



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. MAHBOUB Tayeb

2. DIDI Bensalem

Intitulé :

**Etude de l'effet de l'introduction des déchets industriels sur les
propriétés physico-thermiques d'un béton de sable**

Soutenue le : 13/06/2026

Devant le jury composé de :

Monsieur FETHIZA ALI Boubaker	Président	MCB	U. El OUED
Monsieur KHELAIFA Hamad	Examineur	MCB	U. El OUED
Monsieur AMMARI Mohammed Seghir	Encadreur	MCB	U. El OUED

Année académique : 2025/2026

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 de conférences à l'Université d'El-Oued, pour son encadrement précieux, sa disponibilité, ses conseils judicieux, ainsi que pour les efforts considérables qu'il a déployés afin de nous orienter et de nous accompagner tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux membres du jury, Monsieur le Docteur **KHELAIFA Hamad** et Monsieur le Docteur **FETHIZA ALI Boubaker**, Maîtres de conférences à l'Université d'El-Oued, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques et observations constructives.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du Département d'Hydraulique et de Génie Civil de l'Université d'El-Oued, qui ont contribué à notre formation académique et scientifique tout au long de notre cursus universitaire.

Nous remercions également nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur confiance, qui ont constitué une source permanente de motivation.

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

الإهداء

إلى من حمل همومي قبل همومه ... وآثرني على نفسه حتى بلغت ما بلغت

أي الغالي

،إلى من كان دعاؤها سلاحا في كل لحظة عسيرة... إلى ينبوع الحب الذي لا ينضب

أمي الحنون

،إلى من كانوا عوني وسندي في كل يوم... إلى من شاركوني فرحي وصبروا معي في محنتي

إخوتي الأعزاء

،إلى من مدّوا لي يد العون حين احتجتهم... وكانت صداقتهم الحقيقية زاداً لي في هذا المشوار

أصدقائي الوفيون

إلى كل من فتح لي أبواب الميدان وعلمني ما لم تعلّمه الكتب إلى من أسهموا في تكويني العملي وأعانوني

على إتمام... مسيرتي الدراسية

إليكم جميعاً أهدي ثمرة جهدي وخلاصة مسيرتي في الهندسة المدنية

الإهداء

إلى روح من علّمني معنى الصبر والعطاء
إلى من أسكنه الله فسيح جنّاته

أبي الغالي

~ ~ ~

وإلى من أجد في دعائها سكينه القلب وراحته
إلى منبع الحنان والدفء

أمي الحبيبة

~ ~ ~

وإلى من يملؤون حياتي بهجةً وأملًا
إلى نبض قلبي وبسمة أيّامي

زوجتي الوفيّة وابني الحبيب

~ ~ ~

وإلى من شاركوني مسيرة العلم والجهد
إلى الإخوة والرفاق في درب المعرفة

أصدقائي الأوفياء • زملائي الكرام • أساتذتي الأفاضل

~ ~ ~

وإلى كلّ يدٍ تعمل في صمت وإخلاص
إلى الأوفياء الذين لم يدّخروا جهدًا في خدمة العلم

عمّال مخبر الأشغال العمومية

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	03
I.2.3. Constituants du béton de sable	05
I.2.3.1. Sables	05
I.2.3.2. Ciment	05
I.2.3.3. Ajouts minéraux	06
I.2.3.4. Eau de gâchage	06
I.2.3.5. Fines d'ajouts	06
I.2.4.6. Adjuvants	08
I.2.4.7. Autres ajouts	08
I.2.4. Propriétés essentielles du béton de sable	09
I.2.5. Domaines d'utilisation des bétons de sable	13
I.2.6. Formulation d'un béton de sable	15
I.3. Valorisation des déchets dans le domaine de génie civil	24
I.3.1. Définition	24
I.3.2. Méthodes de la valorisation	25
I.3.2.1. Valorisation matière	25
I.3.2.2. Valorisation énergétique	25
I.3.2.3. Valorisation chimique	25
I.3.3. Différents déchets utilisés en génie civil	25

I.3.3.1. Déchets inertes (DI)	25
I.3.3.2. Déchets ménagers et assimilés (DMA)	25
I.3.3.3. Déchets industriels banals (DIB)	26
I.3.3.4. Déchets industriels toxiques	26
I.3.4. Valorisation des déchets de verre	26
I.3.4.1. Définition du verre	26
I.3.4.2. Valorisation des verres dans les bétons	27
I.3.4.3. Propriétés du verre	27
I.3.5. Valorisation des déchets de craie	29
I.3.5.1. Sources de la poudre de craie.....	29
I.3.5.2. Propriétés physiques et chimiques des déchets de craie	29
I.3.5.3. Utilisation des déchets de craie dans le béton	30
I.3.5.4. Effet des déchets de craie sur la Propriétés du béton	30
I.3.6. Évaluation environnementale de l'utilisation des déchets industriels	31
I.3.6.1. Réduction de l'empreinte carbone	31
I.3.6.2. Analyse du cycle de vie (ACV)	31
I.7. Conclusion	32

CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

I.1. Introduction	33
II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés	33
II.2.1. Sable	33
II.2.1.1. Analyse granulométrique	34
II.2.1.2. Caractéristiques physiques	35
II.2.1.3. Caractéristiques chimiques	38
II.2.2. Ciment	39
II.2.3. Filler calcaire	39
II.2.4. Poudre de verre	41
II.2.5. Poudre de craie	42
II.2.6. Eau de gâchage	44
II.2.7. Adjuvant	44

II.3. Techniques expérimentale	44
II.3.1. Malaxage et conservation	44
II.3.2. Caractérisation du béton frais	45
II.3.2.1. Maniabilité	45
II.3.3. Caractérisation du béton durci	46
II.3.3.1. Masse volumique apparente	46
II.3.3.2. Essai d'absorption d'eau par immersion totale	47
II.3.3.3. Caractérisation thermique	48
II.4. Conclusion	50

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Introduction	50
III.2. Compositions des bétons étudiés	50
III.3. Caractérisation du béton frais	53
III.3.1. Etude de la maniabilité	53
III.4. Caractérisation du béton durci	55
III.4.1. Masse volumique	55
III.4.2. Absorption d'eau par immersion totale	57
III.4.3. Caractérisation thermique	58
III.4. Conclusion	60
CONCLUSION GENERAL	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHES	64

RESUMES

RESUME

Cette étude s'inscrit dans une démarche de valorisation des matériaux locaux et de recyclage de déchets minéraux sous forme de poudres fines, notamment la poudre de verre (PV) et la poudre de craie (PC), incorporées dans un béton de sable avec des taux de substitution du ciment variant de 0 à 20 %. L'objectif est d'évaluer l'influence de ces additions sur les propriétés à l'état frais, les caractéristiques du béton durci ainsi que ses performances thermiques. Les résultats montrent que l'ouvrabilité reste globalement stable, avec des valeurs d'affaissement comprises entre 6,5 et 7,6 cm. Une légère diminution est observée pour les formulations riches en poudre de verre en raison de sa finesse élevée, tandis que la poudre de craie améliore légèrement la maniabilité grâce à son effet filler. À l'état durci, la masse volumique diminue progressivement avec l'augmentation du taux de substitution, passant de 2079,8 kg/m³ à environ 1936 kg/m³, en raison de la différence de densité entre les matériaux et de l'augmentation de la porosité. De même, l'absorption d'eau augmente jusqu'à 9,06 %, traduisant une porosité capillaire plus importante, malgré un effet partiel de compaction apporté par la poudre de craie. Sur le plan thermique, la conductivité thermique diminue significativement de 1,695 à 1,209 W/m·K, ce qui améliore les performances isolantes du béton. Globalement, les résultats montrent que l'incorporation de PV et PC modifie la microstructure du béton de sable et que les meilleures performances sont obtenues pour des taux de substitution modérés.

Mots clés : Béton de sable, Matériaux locaux, Déchets industriels, Propriétés physico-thermiques.

المخلص

تندرج هذه الدراسة ضمن إطار تجميع المواد المحلية وإعادة تدوير النفايات المعدنية على شكل مساحيق دقيقة، وخاصة مسحوق الزجاج (PV) ومسحوق الطباشير (PC)، من خلال إدماجها في خرسانة رملية بنسب استبدال للأسمنت تتراوح بين 0 و20%. تهدف الدراسة إلى تقييم تأثير هذه الإضافات على خصائص الخرسانة في الحالة الطرية، والخصائص الفيزيائية للخرسانة المتصلدة، إضافة إلى أدائها الحراري. أظهرت النتائج أن قابلية التشغيل تبقى مستقرة بشكل عام، حيث تراوحت قيم الهطول بين 6.5 و7.6 سم. وسجل انخفاض طفيف عند زيادة مسحوق الزجاج بسبب نعومته العالية، في حين ساهم مسحوق الطباشير في تحسين قابلية التشغيل بفضل تأثيره المائي. في الحالة المتصلدة، انخفضت الكثافة الحجمية تدريجيًا مع زيادة نسبة الاستبدال من 2079.8 إلى حوالي 1936 كغ/م³، ويرجع ذلك إلى انخفاض كثافة المواد المستبدلة وزيادة المسامية الداخلية. كما ارتفع امتصاص الماء إلى 9.06%، مما يدل على زيادة المسامية الشعرية، رغم التأثير الجزئي الإيجابي لمسحوق الطباشير. من الناحية الحرارية، انخفضت الناقلية الحرارية بشكل ملحوظ من 1.695 إلى 1.209 واط/م.ك، مما يحسن من خصائص العزل الحراري. بشكل عام، تبين أن إدماج مسحوق الزجاج ومسحوق الطباشير يؤدي إلى تعديل البنية المجهرية للخرسانة، وأن أفضل أداء يتحقق عند نسب استبدال متوسطة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الرملية، مواد محلية، نفايات صناعية، خصائص فيزيو- حرارية.

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 $80\mu\text{m}$, 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.
H ₁	: Hauteur de sable propre +éléments fins.
H ₂	: 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.
PV	: Poudre de verre.
PC	: Poudre de craie.
λ	: Conductivité thermique.

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)	04
Figure I.3.	Pont de Brooklyn 1871-72 (New York)	09
Figure I.4.	Proportion du gravillon dans le béton	10
Figure I.5.	Panneau 3D en béton de sable projeté	11
Figure I.6.	Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines	11
Figure I.7.	Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable	11
Figure I.8.	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e +v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée	12
Figure I.9.	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)	14
Figure I.10.	Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines	17
Figure I.11.	Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable	18
Figure I.12.	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée	19
Figure I.13.	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)	21
Figure I.14.	Représentation schématique plane d'un réseau vitreux	27

Chapitre II : Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Figure II.1.	Sables utilisés	34
Figure II.2.	Courbe granulométrique des sables utilisés	35
Figure II.3.	Analyse chimique par DRX du sable de dune	38
Figure II.4.	Analyse chimique par DRX du sable alluvionnaire	38
Figure II.5.	Ciment utilisé	39
Figure II.6.	Filler calcaire utilisé	40

Figure II.7.	Analyse chimique par DRX de filler calcaire utilisé	40
Figure II.8.	Poudre de verre utilisée	41
Figure II.9.	Poudre de craie utilisée	43
Figure II.10.	Analyse par diffraction des rayons X de la Poudre de craie	43
Figure II.11.	Dispositif de mesure d'affaissement	46
Figure II.12.	Essai d'absorption d'eau par immersion totale	48
Figure II.13.	Dispositif de mesure de la conductivité thermique « CT METRE »	49

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III.1.	Représentation triangulaire de 15 combinaisons étudiés	51
Figure III.2.	Masse volumique des différents bétons étudiés	55

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Tableau I.1.	Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment	07
---------------------	--	----

Chapitre II : Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

Tableau II.1.	Caractéristiques physiques du sable utilisé (SAD)	37
Tableau II.2.	Analyse chimique du ciment utilisé	39
Tableau II.3.	Analyse chimique de la poudre de verre	42
Tableau II.4.	Caractéristiques du super plastifiant utilisé	44
Tableau II.5.	Classes de consistance du béton	46

Chapitre III : Résultats et Discussions

Tableau III.1.	Les 15 essais donnés par la méthode des plans d'expériences	52
Tableau III.2.	Compositions des bétons étudiés	53
Tableau III.3.	Maniabilité des compositions étudiées	54
Tableau III.4.	Absorption d'eau par immersion des bétons étudiés	57
Tableau III.5.	Propriétés thermiques des bétons étudiés.	59

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte mondial marqué par une industrialisation croissante et une prise de conscience environnementale de plus en plus affirmée, la gestion des déchets industriels constitue l'un des défis majeurs auxquels font face les sociétés contemporaines. Ces sous-produits s'accumulent en quantités considérables et posent de sérieux problèmes d'ordre écologique et sanitaire. Parallèlement, le secteur de la construction représente l'un des plus grands consommateurs de matières premières naturelles à l'échelle mondiale. Le béton conventionnel nécessite des quantités importantes de ressources, notamment des gros granulats (graviers), dont la production et le transport engendrent une empreinte carbone significative, due en grande partie à la production du ciment Portland.

