



**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. MEDJDOUB Abdelhamid
2. LKAHWAS Mohamed

**Intitulé :**

**Étude de l'effet des déchets de caoutchouc et des  
déchets de céramique sur le comportement des bétons  
de sable dunaire autoplaçants**

**Soutenu le : 27/05/2025**

**Devant le jury composé de :**

**Dr : AMMARI Mohammed Seghir**

**Président**

**Dr : FETHIZA ALI Boubaker**

**Examineur**

**Dr : KHELAIFA Hamad**

**Encadreur**

**Année académique : 2024/2025**

# Remerciements

Louange à Dieu qui nous a guidés vers cela, et nous n'aurions pas été guidés si Dieu ne nous avait pas guidés, et que les bénédictions et la paix soient sur notre Maître Muhammad et sur sa pure famille et ses compagnons.

Au moment de conclure cet effort scientifique, je ne peux qu'exprimer mes plus profonds remerciements et ma gratitude à tous ceux qui m'ont tendu la main et m'ont aidé à mener à bien cette recherche, et je voudrais mentionner en particulier mon superviseur, le

**Dr : Hamad Khelaifa**, à l'Université d'El Oued Qu'Allah le récompense en notre nom avec la meilleure récompense et le protège de tout mal.

**Dr : Sek Lakhdar**. Docteur à L'Université d'El Oued, pour avoir dirigé ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements et notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés à mener à bien cette recherche, directement ou indirectement. Que Dieu nous guide vers ce qui est le meilleur pour nous.

# Dédicaces

Louange à Dieu, avec amour, remerciements et gratitude pour le début et la fin Et leur dernière supplication sera : « Louange à Dieu, Seigneur des mondes. » Le voyage n'était pas court, et la route n'était pas pavée d'installations, mais je Je l'ai fait, alors louange à Dieu qui a facilité les débuts et nous a conduits jusqu'au bout par sa grâce et sa générosité

Je dédie ce succès à mon moi ambitieux en premier lieu, qui a commencé avec ambition et a terminé avec succès Ensuite, à tous ceux qui ont travaillé avec moi pour compléter mon parcours universitaire de premier cycle. Tu as toujours été un soutien intemporel pour moi.

Avec tout mon amour, je dédie les fruits de ma réussite et de mon diplôme

À la lumière qui a illuminé mon chemin, à la lampe dont la lumière ne s'éteint jamais, à celle qui a passé des années à essayer pour que je puisse gravir les échelons du succès, à celle dont je porte le nom avec fierté, et à celle qui a récolté les épines de mon chemin pour m'ouvrir la voie de l'apprentissage Je lui ai toujours promis ce succès. Me voici, accomplissant ma promesse et la dédiant à toi,

**« mon cher père »**

celle qui m'a appris la morale avant les lettres, au pont qui m'a conduit au ciel, à la main invisible qui a enlevé les épines de mon chemin, et à celle qui a enduré chaque instant de douleur que j'ai traversé et m'a soutenue lorsque j'étais faible et faible,

**« ma chère mère »**

Je ne l'aurais pas fait sans la grâce de Dieu Voici le grand jour, le jour où j'ai passé les années ardues d'études à rêver d'eux jusqu'à ce qu'ils arrivent l'un après l'autre, avec Sa grâce et Sa générosité, à la joie de l'achèvement. Louange à Dieu, par qui Il a accordé la bonté et nous a remplis et noyés de joie et de bonheur qui m'ont fait oublier mes difficultés.

# RÉSUMÉ

L'objectif principal de cette étude est d'examiner la possibilité de valoriser les déchets de céramique, abondants dans les ateliers de construction, ainsi que les déchets de caoutchouc issus du recyclage de pneus usagés, souvent jetés à l'air libre, pour la confection de bétons de sable autoplaçants.

Dans ce but, nous avons incorporé des granulats de caoutchouc (0–1 mm), issus du recyclage de pneus usagés, en substitution volumique du sable, à des taux de 5, 10 et 15 %, ainsi que des déchets de céramique, également en substitution volumique du sable, à des taux de 4, 8 et 12 %, afin d'obtenir des matériaux à faible impact environnemental.

Les résultats obtenus montrent que les performances mécaniques du béton de sable autoplaçant s'améliorent avec l'augmentation du pourcentage de déchets de céramique. De plus, l'incorporation de granulats de caoutchouc améliore l'ouvrabilité du béton de sable autoplaçant.

