	Plastique
C06	7.6	Plastique
C07	6.8	Plastique
C08	6.9	Plastique
C09	7.2	Plastique
C10	7.4	Plastique
C11	6.5	Plastique
C12	6.7	Plastique
C13	6.9	Plastique
C14	7.2	Plastique
C15	7.2	Plastique

D'après les résultats, il est clair que l'ajout de poudre de verre et de poudre de craie au mélange de béton dans différentes proportions n'a pas modifié de manière significative la consistance globale des mélanges, car la consistance est dans la gamme plastique pour tous les cas. Cela indique que le remplacement d'une partie du ciment par l'une de ces deux poudres n'affecte pas significativement sur la maniabilité, en comparaison avec le cas de référence C01.

Ces résultats sont attribués à la forme de la surface du verre et à sa forme irrégulière, comme l'indique l'étude [Shekhawat et al., (2014)]. Tandis que la forme lisse et ronde des particules de craie augmente l'ouvrabilité [Kumar, (2012)].

III.4. Caractérisation du béton durci

III.4.1. Masse volumique

Les résultats obtenus des différents types de bétons étudiés sont présentés dans la **Figure III.2**.

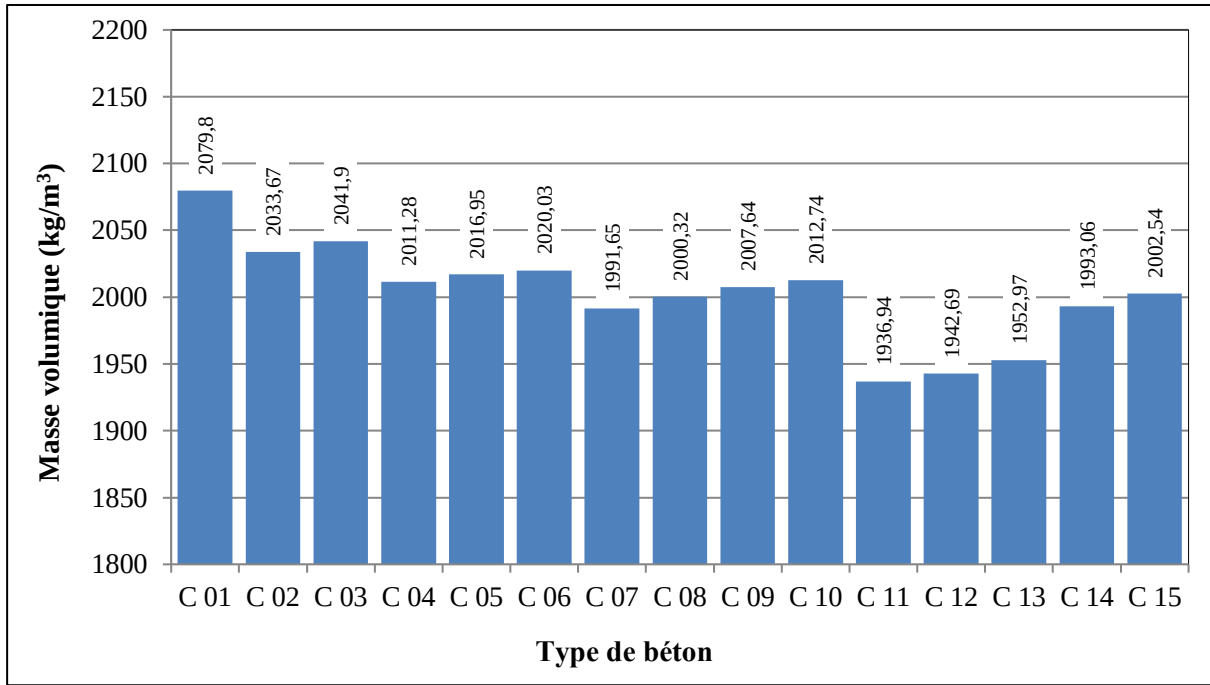


Figure III.2. Masse volumique des différents bétons étudiés.

D'après la figure, le mélange de référence C01 a enregistré la masse volumique la plus élevée, tandis que le reste des mélanges a montré une diminution progressive notable où taux de diminution varient de 1.82% (C03) à 6.87% (C11). Par rapport au béton témoin et au béton à base de poudre de verre, la réduction des masses volumiques des bétons confectionnés avec de la poudre de craie s'explique principalement par la densité et les caractéristiques propres à cette poudre.

Selon la norme **NF EN 206-1**, la densité de béton léger est variée entre 800 kg/m³ et 2000 kg/m³. Dans cette étude, on constate que la densité des bétons étudiés reste dans la gamme des bétons légers dans les cas (C07, C11, C12, C13 et C14) et hors la gamme dans les autres cas.

III.4.2. Absorption d'eau par immersion totale

Pour étudier l'influence des PV et PC sur les propriétés du béton, notamment leur impact sur la porosité, l'absorption d'eau sert d'indicateur clé : une augmentation de l'absorption révèle une

porosité accrue dans la structure. Les valeurs de coefficient d'absorption d'eau des échantillons à 28 jours sont rapportés dans le **Tableau III.5**.

Tableau III.5. Absorption d'eau par immersion des bétons étudiés.