En Algérie, et particulièrement dans les régions du Sud (zones sahariennes et semi-arides), le secteur du génie civil fait face à une problématique spécifique : la rareté, voire l'absence totale, de gisements de gros granulats naturels. Le transport de ces matériaux depuis le Nord du pays augmente considérablement les coûts économiques et environnementaux des projets d'infrastructure. En revanche, le Sud algérien regorge de gisements gigantesques et inépuisables de sable, qu'il soit de dune, alluvionnaire ou de concassage. Face à cette situation, la formulation de nouveaux matériaux de construction locaux, tels que le béton de sable, s'impose comme une alternative écologique, économique et durable. Ce matériau, composé essentiellement de sable comme granulat unique, présente une matrice fine, homogène et particulièrement adaptée aux exigences constructives locales [Cnerib, (1992)].

Pour s'inscrire davantage dans une démarche de développement durable, la recherche scientifique s'oriente vers la valorisation des déchets industriels en tant qu'additions minérales ou substituts partiels au ciment. Parmi ces déchets, la poudre de verre (issue du recyclage) et la poudre de craie apparaissent comme des solutions très prometteuses. L'incorporation de ces fines minérales dans la matrice cimentaire du béton de sable permet non seulement de réduire la consommation de ciment (et donc les émissions de CO₂), mais aussi de modifier la microstructure du matériau, influençant ainsi ses performances globales.

Cependant, l'acceptation et l'utilisation du béton de sable dans les régions sahariennes, caractérisées par un climat aride et des amplitudes thermiques extrêmes, dépendent impérativement de la compréhension de ses propriétés physico-thermiques. La connaissance fine de paramètres tels que la conductivité thermique, la masse volumique et la porosité est capitale. Elle permet de concevoir des bâtiments à haute performance énergétique, capables d'offrir un confort thermique optimal tout en réduisant la dépendance vis-à-vis de la climatisation artificielle.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail de recherche, intitulé : « Étude de l'effet de l'introduction de déchets industriels sur les propriétés physico-thermiques d'un béton de sable ». L'objectif principal est d'évaluer expérimentalement l'influence d'une substitution partielle du ciment par de la poudre de verre (PV) et de la poudre de craie (PC) sur le comportement physique et thermique du béton élaboré. Afin d'optimiser le programme expérimental et de minimiser le nombre d'essais tout en garantissant une grande précision scientifique, l'approche de la méthode des plans d'expériences a été adoptée.

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- Le Chapitre I est dédié à une synthèse bibliographique approfondie. Il expose les généralités sur le béton de sable, ses constituants, ainsi qu'un état de l'art sur l'utilisation de la poudre de verre et des additions minérales dans les composites cimentaires.
- Le Chapitre II présente la caractérisation physique et chimique des matériaux de base utilisés (sable de dune, sable de concassage, ciment, poudres de verre et de craie) ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée. Les protocoles des essais physiques et thermiques y sont détaillés, notamment l'utilisation du dispositif CT-Mètre pour la mesure de la conductivité thermique.
- Le Chapitre III est consacré à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux. Il met en évidence les corrélations entre les taux de substitution, l'évolution de la porosité de la matrice et l'amélioration des propriétés isolantes du béton de sable obtenu.

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

CHAPITRE I :

Recherche Bibliographique

CHAPITRE I :

Recherche Bibliographique

I.1. Introduction

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

I.2. Béton de sable

I.2.1. Introduction

Comme tous les pays en voie de développement, l'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, et notamment le sud Algérien, dispose de grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturels et artificiels. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire [Cnerib, (1992)].

Les bétons de sable sont composés essentiellement de mélange en proportions convenables de sable (un ou plusieurs), de fines d'ajout, de ciment et d'eau. D'autres additions peuvent être incorporées : adjuvants, laitier concassé, poudre de verre, etc. [Sablocrete, (1994) ; Achoura, (2005)].

I.2.2. Aperçu historique

Le béton de sable trouve ses origines dans l'antiquité, car il y a plus de deux milles ans les romains constataient que s'ils mélangeaient du sable d'origine volcanique à la chaux vive ils obtenaient des matériaux très résistant et l'utilisèrent pour la construction de grands monuments tels que le Panthéon et le colisée de Rome (**Figure I.1.**), monuments qui sont témoins de la résistance et la durabilité des matériaux composites de l'histoire des techniques industrielles.

Mais l'utilisation du béton de sable proprement dit et à grande échelle, a commencé en France à la deuxième moitié du 19ème siècle ; suite aux travaux effectués par F. Coignet qui a procédé au mélange sans caillou de sable et peu d'eau, de cendres, de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée et de la chaux hydraulique afin de réaliser plusieurs ouvrages. Ceux-ci constituent les premières applications de cette technique dont certains sont encore en service [Sablocrete, (1994)].



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

En Egypte, le phare de Port-Saïd (h=52m), fut aussi construit, en 1869, en béton de sable de plage et chaux (**Figure I.2.**). Un pont à Brooklyn, a également été édifié en 1871-1872.



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

En 1918, en Union soviétique, une expérience très originale fut faite par Nicolas de Rochefort, à Saint Petersburg. Elle consistait à broyer ensemble sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en (1/3 de ciment pour 2/3 de sable). Le professeur **REHBINDER**, soviétique eut repris cette expérience comme base de ses propres recherches sur le béton de sable et le mystérieux mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker.

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

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

Dans les dernières décennies, et vu notamment l'insuffisance de connaissances dans son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau [**Bederina, (2007)**].

I.2.3. Constituants du béton de sable

I.2.3.1. Sable

Le sable est le composant principal et la base technique du béton de sable. Dans ce type de béton, on utilise du sable de taille granulométrique comprise entre 0 et 4 mm (selon le système français) ou entre 0 et 5 mm (selon la norme européenne EN 12620). La distribution des granules (granulométrie) influence fortement la compactibilité, la perméabilité et la résistance à la compression. Les sables utilisés sont classés en trois catégories principales : le sable naturel (fluvial, marin et désertique), le sable concassé (issu du broyage de roches) et le sable recycle.

I.2.3.2. Ciment

On utilise généralement le ciment Portland ordinaire CEM I 42.5 ou CEM II 42.5 selon la norme européenne EN 197-1. La proportion de ciment dans le béton de sable varie entre 300 et

500 kg/m³, ce qui est relativement plus élevé par rapport au béton traditionnel, pour compenser l'absence de granulats grossiers et obtenir une cohésion suffisante de la pâte.

I.2.3.3. Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux courants dans le béton de sable comprennent : la fumée de silice, les cendres volantes, les granules de laitier broyé, la poudre de verre et la poudre de craie ou calcaire. Ces matériaux sont ajoutés en proportions variant entre 5 % et 30 % du poids du ciment pour améliorer la densité, la résistance et les propriétés rhéologiques de la pâte.

I.2.3.4. Eau de gâchage

Elle est conforme à la norme NF P18-303, la proportion élevée d'éléments fins nécessite un volume de mouillage plus important, élevant le rapport E/C au-dessus de celui des bétons ordinaires ; on utilise la valeur E/C la plus faible possible en augmentant la compacité et en utilisant des plastifiants (adjuvants réducteurs d'eau). L'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables [Sablocrete, (1994)].

I.2.3.5. 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 :

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

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.2.3.6. Adjuvants

Les adjuvants employés devront être conformes aux normes NF P18-340. Généralement on utilise des plastifiants ou super plastifiants dont l'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable en réduisant la quantité d'eau ce qui augmente les caractéristiques du béton. Ils ont un rôle essentiel dans la technique des bétons de sable. Ils défoulent les éléments fins et permettent de limiter le dosage en eau [Sablocrete, (1994)].

I.2.3.7. Autres ajouts

➤ Fibres

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout [Swamy et al., (1984) ; Valade, (1987) ; Elhachem, (1990)].

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

➤ Gravillons

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

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

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

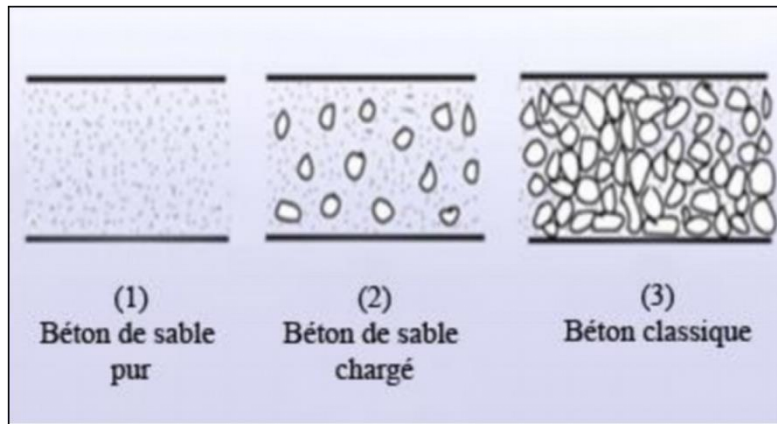


Figure I.3. Proportion du gravillon dans le béton.

➤ Colorants

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants utilisés dans le béton classique peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps ; pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas [Sablocrete, (1994)].

I.2.4. Propriétés essentielles du béton de sable

I.2.4.1. Compacité

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

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

I.2.4.2. Effet de l'addition des fines

En fonction de la finesse, du dosage en fines et du dosage en ciment, on a pu remarquer qu'il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer (Figure I.4.)

[Chauvillard et al., (1996)].

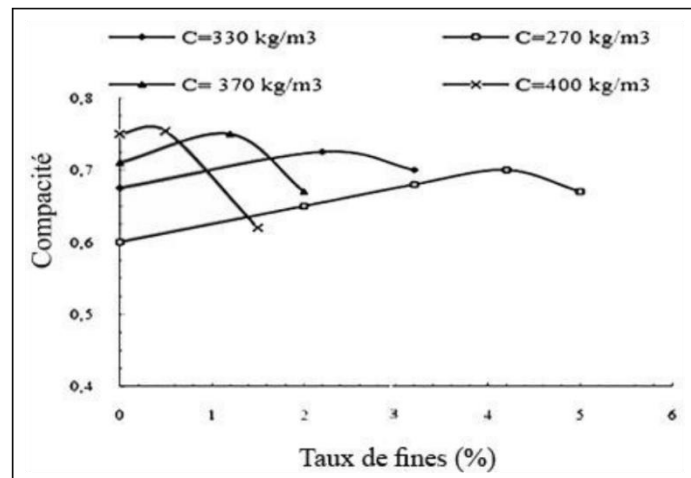


Figure I.4. Effet des dosages fines sur la compacité du béton de sable [Chauvillard et al., (1996)].