Il est donc possible d'obtenir un nouveau matériau de construction utilisable pour différents types d'éléments constructifs.

**Mots clés :** Béton de sable autoplaçant, Déchets de céramiques, Déchets de caoutchouc, Propriétés mécaniques.

## ABSTRACT

The main objective of this study is to explore the potential for valorizing ceramic waste, which is abundant in construction workshops, as well as rubber waste from recycled used tires, which are often discarded in the open air, for the production of self-compacting sand concrete.

To this end, rubber aggregates (0–1 mm) from recycled tires were incorporated as a volumetric replacement for sand at rates of 5%, 10%, and 15%, along with ceramic waste, also used as a volumetric replacement for sand at rates of 4%, 8%, and 12%, in order to obtain materials with a low environmental impact.

The results show that the mechanical performance of self-compacting sand concrete improves with an increased percentage of ceramic waste. Furthermore, the inclusion of rubber aggregates enhances the workability of the self-compacting sand concrete.

It is therefore possible to produce a new construction material suitable for various types of structural elements.

**Key words:** Self-compacting sand concrete, ceramic waste, Rubber waste, Mechanical performance.

## الملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو دراسة إمكانية تئمين نفايات السيراميك، المتوفرة بكثرة في ورشات البناء، بالإضافة إلى نفايات المطاط الناتجة عن إعادة تدوير الإطارات المستعملة، والتي غالبًا ما يتم التخلص منها في الهواء الطلق، وذلك من أجل تصنيع خرسانة رملية ذاتية التوضع. ولتحقيق هذا الهدف، قمنا بإدخال حبيبات مطاطية (بحجم 0-1 مم) ناتجة عن إعادة تدوير الإطارات المستعملة كبديل للرمل بنسبة 5%، 10% و 15%، كما تم استخدام نفايات السيراميك أيضًا كبديل للرمل بنسب 4%، 8% و 12%، بهدف الحصول على مواد ذات تأثير بيئي منخفض. وقد أظهرت النتائج المحصلة أن الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية ذاتية الانسياب تتحسن بزيادة نسبة نفايات السيراميك. كما أن إدخال الحبيبات المطاطية يُحسن قابلية تشغيل الخرسانة الرملية ذاتية التوضع. وبالتالي، فمن الممكن الحصول على مادة بناء جديدة قابلة للاستعمال في أنواع مختلفة من العناصر الإنشائية.

**الكلمات المفتاحية:** خرسانة رملية ذاتية التوضع، نفايات المطاط، نفايات السيراميك، خصائص ميكانيكية.

## Sommaire

Remerciements .....	
Dédicaces.....	
RÉSUMÉ.....	
ABSTRACT .....	
Sommaire.....	
Liste de figure.....	
Liste de tableaux.....	
Introduction générale.....	1

### Chapitre I :

#### Synthèse bibliographique

I.1. Introduction .....	3
I.2.Déchets de caoutchouc .....	3
I.2.1.Historique sur le déchet de caoutchouc.....	3
I.2.2.Definition .....	4
I.2.3. Composition chimique d'un caoutchouc .....	4
La matière caoutchouc est généralement constituée de trois principaux composants .....	4
I.3.Caoutchouc des pneus.....	5
I.3.1. Les pneumatiques usagés .....	5
I.3.1.1.Les pneus usagés Réutilisables (PUR).....	5
I.3.1.2. Les pneus non réutilisables (PUNR).....	6
I.3.1.3. Valorisation des pneumatiques usagés.....	7
I.3.1.4. Valorisation est domaine d'application des pneumatiques.....	7
I.3.1.5.Propriétés de matière caoutchouc .....	8
I.3.1.6.Chiffre .....	9
I.3.1.7. Recyclage de caoutchouc .....	10
I.3.2. Exemples concrets d'utilisation de déchets de caoutchouc dans la construction .....	11
I.3.3.Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons .....	12
I.3.4. Les déchets du caoutchouc en Algérie .....	12
I.4. Béton de déchets de caoutchouc .....	13
I.4.1.Définition .....	13
I.4.2. Propriété du béton de déchets de caoutchouc .....	13
Propriétés à l'état frais .....	13