Compositions	Ab (%)
C01	7.95
C02	8.23
C03	8.10
C04	8.34
C05	8.31
C06	8.26
C07	8.45
C08	8.37
C09	8.30
C10	8.28
C11	9.06
C12	9.00
C13	8.91
C14	8.82
C15	8.74

D'après les résultats, on remarque que l'introduction de poudre de verre et de craie influe sur la porosité du béton. Par rapport à la composition de référence (C01), le béton contenant de la poudre de verre présente un taux d'absorption accru avec l'augmentation du pourcentage de verre. Également, l'augmentation de poudre de craie suivi par une légère augmentation d'absorption d'eau. Cette augmentation s'explique par une présence de vides au sein de la matrice. Enfin, la quantité de ciment joue un rôle important dans la réduction des vides en formant des liaisons hydrauliques, ce qui affecte également l'absorption du béton.

III.4.3. Etude des propriétés mécaniques

III.4.3.1. Résistance à la flexion

Les valeurs moyennes de la résistance à la flexion mesurées à 28 jours pour différentes compositions de béton sont présentées dans le **Tableau III.5** et la **Figure III.3**.

Tableau III.5. Evolution de la résistance à la flexion.

Compositions	Résistance à la flexion (MPa)
C01	6.18
C02	6.51
C03	6.42
C04	6.65
C05	7.12
C06	6.54
C07	6.55
C08	6.69
C09	6.61
C10	6.50
C11	6.52
C12	6.64
C13	6.68
C14	6.60
C15	6.46

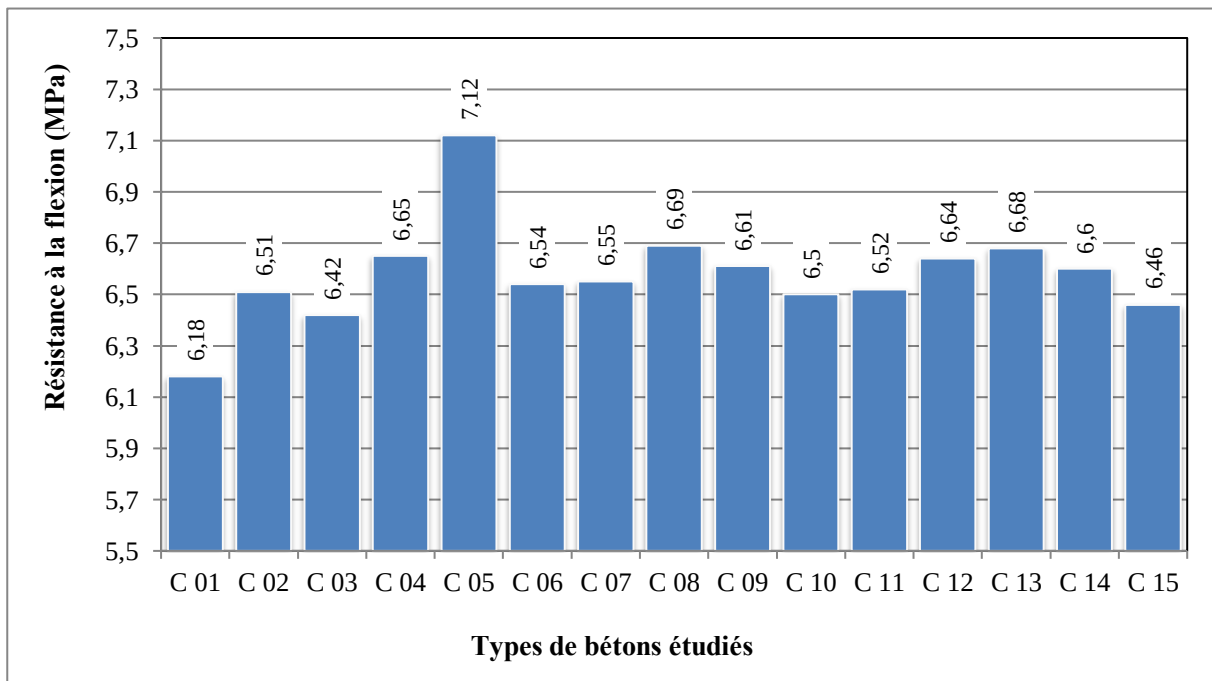


Figure III.3. Evolution de la résistance à la flexion.

À partir des résultats obtenus, on constate que l'ajout de poudre de verre (PV) et de craie (PC) dans le béton de sable a amélioré la résistance à la flexion par rapport au béton de référence (C01). Cette amélioration est visible jusqu'à un taux de substitution de 10 % (cas de C05), qui présente une valeur maximale de 7,12 MPa. Le taux d'augmentation enregistré par rapport au béton témoin est d'environ 15 %. Ce résultat peut être expliqué par une synergie mécanique entre les constituants du béton : le ciment assure la cohésion structurale via les liaisons hydrauliques des hydrates (C-S-H), le verre augmente la rigidité du composite grâce à sa réactivité pouzzolanique (réaction avec la portlandite), tandis que la craie optimise la microstructure par son effet de remplissage actif, limitant les microfissurations internes, ce qui conduit à une homogénéisation de la matrice cimentaire et améliore la résistance en flexion.