I.2.4.3. Maniabilité

La maniabilité est l'une des caractéristiques de grande importance, elle dépend essentiellement de la qualité et de la quantité d'eau utilisée. La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange ; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la **Figure I.5.**, qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité [Benaissa, (1992)].

La **Figure I.6.**, montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport E/C augmente. Cependant, pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend de la nature des fines d'ajout. La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribue au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation. En suivant les règles de formulation, basée sur une optimisation complète de la compacité, les bétons de sable doivent présenter une bonne ouvrabilité, de l'ordre de 11 à 40 secondes au Maniabilimètre LCL à mortier [Laquerbe et al., (1999)].

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

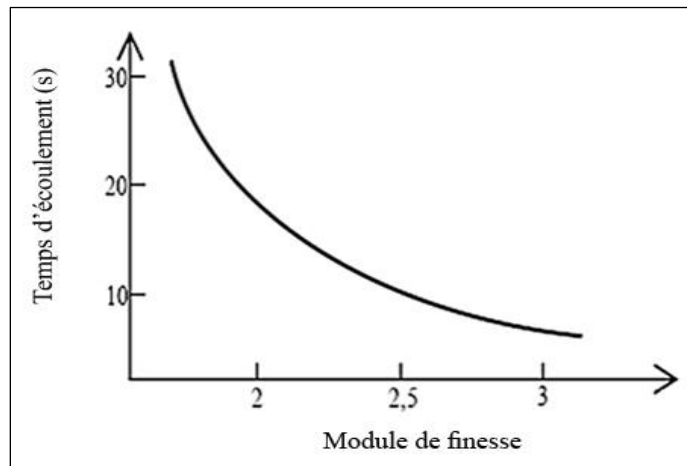


Figure I.5. Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [Benaissa, (1992)].

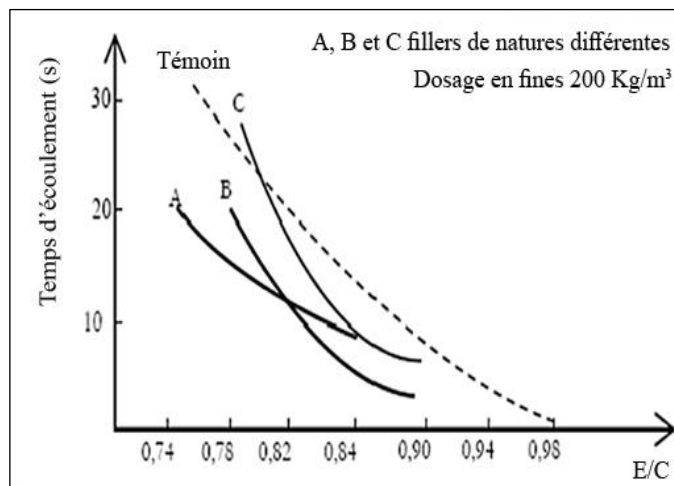


Figure I.6. Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C) [Laquerbe et al., (1999)].

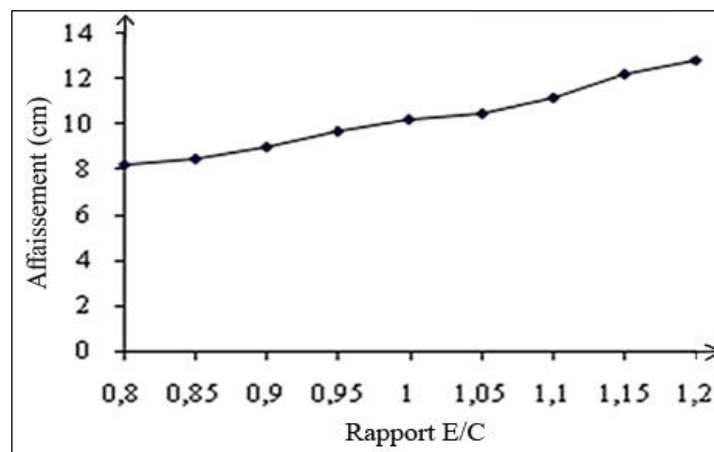


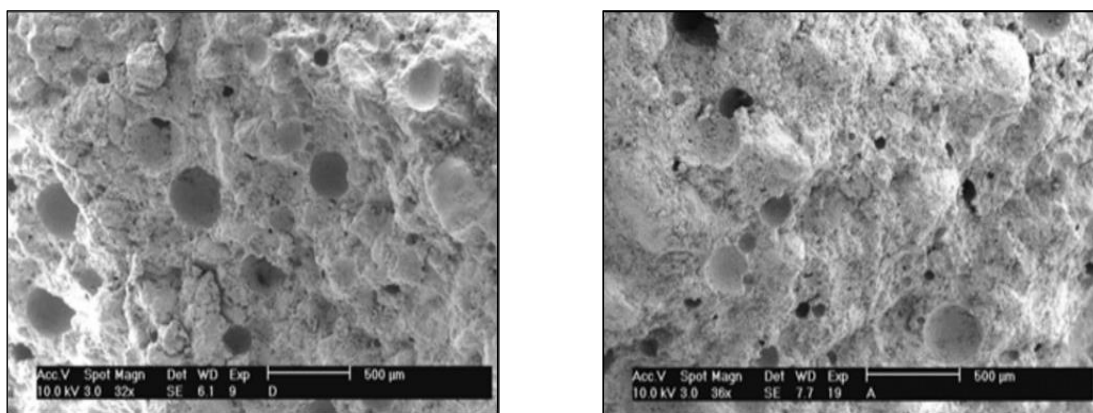
Figure I.7. Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire [Chauvillard et al., (1996)].

I.2.4.4. Comportements mécaniques

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

I.2.4.5. Durabilité

Les paramètres tels que porosité, répartition géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels. Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. La **Figure I.8.**, présente l'aspect général de deux types du béton de sable (alluvionnaire et dunaire) réalisé par MEB [Bederina, (2007)]. Cette distribution poreuse particulière contribue pour durabilités [Laquerbe et al., (1999)].



a. Béton de sable dunaire ; G = 32.

b. Béton de sable alluvionnaire ; G = 36.

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

La durée de vie d'un ouvrage en béton est très souvent liée à la capacité du béton à empêcher les agents agressifs de pénétrer dans sa porosité. On peut distinguer différentes agressions physico-chimiques, mécaniques et thermiques. La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes

d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (perméabilité à l'air et à l'eau, pénétration des ions de chlorure, perméabilité au gaz, gel-dégel, mouillage-séchage, carbonatation, porosité, retrait, etc.). Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques exogènes ou internes, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.

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

Les applications qui ont concerné des domaines aussi larges que le bâtiment et le génie civil ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation du béton de sable, tant techniquement qu'économiquement [Gluais et al., (1993)]. Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable [Sablocrete, (1994)].

I.2.5.1. 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.2.5.2. 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.2.5.3. Autres applications

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

I.2.5.3.1. 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.2.5.3.2. Béton de sable projeté

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

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



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

I.2.5.3.3. Bétons de sable fluides

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

I.2.6. Formulation d'un béton de sable

I.2.6.1. Définition

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants, afin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques. Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème. Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique.

A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre expérimentale, en se basant sur les deux critères principaux des bétons structuraux :

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

I.2.6.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci. Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange, il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire ($d/D_{\max}$) [Sablocrete, (1994)].

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

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

Où :

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V₀ : Constante expérimentale comprise entre 0.7 et 0.8 ;

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

D_{max} : Dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

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

I.2.6.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable

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

1-Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 μm 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 :

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

Où :

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

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

La constante expérimentale (V_0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.8; 0.7). Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80 μm , et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires. En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (<80 μm) et le volume des vides associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

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

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

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente (**Figure I.10.**)

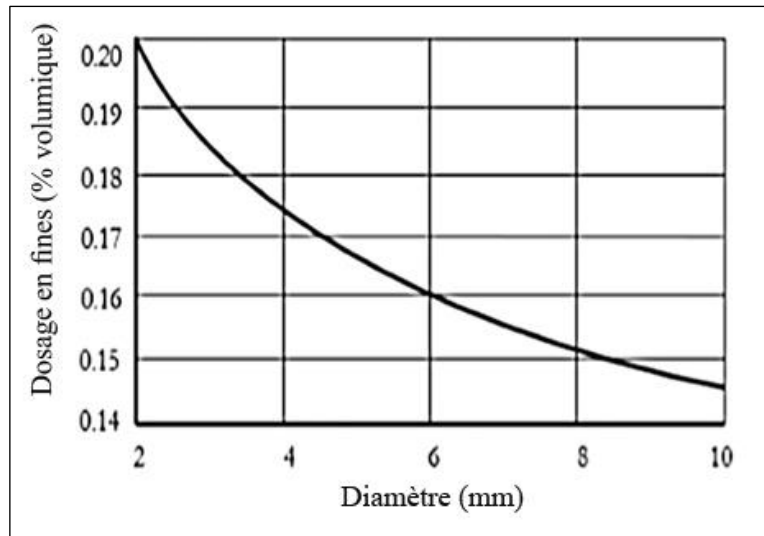


Figure I.10. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.

I.2.6.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable

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

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

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

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

Où :

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

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

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

La dimension des floccs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale (**Figure I.11.**) [Sablocrete, (1994) ; Ghrieb, (2003)].

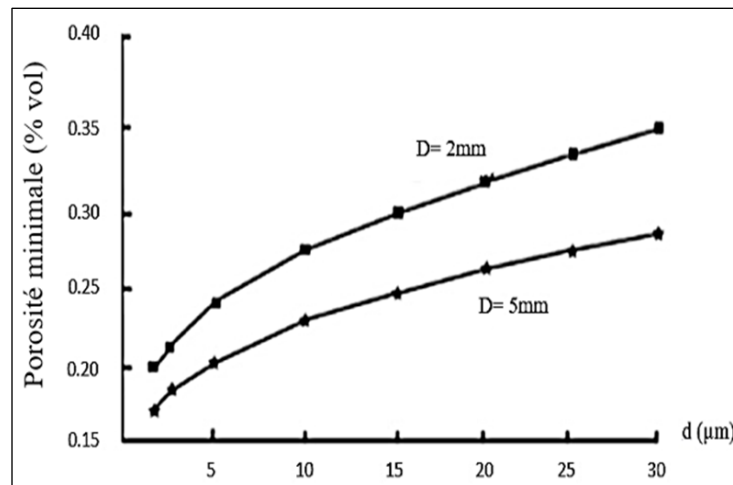


Figure I.11. Influence de la dimension sur la porosité minimale du béton pour deux tailles d'usable.

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v). En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité (**Figure I.12.**), nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

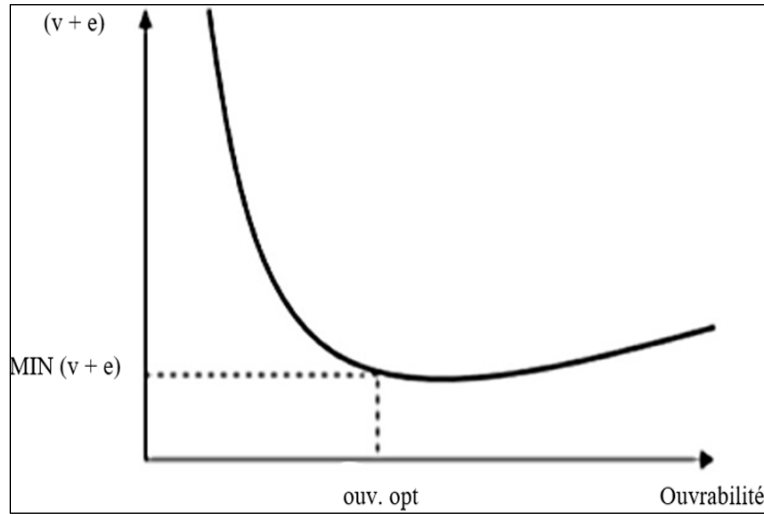


Figure I.12. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage $(e + v)$ d'une matrice pour une mise en oeuvre donnée.