I.4.3. Propriétés à l'état durci .....	15
I.5. Déchets de céramique .....	16
I.5.1. Définition .....	16
I.5.2. Les différents types de céramiques .....	17
I.5.2.1. Les céramiques traditionnelles .....	17
I.5.2.2. Les céramiques techniques .....	17
I.5.3. Technologie de fabrication d'une céramique .....	18
I.5.4. Propriétés des céramiques .....	19
I.5.4.1. Propriétés mécaniques .....	19
I.5.4.2. Propriétés thermiques .....	20
I.5.5. Produits céramiques dans la construction .....	20
I.6. Différents déchets utilisés en génie civil .....	21
I.7. Recyclage .....	22
I.8. Sable de dunes .....	22
I.8.1. Définition d'un sable de dunes .....	22
I.8.2. Mécanismes de formation de dune .....	23
I.8.3. Types des dunes .....	23
I.8.3.1. Les avant-dunes (fore dune) .....	23
I.8.3.2. Les falaises dunaires .....	24
I.8.3.3. Les dunes <i>perchées</i> .....	24
I.8.3.4. Les cordons dunaires artificiels .....	24
I.8.4. Physique des dunes .....	24
I.8.5. Utilisation du sable de dunes .....	25
I.8.5.1. Diverses utilisations .....	25
I.9. béton autoplaçant (BAP) .....	26
I.9.1. Définition de BAP .....	26
I.9.2. Domaine d'utilisation des BAP .....	26
I.9.3. Avantages du béton autoplaçant .....	27
I.9.3.1. Avantages techniques .....	27
I.9.3.2. Avantages économiques .....	27
I.9.3.3. Avantages écologiques .....	27
I.10. Conclusion .....	28

## Chapitre II

### Matériaux et procédures expérimentales

II.1.Introduction.....	30
II.2.Matériaux utilisés.....	30
II.2.1.Sables.....	30
II.2.2.Ciment.....	31
II.2.3. Granulats de caoutchouc (GC).....	32
II.2.4. Déchets de céramiques (< 0.63mm).....	33
II.2.5.Caractéristiques physiques.....	34
II.2.5.1.Les masses volumiques.....	34
II.2.5.2.Analyse granulométrique.....	35
II.2.5.3.Module de finesse.....	35
II.2.5.4. Equivalent de sable.....	38
II.2.5.5. Synthèse des résultats.....	39
II.2.6. Eau de gâchage.....	39
II.3. Formulations.....	40
II.3.1. Formulations du béton du sable témoin (0% GC, 0% DC).....	40
II.3.2. Compositions des bétons de sable.....	40
II.3.3. Procédure expérimentale.....	41
II.3.3.1. Fabrication du béton de sable autoplaçant.....	41
II.3.3.1.1. Pesage des composants du béton de sable autoplaçant.....	41
II.3.3.1.2. Malaxage des composants du béton de sable autoplaçant.....	41
II.3.3.1.3. Coulage des éprouvettes :.....	42
Dans ce travail nous avons confectionné 14 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm ...	42
II.3.3.1.4. Etapes de coulage des éprouvettes.....	43
II.3.4. Les essais réalisés.....	45
II.3.4.1.Essais réalisés à l'état frais.....	45
II.3.4.1.1.Essai d'étalement au mini cône.....	45
II.3.4.1.2. Essais de V Fennel (Mesure du temps d'écoulement).....	45
II.3.4.1.3. Détermination de la masse volumique.....	47
II.3.4.2. Essais réalisés à l'état sec.....	47
II.3.4.2.1.Essai de traction par flexion.....	48
II.3.4.2.2.Essai de compression.....	49
II.3.4.2.3. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	49
II.3.4.2.4. Essai d'auscultation dynamique.....	50

### Liste de figure

<b>Figure I.1.</b> Les risques de feu dans les décharges des pneus usagés [8].....	7
<b>Figure I.2.</b> La progression des activités de valorisation des pneus usagés.....	7
<b>Figure I.3.</b> L'arbre tropical Hévéa (Arbre à caoutchouc).....	8
<b>Figure I.4.</b> La production mondiale de caoutchouc naturel en 2014 [13] .....	9
<b>Figure I.5.</b> Processus de recyclage de déchets de caoutchouc [16]. .....	11
<b>Figure I.6.</b> Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés. ....	12
<b>Figure I.8.</b> Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail [18]. .....	13
<b>Figure I.9.</b> Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement [19]. .....	14
<b>Figure I. 10 :</b> L'influence des GCR sur la masse volumique du béton. ....	15
<b>Figure I.11.</b> Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissement x100) [20] .....	16
<b>Figure I.12.</b> Déchets de céramique de en oued souf- Algérie. ....	16
<b>Figure I.13 :</b> Exemple des céramiques traditionnelles.....	17