Par ailleurs, l'ajout séparé de poudre de verre ou de craie donne un résultat inférieur à leur combinaison dans tous les cas, avec des résultats légèrement meilleurs pour la poudre de verre comparée à la craie :

- Cas de substitution du ciment (5%) : le béton de sable contenant 5% de PV (C02) a donné un taux d'augmentation de 1.38% par rapport au béton contenant 5% de PC (C03).
- Cas de substitution du ciment (10%) : le béton de sable contenant 10% de PV (C04) a donné un taux d'augmentation de 1.65% par rapport au béton contenant 10% de PC (C06), et le mélange entre les deux poudres ; 5% de PV et 5% de PC a donné le meilleur résultat, comme indiqué précédemment (cas de C05).
- Cas de substitution du ciment (15%) : le béton de sable contenant 15% de PV (C07) a donné un taux d'augmentation de 0.76% par rapport au béton contenant 15% de PC (C10), et le mélange entre les deux poudres ; (10% de PV et 5% de PC cas de C08) ou (5% de PV et 10% de PC cas de C09) ont donné des résultats légèrement meilleurs.
- Cas de substitution du ciment (20%) : le béton de sable contenant 20% de PV (C11) a donné un taux d'augmentation de 0.92% par rapport au béton contenant 20% de PC (C15), et le mélange entre les deux poudres (C12, C13 et C14) ont donné des résultats légèrement meilleurs.

III.4.3.2. 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 le **Tableau III.6** et la **Figure III.4**.

Tableau III.6. Evolution de la résistance à la compression.

Compositions	Résistance à la compression (MPa)
C01	12.77
C02	13.64
C03	13.40
C04	14.02
C05	15.27
C06	13.73
C07	13.75
C08	14.12
C09	13.92
C10	13.63
C11	13.67
C12	14.00
C13	14.09
C14	13.88
C15	13.51

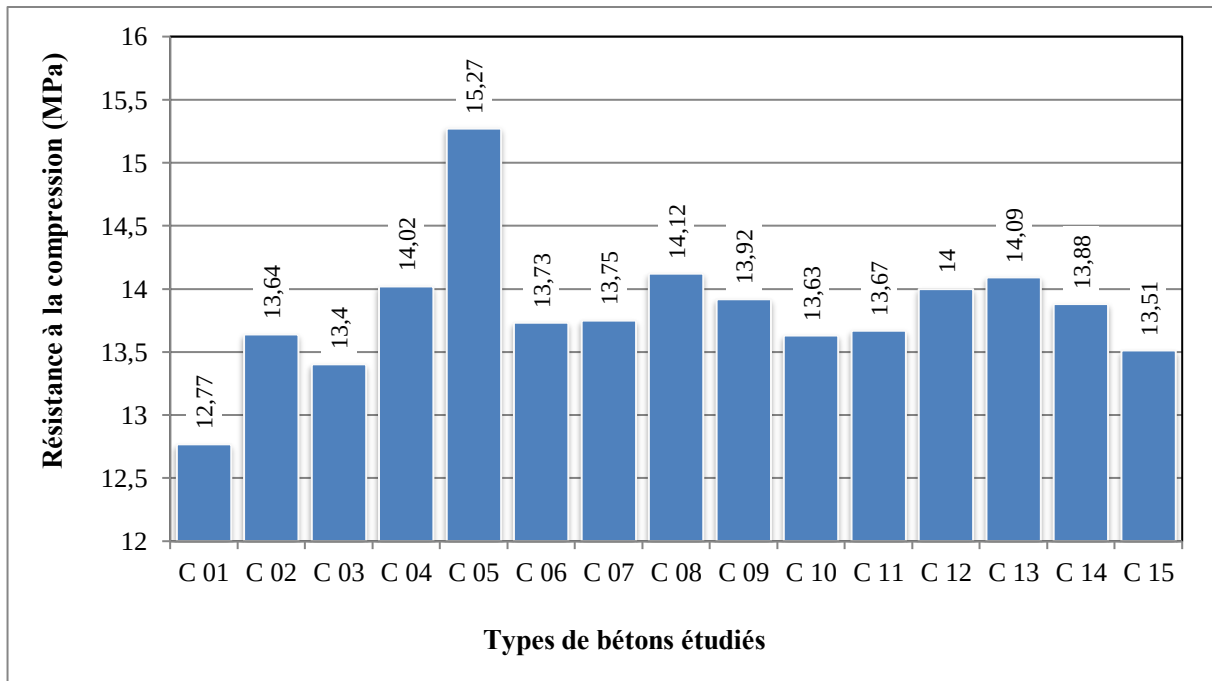


Figure III.4. Evolution de la résistance à la compression.

Les résultats de résistance à la compression ont montré une variation significative entre les mélanges étudiés, le béton de référence C01, présente la performance la plus faible avec une valeur de 12,77 MPa par rapport aux autres compositions. Cette diminution de la résistance indique que le recours total au ciment ne garantit pas nécessairement les meilleures propriétés mécaniques.

Il apparaît clairement que le béton avec de 5% de PV et de 5% de PC (cas de C05) est meilleur comparé aux autres bétons étudiés, où on a enregistré la valeur maximale de la résistance à la compression soit 15.27 MPa. Cette augmentation s'explique par les rôles complémentaires des trois matériaux : le ciment assure la liaison de base, le verre contribue à la rigidité grâce à ses interactions pouzzolaniques ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{verre} \rightarrow \text{phases liantes}$), et la craie contribue à améliorer la structure matricielle, ce qui entraîne une porosité réduite et une résistance à la compression accrue.

Par contre, les analyses comparatives des formulations révèlent que l'intégration en mode mono-ajout (poudre de verre ou craie) présente un résultat légèrement faible de résistance à la compression par rapport à leur combinaison binaire (verre et craie).

II.4.4. Analyse de la microstructure

III.4.4.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

Afin de comprendre les composants chimiques du béton de sable et l'impact de poudre de verre et poudre de craie, nous avons sélectionné quatre formulations :

- C01 : Béton de sable sans ajouts minéraux (**Figures III.5.**) ;
- C11 : Béton de sable avec poudre de verre (**Figures III.6.**) ;
- C13 : Béton de sable avec des ajouts minéraux (**Figures III.7.**) ;
- C15 : Béton de sable avec poudre de craie (**Figures III.8.**).