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

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

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

Avec :

K : Constante comprise entre 0.2 et 0.25.

I.2.6.2.3. Dosage en sable

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

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

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

I.2.6.2.4. Estimation de la résistance en compression

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

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET a été proposée récemment [Dreux et al., (1998)].

$$R_b = \frac{R_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+k_1+k_2)}\right)^2} \quad (I.9)$$

Avec :

R_f : Coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

R_c : Classe vraie du ciment (MPa) ;

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

V : Air piégé (l/m^3) ;

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

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

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

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

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

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

K_1 : Coefficient pouzzolanique ;

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

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

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

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées. Telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente, alors que d'autres paramètres pourraient influencer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques [Dreux et al., (1998)].

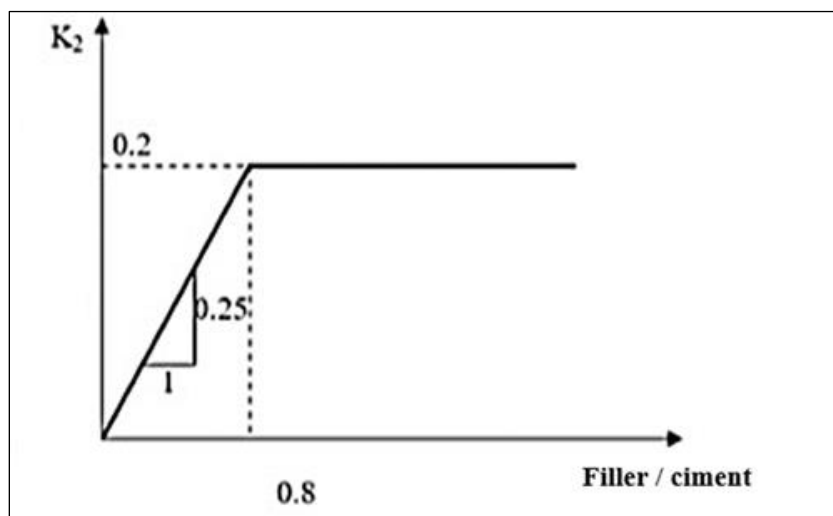


Figure I.13. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).

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

Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples :

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

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux

nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

I.2.6.3. Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons. D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact 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.2.6.3.1. Différentes étapes de la formulation

1) Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

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

a) Dosage en ciment

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

b) Dosage en eau

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

c) Détermination du dosage en sable

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

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

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

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

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

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

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

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

Tel que : $MVAT$, $MVAR$ et MV_{sable} représentent respectivement la masse volumique apparente théorique, la masse volumique apparente réelle du béton et la masse volumique absolue du sable. Si l'affaissement au cône d'ABRAMS est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+ V dans l'équation) ; si l'affaissement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (- V dans l'équation).Après chaque

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

2) Détermination du dosage en fines d'addition

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

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

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

I.3. Valorisation des déchets dans le domaine de génie civil

I.3.1. Définition

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». D'après la loi française du 15 juillet 1975 : « Est ultime un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [Michèl, (1981)].

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

I.3.2. Méthodes de la valorisation

I.3.2.1. Valorisation matière

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

I.3.2.2. Valorisation énergétique

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

I.3.2.3. Valorisation chimique

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

I.3.3. Différents déchets utilisés en génie civil

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

I.3.3.1. Déchets inertes (DI)

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

I.3.3.2. Déchets ménagers et assimilés (DMA)

Les déchets ménagers englobent tous les déchets produits par les ménages et assimilés (certaines collectivités et certains commerçants). Ce sont donc les déchets que tout particulier produit dans sa vie quotidienne. Les déchets ménagers regroupent les ordures ménagères (non recyclables ou pas encore recyclées), les déchets recyclables secs (journaux, papiers, carton,

magazines, verre, aluminium, plastique) et les recyclables dits humides, organiques ou fermentescibles (déchets alimentaires, herbes, bois, etc.)

I.3.3.3. Déchets industriels banals (DIB)

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

I.3.3.4. Déchets industriels toxiques

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

I.3.3.5. Déchets industriels spéciaux (DIS)

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

I.3.4. Valorisation des déchets de verre

I.3.4.1. Définition du verre

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

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

En générale le verre est un matériau transparent, homogène et fragile il résiste au feu et au contact de tous les liquides et solides, c'est un solide non cristallin (amorphe) qui ne présente pas

l'ordre à longue distance c'est un état particulier de la matière (état vitreux) (**Figure I.14.**) [Abdelkibire et al., (2005)].

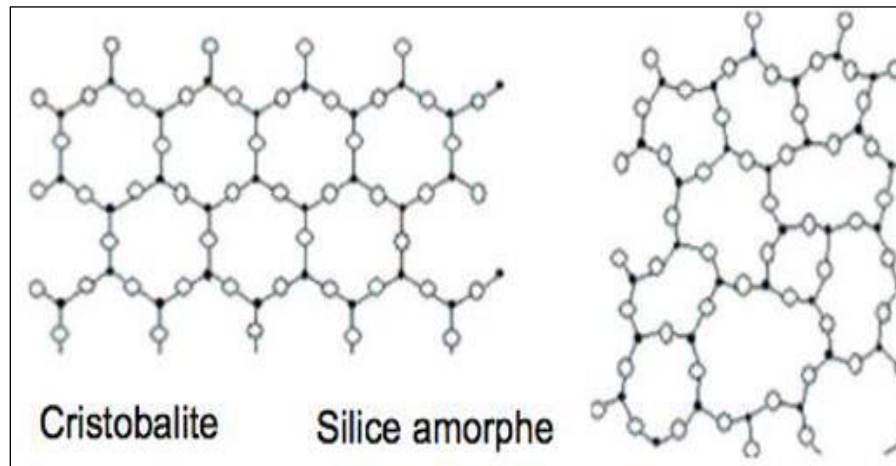


Figure I.14. Représentation schématique plane d'un réseau vitreux [Abdelkibire et al., (2005)].

I.3.4.2. Valorisation des verres dans les bétons

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

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

I.3.4.3. Propriétés des verres

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

I.3.4.3.1. Propriétés physiques

- Transparence : mais il peut être opaque ou opalescent ;
- Dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent ;
- Densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2.5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2.5 kg ;

- Résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Par contre sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre ;
- Imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue » [Zoubiri, (2016)].

I.3.4.3.2. Propriétés thermiques

- Dilatation : c'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution de soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition ;
- Conductivité : il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre) ; on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C ;
- Ininflammable et incombustible [Zoubiri, (2016)].

I.3.4.3.3. Propriétés chimiques

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

I.3.4.4. Réaction pouzzolanique du verre

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

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

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

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

I.3.5. Valorisation des déchets de craie

I.3.5.1. Sources de la poudre de craie

La craie est une roche sédimentaire carbonatée caractérisée par une texture tendre et une structure microcristalline. Elle est constituée principalement de carbonate de calcium (CaCO_3) issu de l'accumulation et de la fossilisation de micro-organismes marins au cours des périodes géologiques. Généralement de couleur blanche, la craie se distingue par sa forte porosité et sa faible densité apparente, ce qui lui confère des propriétés physico-chimiques particulières.

Les déchets de poudre de craie proviennent principalement des opérations d'extraction, de concassage, de broyage et de transformation réalisées dans les industries des matériaux de construction et des produits chimiques. Ces résidus se présentent généralement sous forme de poudre fine riche en carbonate de calcium et sont souvent considérés comme des sous-produits à faible valeur économique. Leur valorisation dans les matériaux cimentaires représente ainsi une solution intéressante tant sur le plan environnemental qu'économique, en contribuant à la réduction des déchets industriels et à la préservation des ressources naturelles [Lothenbach et al., 2008].

I.3.5.2. Propriétés physiques et chimiques des déchets de craie

Les déchets de poudre de craie sont composés majoritairement de carbonate de calcium (CaCO_3), dont la teneur dépasse généralement 90 %. Ils renferment également de faibles

proportions d'autres composés minéraux, notamment des oxydes de fer (Fe_2O_3), de magnésium (MgO) et de silice (SiO_2). Leur granulométrie très fine leur confère une surface spécifique élevée, favorisant leur dispersion homogène au sein de la matrice cimentaire.

Grâce à la finesse de leurs particules, les déchets de craie peuvent exercer un effet de remplissage en occupant les vides capillaires et intergranulaires présents dans le mélange de béton. Cette action contribue à améliorer la compacité de la matrice, à affiner sa microstructure et à réduire sa porosité. Toutefois, contrairement aux additions minérales pouzzolaniques, la poudre de craie présente une réactivité chimique limitée vis-à-vis des produits d'hydratation du ciment et agit principalement par un effet physique plutôt que par une contribution pouzzolanique significative [Borziak et al., 2018].

I.3.5.3. Utilisation des déchets de craie dans le béton

Selon les travaux de Sathiyapriya et al. (2023), le remplacement partiel du ciment par de la poudre de craie à des taux pouvant atteindre 15 % a permis d'obtenir des bétons présentant des résistances mécaniques satisfaisantes pour des applications soumises à des exigences modérées. Les auteurs ont également observé une amélioration de l'ouvrabilité du mélange, attribuée à la finesse des particules de craie et à leur effet de remplissage au sein de la matrice cimentaire.

En outre, l'incorporation simultanée de poudre de craie et de fibres naturelles a conduit à une amélioration des résistances à la traction et à la flexion par rapport aux bétons de référence. Cette amélioration est principalement liée à l'effet combiné du raffinement de la microstructure par la poudre de craie et du rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de valorisation des déchets de craie comme matériau de substitution partielle du ciment dans la production de bétons plus durables et respectueux de l'environnement [Sathiyapriya et al., 2023].

I.3.5.4. Effet des déchets de craie sur les propriétés du béton

D'après les travaux de Borziak et al. (2018), l'incorporation de poudre de craie dans les matériaux cimentaires contribue à l'amélioration de certaines propriétés liées à la durabilité du béton. Grâce à la finesse de ses particules, la poudre de craie exerce un effet de remplissage qui permet de réduire le volume des vides et d'affiner la structure poreuse de la matrice cimentaire. Cette densification se traduit par une diminution de l'absorption d'eau et de la perméabilité du béton, limitant ainsi la pénétration de l'eau et des agents agressifs.

La réduction de la porosité accessible favorise également une meilleure résistance aux sollicitations environnementales, notamment aux cycles de gel et de dégel, en diminuant les risques de dégradation liés à l'expansion de l'eau dans les pores. Par conséquent, l'ajout de poudre de craie peut contribuer à améliorer la compacité et la durabilité globale du béton, ce qui en fait une solution intéressante pour diverses applications de génie civil, telles que les chaussées et les ouvrages urbains [Borziak et al., 2018].

I.3.6. Évaluation environnementale de l'utilisation des déchets industriels

I.3.6.1. Réduction de l'empreinte carbone

L'industrie cimentière est considérée comme l'un des principaux secteurs émetteurs de dioxyde de carbone (CO₂). Les émissions associées à la production du ciment Portland proviennent principalement de la décarbonatation du calcaire lors de la fabrication du clinker ainsi que de la consommation énergétique nécessaire au fonctionnement des fours. Selon les données publiées par la **Global Cement and Concrete Association (GCCA)**, la fabrication d'une tonne de ciment est associée à des émissions de l'ordre de 0,7 à 0,9 tonne de CO₂, selon les procédés de production et les sources d'énergie utilisées.