<b>Figure. I.15</b> : Influence de la température sur le module d'Young de différentes céramiques [24].....	19
<b>Figure. I.16</b> : Conductibilité thermique des matériaux en fonction de la température [24]. ...	20
<b>Figure I.17.</b> Sable de dunes en oued souf- Algérie.....	23
<b>Figure.1.18.</b> Types de dunes. A : barkhanes ; B : dunes paraboliques ; C : dunes longitudinales. La flèche bleue indique la direction du vent dominant [28]. .....	25
<b>Figure II.1</b> : Sable Alluvionnaire Djamaa (SA).....	30
<b>Figure II.2</b> : Sable de dune .....	30
<b>Figure II.3.</b> Ciment utilisé. ....	31
<b>Figure II.4.</b> Granulats de caoutchouc (0-1mm). ....	33
<b>Figure II.6</b> : Tamis d`analyse granulométrique. ....	35
<b>Tableau II.7.</b> Analyse granulométrique de sable Alluvionnaire. ....	36
<b>Figure II.8.</b> Schémas de mesure d'équivalent de sable.....	38
<b>Figure II.9.</b> Courbes granulométriques des sables utilisés et des granulats de caoutchoucs. خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.	
<b>Figure II.10.</b> Pesage des composants du béton de sable.....	41
<b>Figure. II.11.</b> Matériaux utilisés secs .....	42
<b>Figure.II.12.</b> Mélanger les matières sèches .....	42
<b>Figure.II.13.</b> Ajouter de l'eau en mélangeant.....	42
<b>Figure.II.14.</b> Moule de l'éprouvette utilisée.....	43
<b>Figure.II.15.</b> Lubrifié de moule.....	43
<b>Figure.II.16.</b> Verser la mimote de la quantité dans le moule .....	43
<b>Figure.II.17.</b> Remplissage du modèle terminé .....	44
<b>Figure.II.18.</b> Ouvrir les éprouvettes .....	44
<b>Figure.II.19.</b> Nettoyage des échantillons.....	44
<b>Figure.II.20.</b> Essai d'étalement au mini cône. ....	45
<b>Figure.II.21.</b> Essais de V Fennel (Mesure du temps d'écoulement). ....	46
<b>Figure.II.22.</b> Rasage et pesage. ....	47
<b>Figure.II.24.</b> Essais de tractions par flexion.....	48
<b>Figure.II.25.</b> Essai de compression. ....	49
<b>Figure II.26.</b> L'essai d'absorption d'eau par. ....	50
<b>Figure.II.27.</b> Essai d'auscultation dynamique. ....	50

## Liste de tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Composition chimique de pneu. ....	5
<b>Tableau I.2.</b> Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde. ....	9
<b>Tableau II.1.</b> Résistance à la compression (NA 234).....	31
<b>Tableau II.2.</b> Analyses chimiques (NA 5042) .....	31
<b>Tableau II.3.</b> Composition minéralogique du ciment (CLINKER). ....	32
<b>Tableau II.4.</b> Caractéristiques physiques du ciment MATINE.....	32
<b>Tableau II.5.</b> Caractéristiques physiques du Granulats de caoutchouc (0/4mm).....	33
<b>Tableau II.6.</b> Caractéristiques physiques du Déchets de céramiques (< 0.63mm). ....	34
<b>Tableau II.7.</b> Analyse granulométrique de sable Alluvionnaire. ....	36
<b>Tableau II.8.</b> Analyse granulométrique sable de dune.....	37
<b>Tableau II.9.</b> Analyse granulométrique sable Alluvionnaire + sable de dune. ....	37
<b>Tableau II.10.</b> Analyse granulométrique Déchets de céramiques.....	37
<b>Tableau II.11.</b> Analyse granulométrique Granulats de caoutchouc. ....	38
<b>Tableau II.12.</b> Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons de sable. ....	39
<b>Tableau II.13.</b> Regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur utilisé. ....	39
<b>Tableau II.14.</b> Composition des bétons de sable autoplaçant utilisés (Kg/m <sup>3</sup> ).....	40

---

# **Introduction générale**

---

## Introduction générale

Face à la demande croissante en matériaux et à la nécessité de préserver l'environnement dans une optique de développement durable, il devient impératif d'explorer et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels, notamment dans le domaine du génie civil.