Rappel que l'analyse par diffraction des rayons X a été réalisée sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm .

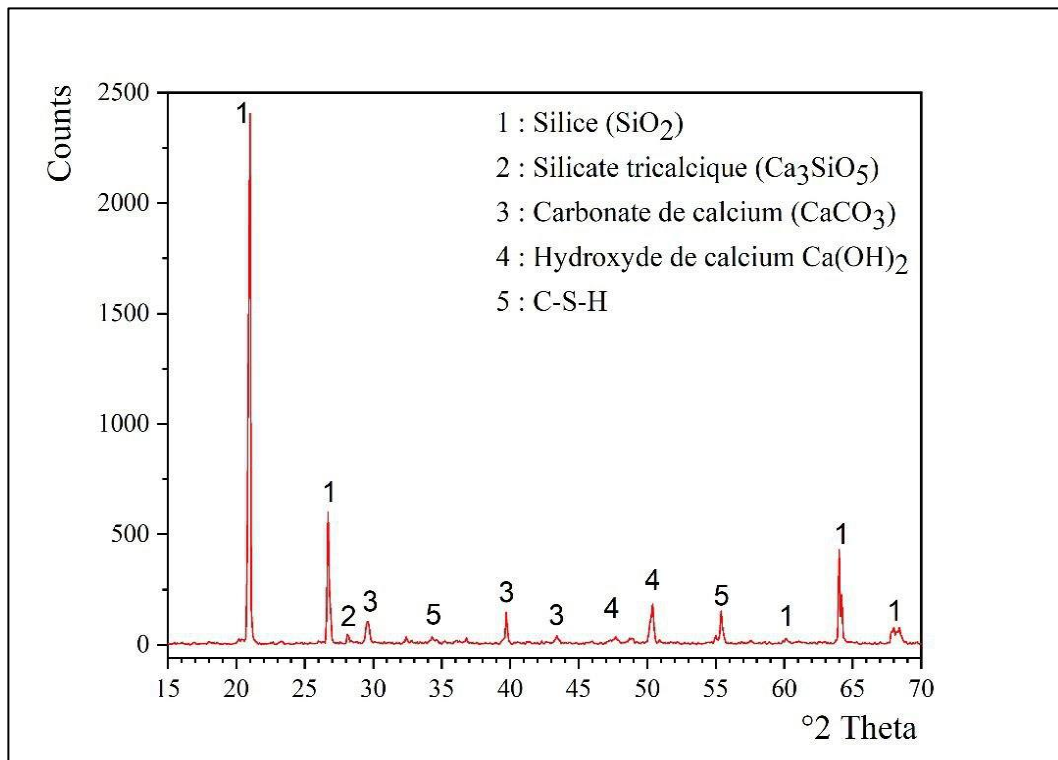


Figure III.5. Diffractogramme du béton de sable sans ajouts minéraux (C01).

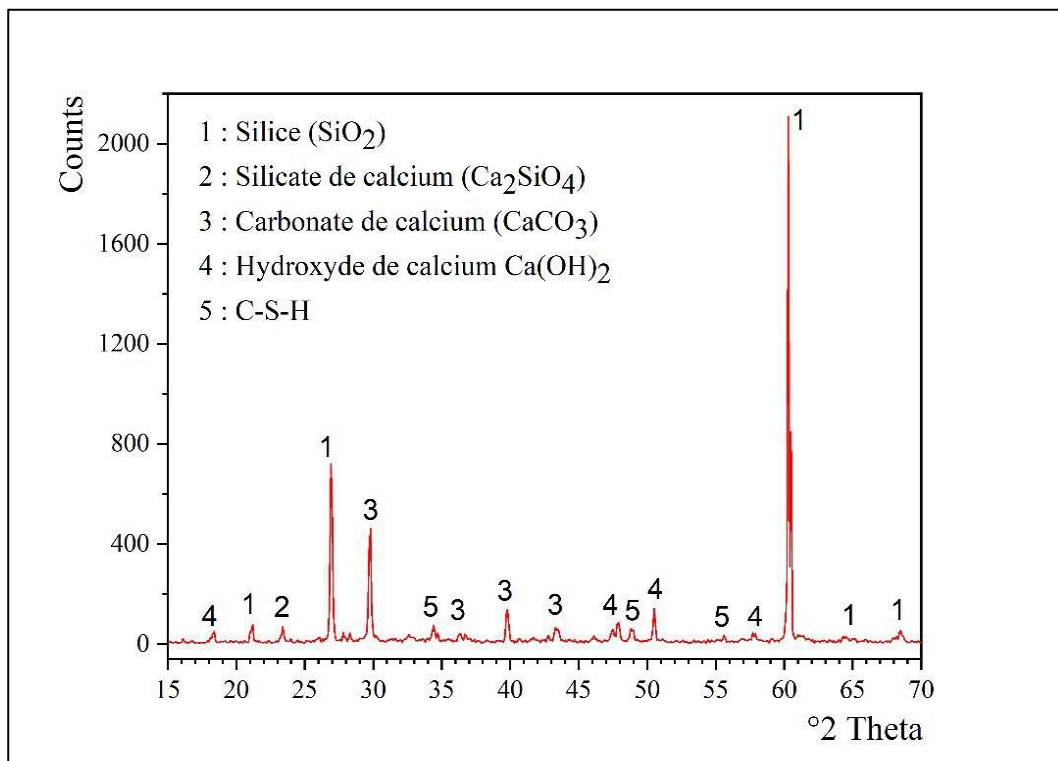


Figure III.6. Diffractogramme du béton de sable avec poudre de verre (C11).