Dans ce contexte, la substitution partielle du ciment par des matériaux issus de déchets industriels, tels que la poudre de verre ou la poudre de craie, constitue une approche pertinente pour réduire l'empreinte carbone des bétons. En effet, la diminution de la quantité de ciment incorporée dans le mélange permet de réduire les émissions associées à sa production. Toutefois, la réduction réelle des émissions ne peut être considérée comme strictement proportionnelle au taux de substitution, puisqu'elle dépend également des impacts liés à la collecte, au transport, au traitement et au broyage des déchets valorisés.

Par ailleurs, la valorisation de ces sous-produits contribue à la réduction des quantités de déchets destinés à l'enfouissement et favorise une gestion plus durable des ressources naturelles. Elle participe également à la diminution de la consommation de matières premières vierges et peut conduire à une réduction des coûts de production des matériaux cimentaires lorsque les filières locales de récupération et de traitement sont disponibles [Mehta et Monteiro (2014)].

I.3.6.2. Analyse du cycle de vie (ACV)

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) constitue un outil normalisé permettant d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un matériau tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie. Cette méthodologie est encadrée par les

normes **ISO 14040** et **ISO 14044**, qui définissent les principes, le cadre méthodologique et les exigences relatives à la réalisation des études d'ACV.

Dans le domaine des matériaux de construction, l'ACV est largement utilisée pour comparer les performances environnementales des bétons conventionnels et des bétons incorporant des matériaux recyclés ou des additions minérales. Les indicateurs les plus fréquemment analysés comprennent le potentiel de réchauffement climatique, le potentiel d'acidification, l'épuisement des ressources abiotiques ainsi que la consommation d'énergie primaire.

I.4. Conclusion

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence le potentiel du béton de sable comme alternative au béton conventionnel dans diverses applications du génie civil. Les performances de ce matériau dépendent principalement de la qualité des constituants, de la répartition granulaire du sable, de l'incorporation de fines minérales et du dosage approprié des adjuvants, qui contribuent à l'amélioration de la compacité, de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques.

La revue de la littérature a également montré que l'utilisation d'additions minérales et de déchets industriels constitue une solution efficace pour améliorer certaines propriétés des matériaux cimentaires tout en réduisant la consommation de ressources naturelles. Par ailleurs, les impacts environnementaux associés à la production du ciment Portland encouragent le développement de matériaux alternatifs plus durables.

Dans ce contexte, la valorisation de la poudre de verre et de la poudre de craie apparaît comme une voie prometteuse pour la formulation de bétons de sable à la fois performants et respectueux de l'environnement, ce qui justifie l'intérêt de l'étude expérimentale présentée dans ce travail.

CHAPITRE II :
Matériaux Utilisés et
Techniques Expérimentales

CHAPITRE II :

Matériaux Utilisés et Techniques Expérimentales

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés dans la formulation du béton de sable ainsi qu'au programme expérimental adopté dans cette étude. Il est structuré en deux parties principales. La première partie porte sur la description des différents constituants du béton de sable et sur la présentation de leurs principales propriétés physiques et chimiques. La seconde partie est dédiée aux essais expérimentaux réalisés sur les formulations étudiées, notamment les essais physiques et thermiques, en précisant les procédures et les méthodes de caractérisation mises en œuvre pour l'évaluation de leurs performances.

II.2. Caractérisation des matériaux de base utilisés

II.2.1. Sable

Cette recherche a mis à l'essai deux sortes distinctes de sable, dans l'optique de mettre en parallèle les attributs de chaque variété et leur impact sur la composition du béton. Le premier genre est le sable de dune (SD), qui a été extrait de la partie méridionale de la cité d'El Oued. Ce sable se distingue par la finesse relativement élevée de ses grains, dont le diamètre peut atteindre environ 0,63 mm. Par ailleurs, la part de grains très fins, à savoir ceux dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm, ne s'élève pas au-delà de 5 %, ce qui en classe ce sable comme ayant une taille limitée. Cela a été démontré dans la **Figure (II.1.a)**.

Le second modèle est le sable alluvionnaire (SA), qui a été obtenu dans la localité de Djamaa (Wilaya d'El Meghaier). Ce genre de sable a des grains plus volumineux que le premier, ayant un diamètre maximal pouvant atteindre près de 5 mm, le rendant approprié pour certaines applications du béton qui requièrent une granulométrie importante. Cela a été démontré dans la **Figure (II.1.b)**.



a. Sable dunaire.



b. Sable alluvionnaire.

Figure II.1. Sables utilisés.

D'après des recherches antérieures, le sable employé représente un assemblage des deux types de sable (SAD). Il s'agit d'un composite formé de sable alluvionnaire (SA) et de sable de dune (SD), destiné à optimiser la granulométrie et à aligner l'agrégat fin avec les normes exigées pour le béton. On souligne que cette sorte de combinaison perfectionne les caractéristiques du béton, notamment à son état frais. Cette formulation a été élaborée en respectant un rapport massique précis ($SA/SD = 1,7$). La granulation du sable alluvionnaire a été ajustée dans sa portion fine par l'incorporation de sable de dune, qui renferme une teneur supérieure en particules fines [Bederina et al., (2005) ; Ammari et al., (2020) ; Ammari et al., (2021)].

II.2.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique sert à déterminer la répartition dimensionnelle en poids des divers composants qui forment le sable. La norme **NF P 18 560** définit l'essai.

Le test comprend le séchage de l'échantillon, puis son tamisage à l'aide d'une gamme de tamis de diamètres variés. Après le processus de tamisage, on calcule le pourcentage en poids de chaque fraction et les résultats sont présentés sous la forme d'une courbe de distribution granulométrique.

Cette étude permet de confirmer l'adéquation du granulat pour être incorporé dans les mélanges de béton en ce qui concerne la taille des particules et la densité. Les graphiques illustrent les conclusions de l'examen des sables employés (**Figure II.2.**).

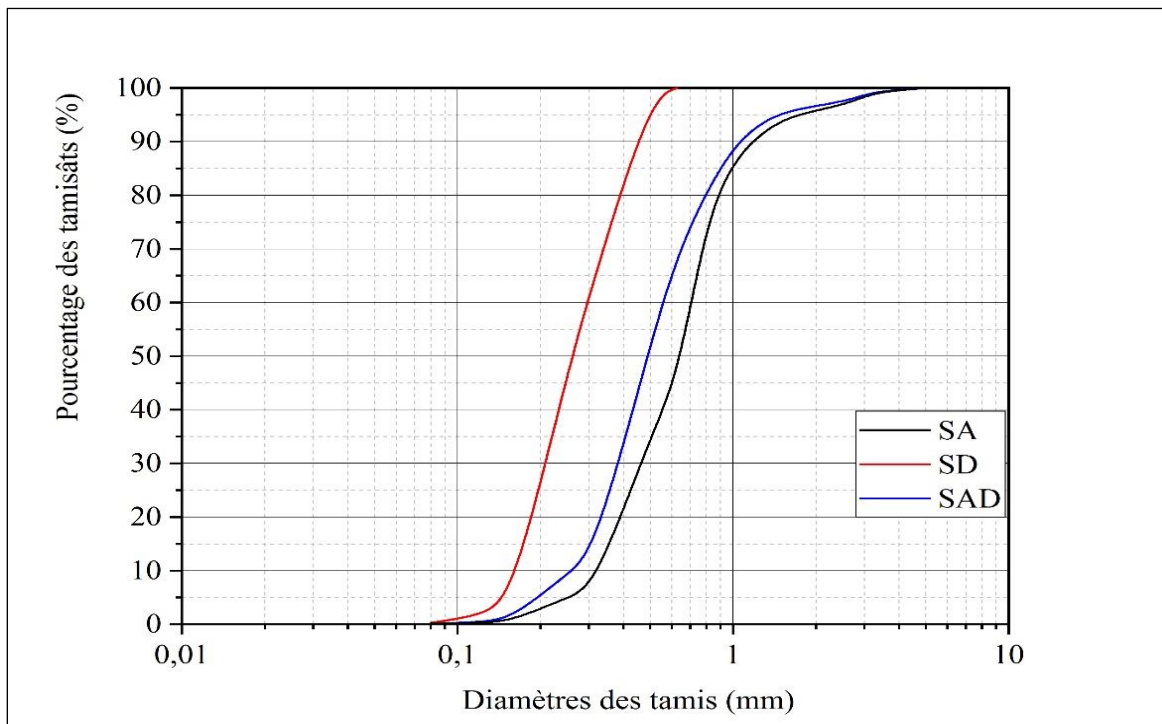


Figure II.2. Courbe granulométrique des sables utilisés.

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).

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

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	Cp (%)	p (%)
5	1577	2570	92.02	77.13	2.2	61.36	38.64

Le tableau ci-dessus montre que :

- Le sable mélange utilisé est très propre si l'on se réfère aux valeurs de l'équivalente de sable recommandé par la 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)**].

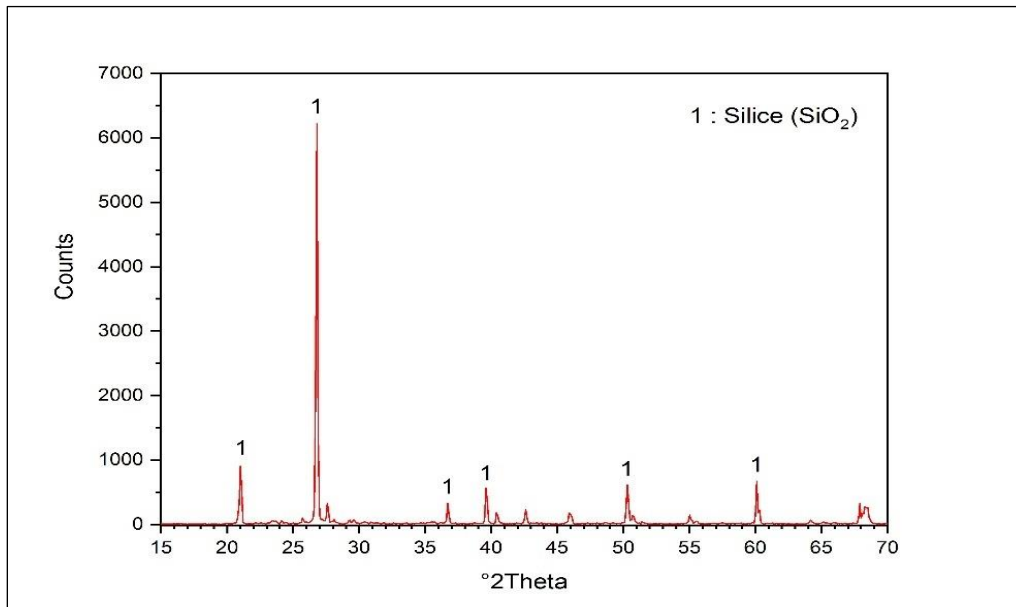


Figure II.3. Analyse chimique par DRX du sable de dune.

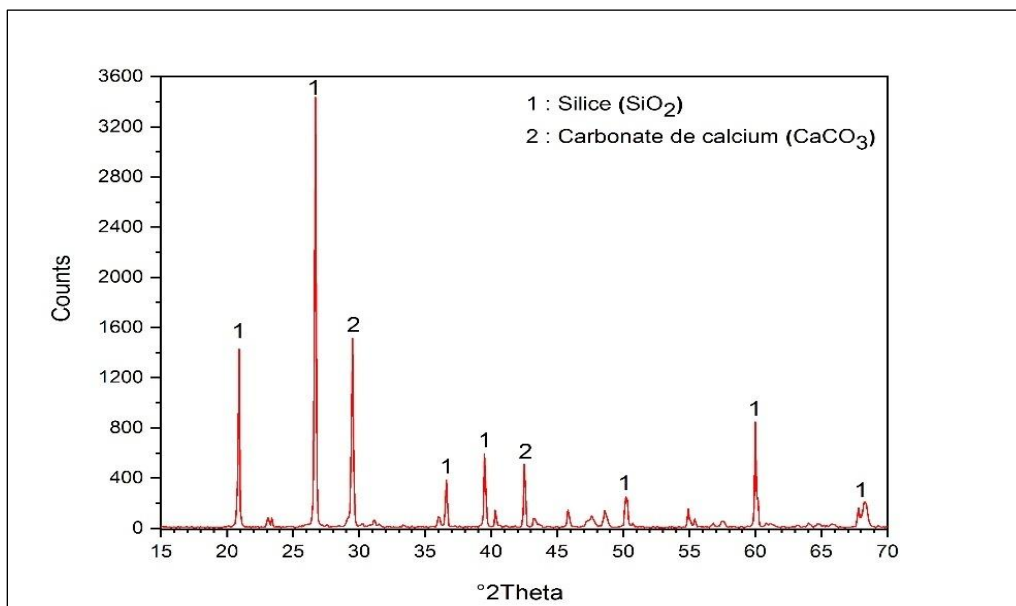


Figure II.4. Analyse chimique par DRX du sable alluvionnaire.