Les déchets de pneumatiques constituent une source inépuisable, en raison de leur lien direct avec l'industrie automobile et celle des engins mécaniques, deux secteurs en pleine expansion liés à la croissance économique et démographique.

Par ailleurs, le secteur du bâtiment génère également une quantité importante de déchets, issus principalement des travaux de construction, de réhabilitation et de démolition. Ces déchets représentent une part considérable des déchets produits, et leur volume peut être fortement accru en cas de catastrophes naturelles, telles que les séismes, qui produisent notamment d'importantes quantités de déchets céramiques. Dans le premier chapitre, une revue bibliographique a été réalisée, abordant les généralités sur les déchets (définitions, typologies, gestion), ainsi que les différentes filières de valorisation dans le secteur du génie civil. Une attention particulière a été portée aux déchets céramiques et aux déchets de caoutchouc provenant de pneus usagés, en détaillant leur composition. Une synthèse des recherches menées sur les bétons de sable incorporant des granulats de caoutchouc et des déchets céramiques y est également présentée, mettant en évidence les propriétés des différents bétons élaborés.

Le deuxième chapitre présente les matériaux utilisés dans l'étude (sable, ciment, eau, granulats de caoutchouc, déchets de céramique, adjuvants), ainsi que les formulations expérimentales retenues et les protocoles d'essai appliqués.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux et à leur interprétation. Il évalue l'influence de la composition des bétons de sable autoplaçants intégrant des déchets de céramiques (selon différents taux de substitution), ainsi que celle des granulats de caoutchouc, sur les propriétés physico-mécaniques des bétons.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux apports de ce travail et démontre la faisabilité de la fabrication d'un béton intégrant deux types de déchets solides. Des perspectives de recherche sont également proposées pour approfondir les pistes ouvertes par cette étude.

---

# **Chapitre I :**

# **Synthèse bibliographique**

---

## I.1. Introduction

Le présent chapitre est une synthèse bibliographies des travaux de recherches réalisés sur le comportement du béton de sable autoplaçants. Sera divisé en trois parties. La première portera sur la description de la problématique des déchets, issus de pneus usagés et déchets de céramique et Sable de dune et leur valorisation dans le domaine des matériaux de construction à matrice cimentaire. Alors que la deuxième partie nous renseigne sur les constituants du béton de sable autoplaçants, la troisième partie est consacrée à l'influence des granulats des matériaux utilisés dans le mélange de béton de sable sur les propriétés aux états frais et durcis des matériaux cimentaires. Enfin, on termine par les résultats de l'étude de l'influence des granulats sur le comportement des bétons de sable autoplaçants.

## I.2. Déchet de caoutchouc

### I.2.1. Historique sur le déchet de caoutchouc

La véritable histoire du caoutchouc débute bien avant la fin du XV<sup>e</sup> siècle, lorsqu'à la suite des Grandes découvertes, les Européens commencent à observer, en Amérique centrale et en Amérique du Sud, l'usage séculaire que font les populations autochtones d'une matière alors inconnue en Europe. Provenant du latex issu de différentes plantes - dont l'hévéa et le guayule - les Amérindiens confectionnent des objets courants, fabriqués par moulage sur argile : balles, toiles enduites, torches, qu'ils rendent étanches en les passant à la fumée. Ils en consomment aussi comme médicament et l'associent aux mythes de création, de la course du monde : dans le << juego de pelota >> (jeu de balle précolombien), la balle en caoutchouc (appelée « ulli de Olin » - mouvement en nahuatl - et « kick » en maya - liquide séminale), avec son rebondissement incessant, mime la course du Soleil. La matière caoutchouc devient ainsi sacrée