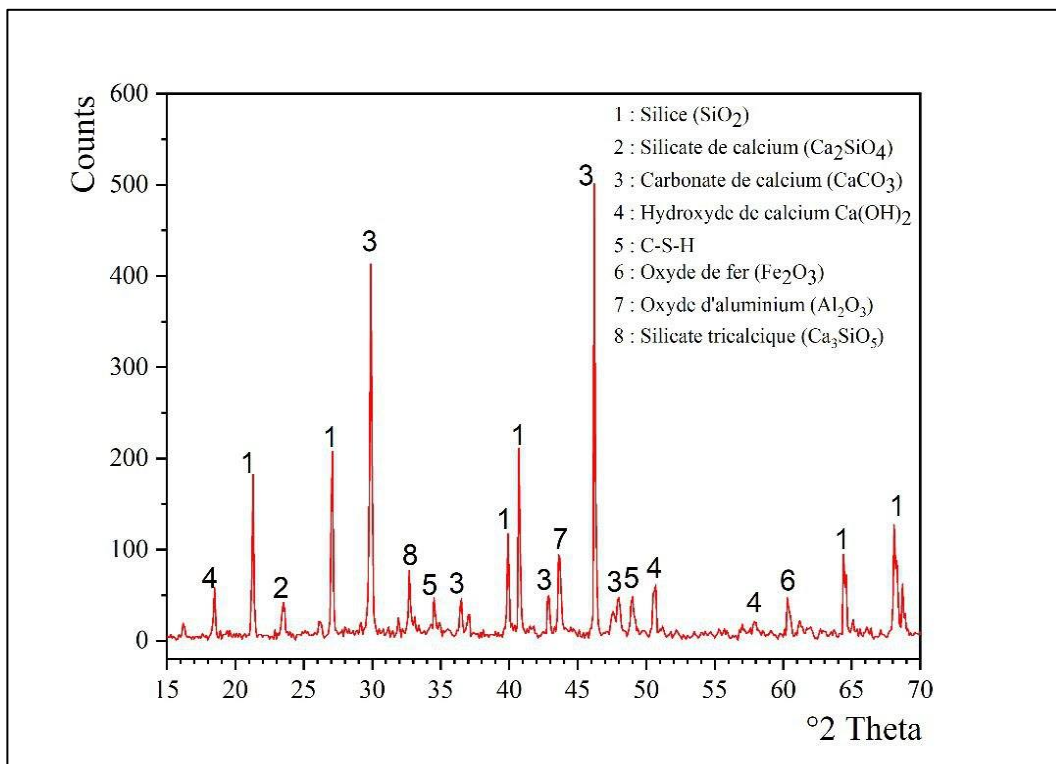


Figure III.7. Diffractogramme du béton de sable avec des ajouts minéraux (C13).

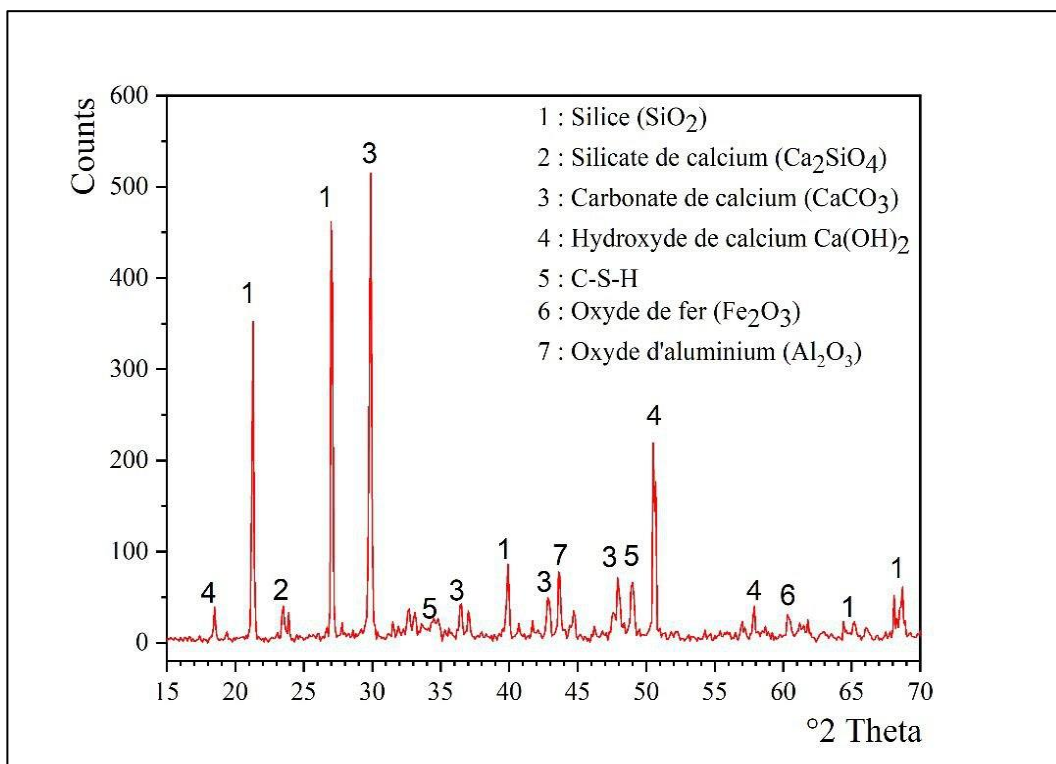
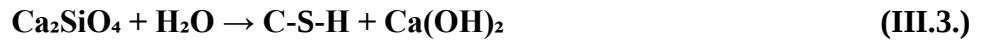


Figure III.8. Diffractogramme du béton de sable avec poudre de craie (C15).