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II / B42.5N selon la norme NA 442 et EN 197-1, le ciment a été fourni par la société LAFARGE de type : MATINE (**Figure II.5.**), Bab Ezzouar (Alger)-Algérie.



Figure II.5. Ciment utilisé.

Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement 3080 kg/m^3 et 975 kg/m^3 . Les résultats de l'analyse chimique du ciment sont présentés dans le **Tableau II.2.**

Tableau II.2. Analyse chimique du ciment utilisé.

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

II.2.3. Filler calcaire

Dans ce travail de recherche, nous avons employé une charge de type calcaire. Il sert à remplir les vides dans le domaine du sable fin et à compléter la courbe granulométrique [**Chauvin et al. (1988)**]. Son emploi peut pallier le déficit de particules minuscules dans le ciment ou le sable, car sa dimension ne dépasse pas $80 \mu\text{m}$. Cela améliore les caractéristiques du béton, notamment la diminution de sa perméabilité et l'accroissement de sa cohésion. Sa présence dans les pores du béton réduit également l'infiltration d'eau, renforçant ainsi la résistance du béton face aux éléments 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/m^3 et 981 kg/m^3 .



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)].

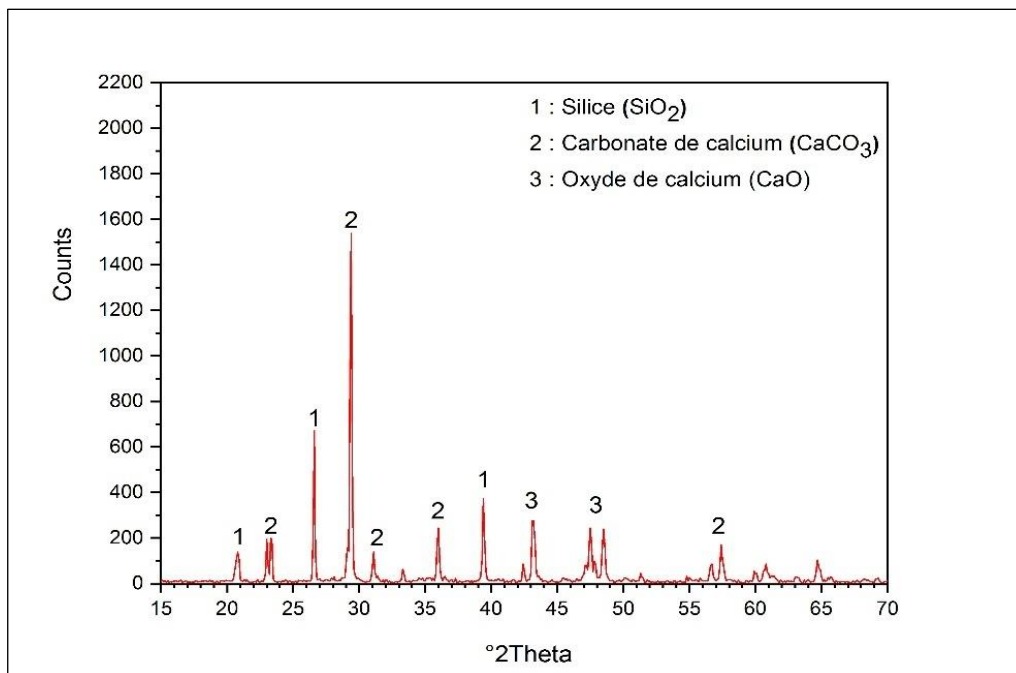


Figure II.7. Analyse chimique par DRX du filler calcaire utilisé.

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 structurales 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**.

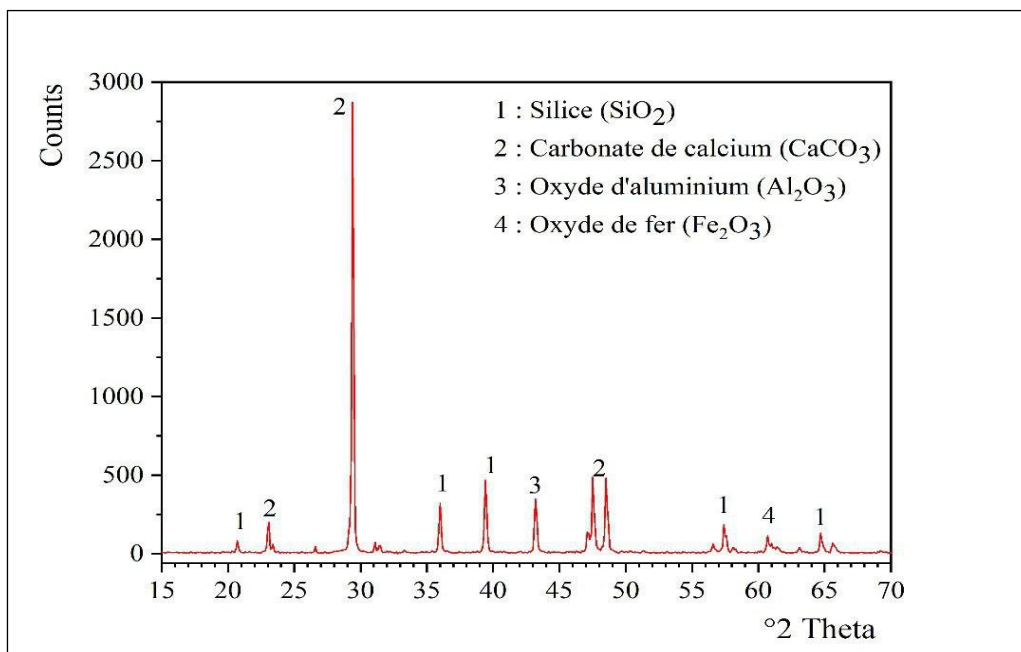


Figure II.10. Analyse par diffraction des rayons X de la poudre de craie.

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 CaCO₃, 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.**)

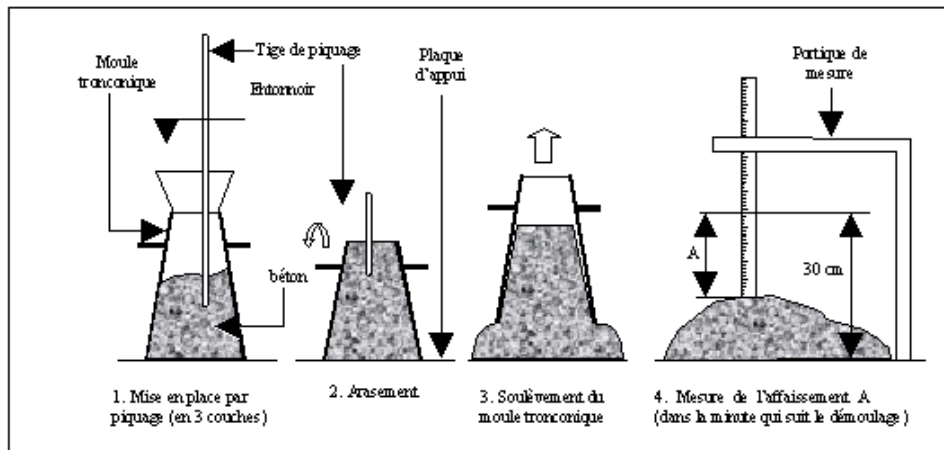


Figure II.11. Dispositif de mesure d'affaissement.

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

L'essai d'absorption d'eau par immersion totale est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour évaluer la porosité accessible à l'eau des matériaux cimentaires. Cette propriété constitue un indicateur important de la qualité de la matrice du béton, de sa compacité ainsi que de sa durabilité. En effet, une capacité d'absorption élevée traduit généralement la présence d'un réseau poreux plus développé, susceptible de favoriser la pénétration des agents agressifs et d'affecter les performances à long terme du matériau.

Le principe de l'essai consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par les éprouvettes après leur immersion complète dans l'eau pendant une durée déterminée. Cette quantité est évaluée à partir de la différence entre la masse de l'échantillon à l'état sec et sa masse à l'état saturé.

La procédure expérimentale adoptée comprend les étapes suivantes (**Figure II.12**) :

- Séchage des éprouvettes dans une étuve maintenue à $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'une masse constante, correspondant à la masse sèche (P_s) ;
- Refroidissement des éprouvettes à température ambiante puis immersion totale dans l'eau à une température de $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de 48 heures afin d'assurer leur saturation ;
- Retrait des éprouvettes de l'eau et élimination de l'excès d'eau superficielle à l'aide d'un chiffon humide ;
- Détermination de la masse saturée (P_h) de chaque éprouvette à l'aide d'une balance de précision.

Le taux d'absorption d'eau, exprimé en pourcentage, est calculé à partir de la relation suivante :

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

Où :

- P_s : masse sèche de l'éprouvette (g) ;
- P_h : masse de l'éprouvette à l'état saturé (g).

Cette mesure permet d'apprécier la capacité du béton à absorber l'eau et fournit des informations pertinentes sur sa structure poreuse ainsi que sur son niveau de compacité.



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

II.3.3.3. Caractérisation thermique

La caractérisation thermique des matériaux constitue une étape essentielle pour l'évaluation de leur comportement vis-à-vis des transferts de chaleur. Les différentes méthodes de mesure des propriétés thermiques reposent généralement sur l'analyse de l'évolution du champ de température au sein d'échantillons de géométrie connue soumis à des conditions aux limites contrôlées, qu'elles soient stationnaires ou transitoires. L'exploitation des réponses thermiques obtenues permet alors de déterminer les principaux paramètres thermo-physiques du matériau, tels que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité calorifique massique.

Dans le cadre de cette étude, les propriétés thermiques des formulations de béton de sable ont été déterminées à l'aide du dispositif **CT-Mètre**, conformément aux prescriptions de la norme **NF EN 993-15**. Cet équipement, développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) de Grenoble, est spécialement conçu pour la caractérisation thermique des matériaux de construction. Son principe de fonctionnement repose sur l'utilisation d'une sonde chauffante associée à un système de mesure de la réponse thermique du matériau soumis à une sollicitation calorifique contrôlée.

Pour la réalisation des essais, une sonde annulaire de type Ø15.R, de diamètre égal à 15 mm, a été utilisée. Le choix de cette sonde est motivé par sa capacité à fournir simultanément des mesures

fiables de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau étudié. La sonde est positionnée entre deux demi-éprouvettes planes de forme prismatique, de dimensions $10 \times 10 \times 4$ cm³, assurant ainsi un bon contact thermique et une répartition homogène du flux de chaleur durant l'essai (**Figure II.13**).

Les essais expérimentaux ont été réalisés au sein du laboratoire du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (**CNERIB**) à Alger, dans des conditions contrôlées garantissant la précision et la reproductibilité des mesures obtenues. Cette procédure permet d'évaluer avec précision les performances thermiques des différentes formulations de béton de sable étudiées.



Figure II.13. Dispositif de mesure de la conductivité thermique « CT METRE ».

II.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la caractérisation des matériaux de base entrant dans la composition des bétons de sable contenant des déchets de poudre de verre et de poudre de craie, ainsi qu'à la présentation des méthodes expérimentales adoptées dans cette étude. Les analyses physiques et chimiques réalisées ont permis de mettre en évidence les principales propriétés des constituants utilisés, tandis que les essais physiques et thermiques ont été décrits en détail en précisant les protocoles et les conditions expérimentales appliqués. Ainsi, ce chapitre constitue le fondement expérimental de l'étude en fournissant les éléments nécessaires à l'évaluation des performances des formulations élaborées et à l'interprétation de leur comportement physique et thermique

CHAPITRE III :

Résultats et Discussions

CHAPITRE III :

Résultats et Discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. Après l'élaboration des formulations de béton de sable incorporant de la poudre de verre et de la poudre de craie selon l'approche du plan d'expériences, les différentes compositions retenues sont présentées et analysées. L'étude porte principalement sur l'évaluation de l'influence de ces additions minérales sur certaines propriétés physiques et thermiques du béton de sable. À cet effet, les résultats relatifs à l'ouvrabilité, à la masse volumique et à la conductivité thermique sont examinés et discutés afin de mettre en évidence l'effet des taux de substitution adoptés et d'identifier les formulations les plus performantes.

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.

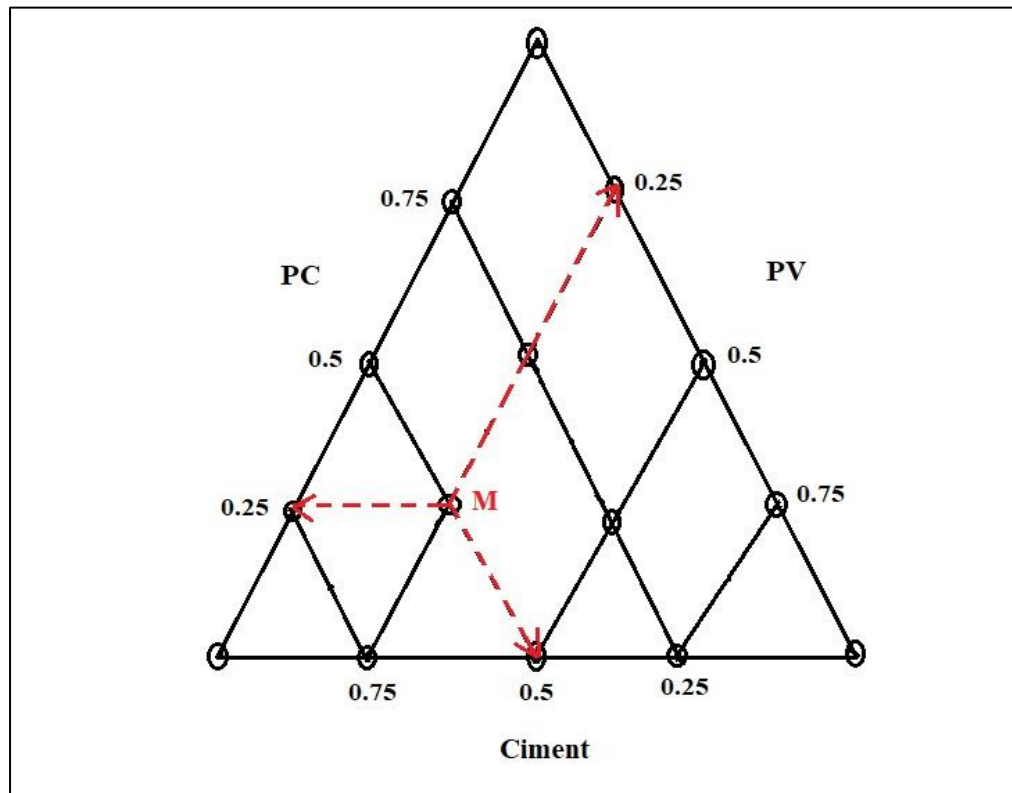


Figure III.1. Représentation triangulaire de 15 combinaisons étudiées.

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. Les valeurs mesurées varient entre 6,5 cm pour la formulation C11 et 7,6 cm pour la formulation C06, tandis que le béton témoin C01 présente un affaissement de 7,4 cm.

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

Globalement, les variations observées demeurent relativement faibles, ce qui indique que l'introduction de la poudre de verre (PV) et de la poudre de craie (PC), dans les proportions étudiées, n'a pas modifié de manière significative l'ouvrabilité des bétons élaborés. En effet, toutes les formulations présentent un affaissement compris entre 6,5 et 7,6 cm, correspondant à la classe de consistance plastique, ce qui traduit une bonne aptitude à la mise en œuvre.

On observe néanmoins une légère diminution de l'affaissement pour certaines formulations riches en poudre de verre, notamment C07 (6,8 cm), C11 (6,5 cm) et C12 (6,7 cm). Cette tendance peut être attribuée à la finesse élevée de la poudre de verre, qui augmente la surface spécifique du mélange et, par conséquent, la demande en eau nécessaire à son mouillage. Lorsque

le rapport eau/liant reste constant, cette augmentation de la surface spécifique peut entraîner une légère réduction de la fluidité du béton.

À l'inverse, certaines formulations contenant de la poudre de craie, telles que C06 (7,6 cm) et C03 (7,5 cm), présentent des valeurs d'affaissement légèrement supérieures à celle du béton témoin. Ce comportement peut être lié à l'effet filler de la poudre de craie. Grâce à sa très grande finesse, celle-ci améliore la distribution granulométrique des particules solides et favorise le glissement entre les grains, ce qui contribue à maintenir, voire à améliorer légèrement, la maniabilité du mélange. Ce résultat est cohérent avec les observations rapportées dans la littérature concernant les fillers calcaires et les matériaux riches en carbonate de calcium, qui peuvent améliorer les propriétés rhéologiques des bétons lorsqu'ils sont utilisés à des dosages modérés. 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**.

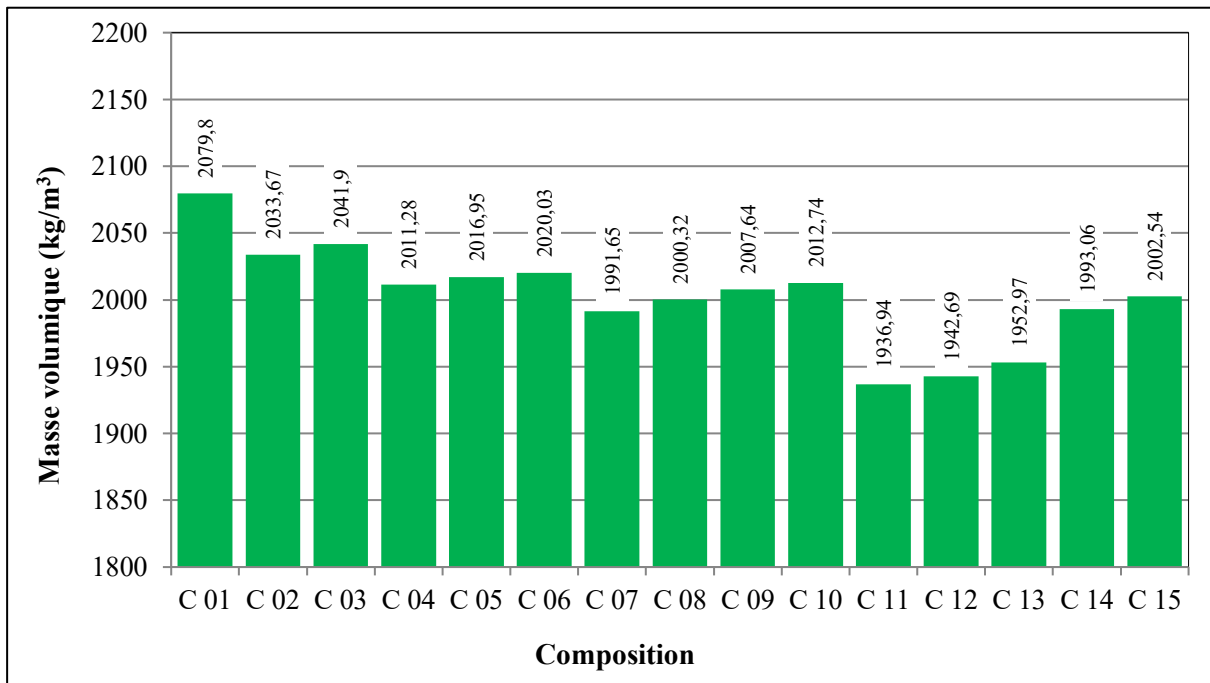


Figure III.2. Masse volumique des différents bétons étudiés.

Le Tableau relatif à la masse volumique des différents bétons étudiés met en évidence des variations progressives en fonction du taux et de la nature des matériaux de substitution (poudre de verre PV et poudre de craie PC). La composition de référence C01 présente la valeur la plus élevée avec une masse volumique de $2079,8 \text{ kg/m}^3$, tandis que les formulations contenant des taux croissants de substitution affichent globalement une diminution de la densité, atteignant un minimum pour la composition C11 ($1936,94 \text{ kg/m}^3$), correspondant à une substitution totale du ciment par la poudre de verre.

Globalement, on observe une tendance générale à la diminution de la masse volumique lorsque le taux de substitution augmente, ce qui s'explique principalement par la différence de densité intrinsèque entre le ciment Portland et les matériaux de substitution utilisés. En effet, la poudre de verre et la poudre de craie présentent généralement une masse volumique plus faible que celle du ciment, ce qui entraîne une réduction progressive de la densité globale du béton durci. Ce comportement est cohérent avec les travaux de Siddique (2011), qui ont montré que l'incorporation de poudres minérales fines issues de déchets dans les matériaux cimentaires conduit souvent à une diminution de la masse volumique en raison de la nature plus légère de ces additions et de la modification de la microstructure du composite.

On observe également que les formulations riches en poudre de verre, notamment C11 ($1936,94 \text{ kg/m}^3$), C12 ($1942,69 \text{ kg/m}^3$) et C13 ($1952,97 \text{ kg/m}^3$), présentent les valeurs les plus faibles. Cette tendance peut être attribuée non seulement à la faible densité du verre broyé, mais également à une possible augmentation de la porosité interne induite par la modification de la compacité du squelette granulaire et par une hydratation partielle réduite lorsque le ciment est substitué. À l'inverse, les formulations contenant des proportions plus importantes de poudre de craie, telles que C14 ($1993,06 \text{ kg/m}^3$) et C15 ($2002,54 \text{ kg/m}^3$), présentent des valeurs relativement plus élevées que celles riches en poudre de verre, ce qui peut être expliqué par le rôle filler du carbonate de calcium qui améliore le compactage granulaire et limite la formation de vides, contribuant ainsi à une structure légèrement plus dense.

Ainsi, la diminution progressive de la masse volumique observée dans l'ensemble des formulations traduit l'effet combiné de la substitution du ciment par des matériaux de densité inférieure et de la modification de la microstructure interne du béton, influençant directement sa compacité globale.

Selon la norme **NF EN 206-1**, la densité de béton léger est variée entre 800 kg/m^3 et 2000 kg/m^3 . 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.4**.

Tableau III.4. 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

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion totale montrent une évolution globale croissante des valeurs en fonction du taux de substitution du ciment par la poudre de verre (PV) et la poudre de craie (PC). La formulation de référence C01 présente la valeur la plus faible avec 7,95 %, tandis que les formulations contenant des taux élevés de substitution enregistrent des valeurs plus importantes, atteignant un maximum de 9,06 % pour la composition C11.