D'après les figures, les résultats obtenus peuvent s'expliquer par les points suivants :

- L'augmentation de l'intensité des pics de dioxyde de silicium (SiO_2) : ceci pourrait s'expliquer par la présence de sable (pour tous les cas) et la poudre de verre (cas de C011 et C13) qui est riche en silice.
- Il existe également des pics de silicate de calcium (Ca_2SiO_4) (pour C11, C13 et C15), qui entrent dans des réactions d'hydratation pour former de silicate de calcium hydraté (C-S-H ; les pics de C-S-H indiquent qu'il est déjà formé, qui est le principal composé responsable du développement de la résistance de la pâte) et de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), selon l'équation :



- De plus, la présence de l'intensité des pics de carbonate de calcium (CaCO_3), ceci pourrait s'expliquer par la réaction chimique d'oxyde de calcium (CaO) en avec de dioxyde de carbone (CO_2), par l'équation suivante :



Puisque le carbonate de calcium (CaCO_3) soit abondant dans la poudre de craie, c'est pour ça l'intensité des pics est augmentée dans le cas C13 et C15.

- Enfin, la présence de l'intensité des pics d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) dans le cas de C13 et C15, car ces oxydes se trouvent dans la poudre de craie utilisée.

III.4.4.2. Analyse par microscopie électronique à balayage (MEB)

Les analyses par microscopie électronique à balayage (MEB), menées sur les échantillons étudiés (sans et avec poudre de verre ou de craie), sont présentées dans les **Figures III.9., et III.10.**

D'après les figures, on remarque que la matrice du béton témoin (C01) montre une microstructure légèrement poreuse par rapport au béton contenant de PV et PC, avec quelques des vides intergranulaires. Par contre, la matrice avec des poudres présente un réseau poreux réduit, un aspect relativement homogène et compact en surface, ce qui conduit d'obtenir de meilleurs résultats en termes des propriétés mécaniques.

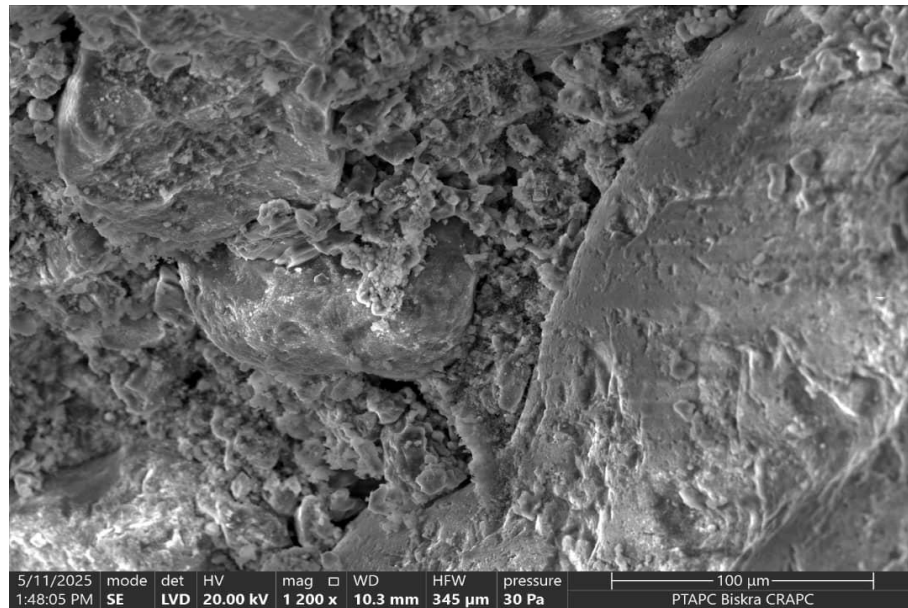


Figure III.9. Analyse au MEB du béton témoin (C01).

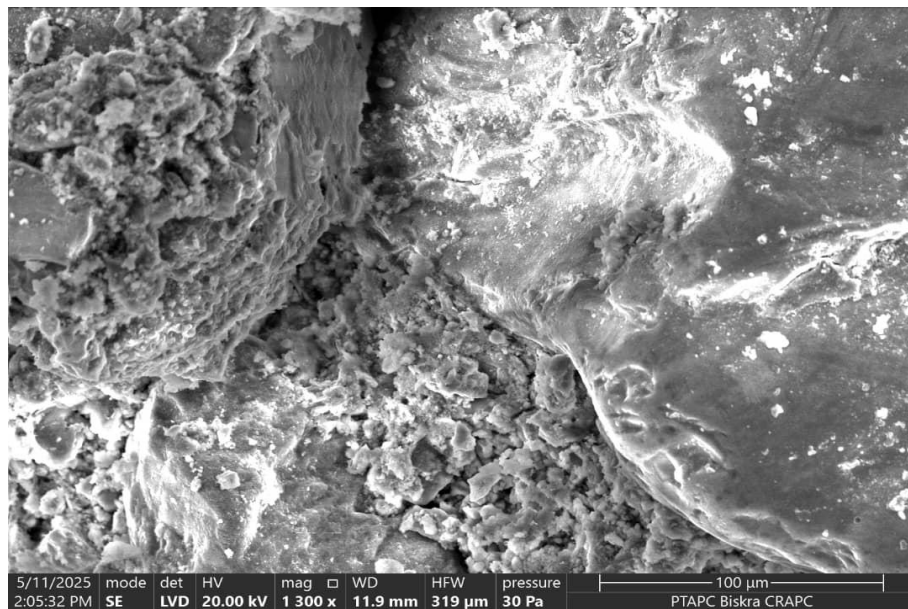


Figure III.10. Analyse au MEB du béton avec PV et PC (C13).

III.5. Conclusion

Le travail réalisé dans ce chapitre vise à évaluer l'effet des poudres (PV et PC) sur le comportement mécanique du béton de sable. A travers des résultats obtenus, on peut dire que la composition qui est donné un meilleur résultat est le béton de sable contient d'un 10% (5% de PV et 5% de PC) de substitution partielle du ciment (C05).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été menée pour valoriser les matériaux locaux et réutiliser divers déchets, notamment industriels. L'objectif de cette recherche est d'étudier l'effet de la poudre de verre et de craie sur les propriétés mécaniques du béton de sable. Les matériaux étudiés sont des matériaux locaux (sable de dune, sable alluvionnaire), des déchets industriels (le filler calcaire, la poudre de verre et la poudre de craie) et le ciment.

L'étude a été réalisée en trois chapitres, le premier chapitre est une étude bibliographique, le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés et les tests nécessaires et à la fin une analyse et discussion des résultats obtenus.

L'étude bibliographique a montré que le béton de sable est utilisé dans de nombreux domaines de la construction en raison du coût élevé des matériaux traditionnels, de la rareté de certains d'entre eux et de la facilité d'utilisation du béton de sable. Le recyclage des déchets et la valorisation des matériaux locaux contribuent de manière significative à résoudre les problèmes économiques et techniques et à protéger l'environnement, tandis que l'incorporation de poudre de craie et de verre dans le béton améliore certaines propriétés et assure la préservation des matières premières et évite la pollution.

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans notre formulation de béton de sable montrent que ces matériaux répondent aux exigences d'utilisation dans la recherche de propriétés mécaniques acceptables du béton de sable. À la fin du deuxième chapitre, une série de tests expérimentaux ont été réalisés sur du béton de sable à l'état frais et à l'état durci.

Afin de mener à bien ce travail, différents taux de substitution (poudre de verre et craie) ont été intégrés au béton étudié. Sur la base des résultats expérimentales obtenus, il a été possible de formuler les conclusions suivantes :

Conclusion générale

- L'étude de la maniabilité des bétons étudiés a montré qu'il varie avec une augmentation de taux de poudre de craie et réduit avec une augmentation de taux de poudre de verre, mais la consistance reste toujours dans la classe plastique ;
- L'ajout de poudre de verre et de craie a conduit à une légère diminution de la densité des compositions étudiés. Les compositions C07, C11, C12, C13 et C14 ont trouvés dans la gamme des bétons légers ;
- L'absorption d'eau a augmenté avec l'augmentation de taux de poudre de verre, ce qui indique sa porosité et sa faible densité. Par contre, l'ajout de poudre de craie a donné une faible absorption, ce qui en fait un excellent matériau de remplissage pour combler les vides ;
- En termes des propriétés mécaniques, l'incorporation combinée de poudre de verre et de craie à un taux de 5% chacune (composition C05), ont conduit à une amélioration remarquable des performances du béton de référence ;
- L'analyse au MEB a montré que la surface du béton à base des poudres est homogène et la matrice bien adhéree. Tandis que, le béton de référence représente quelque des microfissures et des petits pores dans la matrice cimentaire.

En général, les résultats démontrent que le type de béton de sable contenant 5% de poudre de verre et 5% de poudre de craie (C05) constitue le meilleur compromis entre les résultats obtenus pour les différentes propriétés étudiés. Les résultats obtenus ouvrent des pistes de recherche innovantes.

Enfin, on propose quelques recommandations permettant d'améliorer davantage les propriétés du béton de sable contenant de poudre de verre et de craie, à savoir :

- L'étude de la durabilité ;
- L'ajout d'autres déchets industriels sous forme de poudre ;
- L'ajout de fibres.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Afnor, (1987)]** AFNOR., (1987). Bétons-Bétons de sable. ProjetP18-500.
- [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.
- [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).
- [Arandigoyen et al., (2007)]** Arandigoyen, M., & Alvarez, J. I. (2007). Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars. *Cement and concrete research*, 37(5), 767-775.
- [Banupriya et al., (2020)]** Banupriya, D., Maheswari, K.U., & Sivakumar, M. (2020). Experimental Investigation on Concrete by Partial Replacement of Cement with Chalk Powder and Fine Aggregate with Quarry Dust. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*, 8(4).
- [Barkat, (2017)]** Barkat, A. (2017). Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).
- [Baron, (1982)]** Baron, J. (1982). LE BETON HYDRAULIQUE-CONNAISSANCE ET PRATIQUE-6EME PARTIE : DURABILITE ; CHAPITRE 28 : LES FISSURATIONS SPONTANÉES ET ACCIDENTELLES DU BETON NON ARME ET ARME.
- [Bederina, (2000)]** Bederina. M., (2000). Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable. Mémoire de magistère. UAT de Laghouat, Algérie.
- [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.
- [Benaïssa et al., (1993)]** Benaïssa, A., Morlier, P., & Viguier, C. (1993). Microstructure du béton de sable. *Cement and concrete research*, 23(3), 663-674.
- [Benaïssa et al., (2008)]** Benaïssa, A., Kamen, A., Chouicha, K., & Malab, S. (2008). Panneau 3D au béton de sable. *Materials and structures*, 41, 1377-1391.