Globalement, cette augmentation de l'absorption d'eau traduit une évolution de la microstructure du béton vers un matériau plus poreux lorsque le ciment est partiellement ou

totalemment remplacé par les additions minérales étudiées. En effet, la réduction de la quantité de clinker hydraulique entraîne une diminution des produits d'hydratation (notamment le C-S-H), ce qui se traduit par une structure moins dense et une augmentation de la porosité capillaire. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les formulations riches en poudre de verre, notamment C11, C12 et C13, où l'absence de ciment entraîne une limitation des réactions hydrauliques classiques, conduisant à une structure plus ouverte et donc plus absorbante.

Ce comportement est cohérent avec les travaux de **Siddique**, qui ont montré que l'incorporation de poudres de verre dans les matrices cimentaires peut entraîner une augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau lorsqu'elles ne participent pas de manière significative à la réaction pouzzolanique [Siddique, (2011)]. De plus, **Mehta & Monteiro** soulignent que l'augmentation de la porosité capillaire est directement corrélée à la diminution de la compacité et de la continuité du réseau de pâte cimentaire [Mehta, & Monteiro, (2014)].

En revanche, les formulations contenant des proportions plus importantes de poudre de craie, telles que C14 (8,82 %) et C15 (8,74 %), présentent des valeurs légèrement inférieures à celles riches en poudre de verre. Ce comportement peut être attribué à l'effet filler de la poudre de carbonate de calcium, qui améliore le compactage granulaire et réduit partiellement la connectivité des pores, limitant ainsi l'absorption d'eau. Toutefois, cet effet reste limité lorsque le ciment est totalement ou fortement substitué, ce qui explique que les valeurs restent globalement supérieures à celle du béton témoin.

Ainsi, les résultats obtenus montrent que l'absorption d'eau est fortement influencée par la nature et la proportion des matériaux de substitution, traduisant un compromis entre l'effet filler bénéfique des fines minérales et la diminution des produits d'hydratation responsables de la densité et de la compacité du matériau.

III.4.3. Caractérisation thermique

Le **Tableau III.5.**, est mentionné les résultats des propriétés thermiques des bétons étudiés. D'après les résultats obtenus, on note une diminution de la conductivité thermique dans les compositions contenant la poudre de verre par rapport à la composition de référence SPV, où les taux de diminution sont 12.74% pour le cas PV10, 17.87% pour le cas PV20, 22.59% pour le cas PV30 et 28.67% pour le cas PV40.

Tableau III.5. Propriétés thermiques des bétons étudiés.

Composition	Conductivité thermique λ (W/m .K)
C01	1.695
C02	1.479
C03	1.505
C04	1.392
C05	1.425
C06	1.455
C07	1.312
C08	1.348
C09	1.388
C10	1.420
C11	1.209
C12	1.245
C13	1.290
C14	1.340
C15	1.385

Les résultats de la conductivité thermique des bétons étudiés montrent une diminution progressive des valeurs en fonction de l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre de verre (PV) et la poudre de craie (PC). La composition de référence C01 présente la conductivité thermique la plus élevée avec une valeur de 1,695 W/m·K, tandis que la valeur la plus faible est enregistrée pour la composition C11 (1,209 W/m·K), correspondant à un remplacement total du ciment par la poudre de verre.

Généralement, cette diminution de la conductivité thermique peut être directement corrélée à la réduction de la masse volumique et à l'augmentation de la porosité observées précédemment. En effet, les matériaux cimentaires plus poreux et moins denses présentent généralement une conductivité thermique plus faible, en raison de la présence accrue de pores remplis d'air, lequel

est un très mauvais conducteur thermique. Ce comportement est en accord avec les travaux de **Mehta & Monteiro**, qui indiquent que la conductivité thermique du béton dépend fortement de sa compacité, de sa porosité et de la nature de la matrice solide [**Mehta, & Monteiro, (2014)**].

On observe également que les formulations riches en poudre de verre, notamment C11 (1,209 W/m·K), C12 (1,245 W/m·K) et C13 (1,290 W/m·K), présentent les valeurs les plus faibles. Cela peut être expliqué par la diminution de la continuité de la phase cimentaire et par l'augmentation du volume de vides internes, ce qui limite le transfert de chaleur à travers le matériau. De plus, la faible conductivité intrinsèque des phases vitreuses et des microstructures moins compactes contribue également à cet effet isolant. À l'inverse, les formulations contenant une proportion plus importante de poudre de craie, telles que C14 (1,340 W/m·K) et C15 (1,385 W/m·K), présentent des valeurs légèrement plus élevées. Cela peut s'expliquer par l'effet filler du carbonate de calcium, qui améliore la compacité granulaire et réduit partiellement la porosité, augmentant ainsi légèrement la capacité de transmission thermique par conduction solide.

Ainsi, les résultats obtenus mettent en évidence une relation inverse entre la conductivité thermique et le taux de substitution du ciment par les matériaux étudiés, confirmant que l'allègement de la matrice et l'augmentation de la porosité contribuent significativement à l'amélioration des performances isolantes du béton.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier l'influence de la substitution du ciment par la poudre de verre (PV) et la poudre de craie (PC) sur le comportement physique et thermique des bétons élaborés. L'ensemble des résultats montre que les formulations restent globalement stables à l'état frais, avec une consistance plastique et des variations limitées de l'affaissement, ce qui indique que les additions utilisées n'affectent pas fortement la maniabilité. À l'état durci, les essais physiques ont mis en évidence une diminution progressive de la masse volumique et une augmentation de l'absorption d'eau en fonction du taux de substitution, traduisant une évolution de la structure interne vers un matériau plus poreux. Cette modification microstructurale influence directement les performances thermiques du béton. En effet, les résultats de la conductivité thermique montrent une réduction significative des valeurs avec l'augmentation des additions minérales, confirmant l'amélioration des propriétés isolantes du matériau. Ainsi, ce travail met en évidence l'intérêt de la valorisation des matériaux étudiés dans une approche visant principalement l'analyse des propriétés physiques et thermiques des bétons.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche a porté sur l'étude de l'influence de la substitution partielle du ciment par deux matériaux issus de déchets, à savoir la poudre de verre (PV) et la poudre de craie (PC), dans la formulation d'un béton de sable. L'objectif principal était d'évaluer l'effet de ces additions minérales sur certaines propriétés physiques et thermiques du matériau, tout en s'inscrivant dans une démarche de valorisation des déchets et de réduction de la consommation de ciment, dont la production est fortement génératrice d'émissions de dioxyde de carbone.

Afin d'atteindre cet objectif, un plan d'expérience de mélange a été adopté, permettant d'étudier différentes combinaisons de poudre de verre et de poudre de craie dans une plage de substitution équivalente à 20 % du ciment. Les formulations élaborées ont été caractérisées à travers plusieurs essais, notamment la maniabilité, la masse volumique, l'absorption d'eau par immersion totale et la conductivité thermique.

Les résultats obtenus concernant la maniabilité ont montré que l'incorporation de la poudre de verre et de la poudre de craie n'a pas entraîné de modifications importantes de l'ouvrabilité des bétons étudiés. Toutes les formulations ont conservé une consistance plastique avec des valeurs d'affaissement relativement proches de celle du béton témoin. Une légère diminution de l'ouvrabilité a toutefois été observée pour les compositions riches en poudre de verre, en raison de sa finesse élevée et de sa forme irrégulière qui augmentent la demande en eau du mélange. À l'inverse, les formulations contenant davantage de poudre de craie ont présenté une légère amélioration de la maniabilité, attribuée à l'effet filler et à la morphologie plus favorable des particules.

L'étude de la masse volumique a révélé une diminution progressive de la densité des bétons avec l'augmentation du taux de substitution. Cette évolution est liée à la densité intrinsèque plus faible des matériaux de substitution par rapport au ciment ainsi qu'aux modifications de la microstructure interne du matériau. Les compositions riches en poudre de verre ont enregistré les valeurs les plus faibles, tandis que la poudre de craie a permis de limiter partiellement cette diminution grâce à son effet de remplissage qui améliore le compactage granulaire. Certaines formulations ont ainsi atteint des densités proches de celles des bétons légers, ce qui peut

constituer un avantage dans certaines applications nécessitant une réduction du poids propre des structures.

Les résultats relatifs à l'absorption d'eau par immersion totale ont montré une augmentation progressive de la capacité d'absorption lorsque le taux de substitution augmente. Cette évolution traduit une augmentation de la porosité du matériau due à la réduction de la quantité de ciment disponible pour produire les hydrates responsables de la densification de la matrice cimentaire. Les formulations fortement dosées en poudre de verre ont présenté les valeurs d'absorption les plus élevées. Néanmoins, la présence de poudre de craie a permis de réduire partiellement ce phénomène grâce à son effet filler qui améliore la compacité du matériau et limite la connectivité des pores.

Concernant la conductivité thermique, les résultats obtenus ont mis en évidence une diminution significative de cette propriété avec l'augmentation du taux de substitution. Cette réduction est directement liée à la baisse de la masse volumique et à l'augmentation de la porosité observées dans les formulations étudiées. Les bétons riches en poudre de verre ont présenté les meilleures performances thermiques, traduites par les plus faibles valeurs de conductivité. Ces résultats montrent que l'utilisation de ces matériaux de substitution peut contribuer à l'amélioration des propriétés d'isolation thermique des bétons de sable et à la réduction des transferts de chaleur dans les bâtiments.

L'analyse globale des résultats met en évidence l'existence d'un compromis entre les propriétés physiques et thermiques du matériau. En effet, l'augmentation du taux de substitution favorise généralement la réduction de la masse volumique et de la conductivité thermique, améliorant ainsi les performances d'isolation. Cependant, cette amélioration s'accompagne d'une augmentation de l'absorption d'eau liée à une porosité plus importante. La poudre de craie apparaît comme un matériau capable d'atténuer partiellement cet effet grâce à son rôle de filler, tandis que la poudre de verre contribue davantage à l'allègement et à l'amélioration des propriétés thermiques.

Au-delà des performances techniques observées, cette étude confirme également l'intérêt environnemental de la valorisation des déchets de verre et de craie dans les matériaux cimentaires. Leur utilisation permet de réduire la consommation de ciment, de limiter l'exploitation des ressources naturelles et de contribuer à une gestion plus durable des déchets industriels et domestiques. Cette approche s'inscrit pleinement dans les objectifs actuels du développement durable et de l'économie circulaire appliqués au secteur de la construction.

Conclusion générale

En conclusion, les résultats obtenus démontrent que l'incorporation de poudre de verre et de poudre de craie comme matériaux de substitution du ciment constitue une solution prometteuse pour la formulation de bétons de sable plus légers et présentant de meilleures performances d'isolation thermique, tout en maintenant une maniabilité satisfaisante. Les performances observées confirment le potentiel de ces matériaux recyclés pour le développement de bétons plus respectueux de l'environnement et adaptés aux exigences actuelles du secteur du bâtiment.

Afin de compléter les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées :

- Réaliser des analyses microstructurales (MEB, DRX, porosimétrie) afin de mieux comprendre les mécanismes responsables de l'évolution de la porosité et des propriétés physiques observées.
- Étudier l'effet de différentes finesses de broyage de la poudre de verre sur son activité pouzzolanique et sur les performances globales du béton.
- Examiner l'influence de taux de substitution supérieurs à ceux étudiés dans ce travail afin de déterminer les limites optimales d'incorporation de ces matériaux.
- Réaliser une analyse environnementale et économique complète incluant le bilan carbone et le coût de production des bétons élaborés.

Ces perspectives permettront d'approfondir les connaissances sur l'utilisation des matériaux recyclés dans les bétons de sable et de contribuer au développement de solutions constructives plus durables et respectueuses de l'environnement.

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., Dheilily, 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.
- [Benaissa et al., (1993)] Benaissa, A., Morlier, P., & Viguier, C. (1993). Microstructure du béton de sable. *Cement and concrete research*, 23(3), 663-674.
- [Benaissa et al., (2008)] Benaissa, 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.