- [Borziak et al., (2018)]** Borziak, O., Chepurna, S., Zidkova, T., Zhyhlo, A., & Ismagilov, A. (2018). Use of a highly dispersed chalk additive for the production of concrete for transport structures. In MATEC Web of Conferences (Vol. 230, p. 03003). EDP Sciences.
- [Boudaoud, (1996)]** Boudaoud, Z. (1996). Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaada. Magister thesis.
- [Bouziani, (2013)]** Bouziani, T. (2013). Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant (Doctoral dissertation, Université de Boumerdès – M'hamed Bougara).
- [Chauveau et al., (2012)]** Chauveau, J. C., & Chassaing, J. P. (2012). Introduction à la méthode des plans d'expériences par la méthode Taguchi. CNED Génie Electro-technique, Compléments au cours d'asservissement.
- [Chauvin et al et al., (1988)]** Chauvin, J. J., & Grimaldi, G. (1988). Les bétons de sable. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, (157), 9-15.
- [Cnerib, (1992)]** Cnerib, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment., (1992). Bétons de sable. Rapport de recherches, Tipaza, Algérie.
- [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.
- [Courard, (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).
- [Dreux et al., (1998)]** Dreux, G., & Festa, J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles.
- [Du et al., (2014)]** Du, H., & Tan, K. H. (2014). Waste glass powder as cement replacement in concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 12(11), 468-477.
- [Dupain et al., (2000)]** Dupain, R., Lanchon, R., & Saint-Arroman, J. C. (2000). Granulats, sols, ciments et bétons. Editions Casteilla, 75005, 122-136.
- [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 en rochements par injection de béton de sable. Bulletin de liaison. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, N° 183- NIT 3697, Paris, pp. 91-95.
- [Goupy, (2013)]** Goupy, J. (2013). Introduction aux plans d'expériences : Avec applications. 5ème. Ed. 2013.

- [Idir et al., (2011)]** Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2011). Pozzolan properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 19-29.
- [Islam et al., (2017)]** Islam, G. S., Rahman, M., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37-44.
- [Jain et al., (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.
- [Kumar, (2012)]** Kumar, R. S. (2012). Experimental study on the properties of concrete made with alternate construction materials. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(5), 3006-3012.
- [Languedoc, (2001)]** Languedoc, R. (2001). Guide pratique des déchets. (SiteInternetgoogle.fr).
- [Les experts, (2017)]** Les Experts, D. C. (2009). Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques. Tome, 2, 50-107.
- [Limbachiya et al., (2012)]** Limbachiya, M., Meddah, M. S., & Ouchagour, Y. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and building materials*, 27(1), 439-449.
- [Lothenbach et al., (2008)]** Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 848-860.
- [Maillot, (2001)]** Maillot, R. (2001). Mémento technique des granulats. Presses des MINES.
- [Menadi, (2008)]** Menadi, B. (2008). Performance du mortier et beton a base de fillier calcaire (Doctoral dissertation, Blida).
- [Michel, (1981)]** Michel, M. U. R. A. T. (1981). Valorisation des déchets et sous-produits industriels. Masson, Paris.
- [Neville, (2000)]** Neville, A. M. (2000). Propriétés des bétons. Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris, France.
- [Notice Technique, (2005)]** Superplastifiant MEDAFLOW 30., (2005). Granitex, pp. 93.
- [Oukil et al., (2017)]** Oukil, Y., Oukil, AE. (2017). Formulation et caractérisation d'un béton de sable à partir des déchets minéraux. Mémoire de master. Université de bouira, algérie.
- [Piaton, (2014)]** Piaton, C. (2014). Les phares d'Égypte : laboratoire et conservatoire de l'ingénierie européenne du xixe siècle. *ABE Journal. Architecture beyond Europe*, (5).

- [Sablocrete, (1994)]** Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (1994). Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation. Projet « SABLOCRETE ».
- [Sathiyapriya et al., (2023)]** Sathiyapriya, V., Munieswaran, S., Ganga, M., Kavya, M., & Manikandan, R. (2023). A Comparative Study & Investigation on Replacement of Cement by Chalk Piece Powder. *International Journal of Novel Research and Development*, 8(2), 199-210.
- [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
- [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., (2006)]** Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and concrete research*, 36(3), 457-468.
- [Shekhawat et al., (2014)]** Shekhawat, B. S., & Aggarwal, D. V. (2014). Utilisation of waste glass powder in concrete—A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(7). 14822-14826
- [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.
- [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 et al., (2009)]** Taha, B., & Nounu, G. (2009). Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 21(12), 709-721.
- [Valade, (1987)]** Valade, T. (1987). Comportements de bétons armés de fibres métalliques. Mémoire de fin d'étude, Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [Yahia et al., (2001)]** Yahia, A., & Khayat, K. H. (2001). Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 749-757.
- [Youcef et al., (2017)]** Youcef, N., Guenchouba, D.E. (2017). Étude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers. Mémoire de Master, Université Ziane Achour de Djelfa.
- [Zhu et al., (2005)]** Zhu, W., & Gibbs, J. C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1457-1462.