- ✚ 1736 et 1747 : les naturalistes français Charles Marie de La Condamne et François Fresneau de la Gataudière redécouvrent le caoutchouc naturel lors de leurs expéditions au Pérou, en Équateur et en Guyane. La Condamne en réalise la première description qui pleure ». Fresneau, quant à lui, identifie l'hévéa comme une source de ce latex. En 1770, le chimiste anglais Joseph Priestley découvre que le caoutchouc peut effacer les traces d'encre en le frottant sur du papier, ouvrant la voie à la fabrication des premières gommes à effacer.
- ✚ 1783, le chimiste français Jacques Charles, en compétition avec les frères Montgolfier pour réaliser le premier vol habité, conçoit un ballon – appelé à l'époque globe – dont l'étoffe de soie est imperméabilisée avec un vernis à base de caoutchouc.
- ✚ En 1811, l'Autrichien Johann Nepomuk Reithoffer développe les premiers produits en caoutchouc, comme des tissus et des lacets.

- ✚ En 1842, l'Américain Charles Goodyear découvre le procédé de vulcanisation, qui stabilise le caoutchouc en le rendant plus résistant aux variations de température, empêchant ainsi qu'il ne fonde sous la chaleur ou ne devienne cassant par temps froid.
- ✚ Enfin, le 10 décembre 1845, l'Écossais Robert William Thomson invente la roue aérienne, premier prototype de pneu. Toutefois, cette innovation ne trouve pas immédiatement son application, car elle ne convient pas aux chariots lourds et tombe rapidement dans l'oubli.
- ✚ 1854 : Hiram Hutchinson ouvre la première usine utilisant le caoutchouc en France, dans l'usine de L'anglée, à Châlette-sur-Loing (Loiret).
- ✚ 1868 : Invention des pneus pleins pour vélocipèdes
- ✚ 1870 : Apparition des premiers préservatifs à base de caoutchouc de latex.
- ✚ 23 juillet 1888 : John Boyd Dunlop dépose un brevet qui permet d'utiliser le caoutchouc pour la fabrication de pneus<sup>2</sup>. C'est la naissance du pneu à valve. L'invention des pneus (appuyée plus tard par l'explosion de la production automobile) et le succès des bicyclettes provoquent le boom de la production du caoutchouc à la fin du XIXe siècle
- ✚ 24 juillet 1904 : Création d'une commission internationale pour enquêter sur les pratiques utilisées dans la production du caoutchouc,
- ✚ 1907 : Synthèse de caoutchouc par l'Allemand Fritz Hofmann. 1980 : Le guayule naturel mexicain peut être mécanisable avec un rendement supérieur à l'hévéa.
- ✚ 2003 : Amerityre Corporation développe les pneus increvables (no-flat, air-no-air), basés sur le polyuréthane.

### **I.2.2. Définition**

Le caoutchouc, également appelé familièrement un caoutchouc, est une matière composée d'un mélange contenant un polymère de base pouvant être moulé ou façonné, généralement sous l'effet de la chaleur et de la pression, afin de produire un objet ou un produit semi-fini. À l'instar des matières plastiques, il est souvent issu de combustibles fossiles. Un élastomère se distingue par sa grande capacité de déformation élastique sous contrainte, retrouvant sa forme initiale sans aucune déformation permanente. Il s'agit d'un polymère aux propriétés élastiques, obtenues après réticulation, lui permettant de supporter des déformations considérables avant rupture. Le terme caoutchouc est couramment utilisé comme synonyme d'élastomère.

### **I.2.3. Composition chimique d'un caoutchouc**

La matière caoutchouc est généralement constituée de trois principaux composants

- Une résine de base, composée de polymères.

- Des adjuvants.
- Des additifs [1].

### I.3. Caoutchouc des pneus

#### I.3.1. Les pneumatiques usagés

Les importations d'Algérie en pneumatiques sont estimées à environ 7 millions d'unités par an, destinées à satisfaire les besoins du parc automobile national, selon une déclaration faite par le Premier ministre Ahmed Ouyahia le 21 juin 2018 à Alger. Parallèlement, le volume des déchets issus des activités industrielles continue d'augmenter tant en quantité qu'en diversité. Parmi ces déchets, les pneus usagés occupent une place croissante en raison du développement constant de l'industrie automobile [2]

Selon les données publiées par des associations de fabricants de pneumatiques, la production mondiale annuelle s'élève à environ 1,4 milliard de pneus, générant près de 17 millions de tonnes de pneus usagés chaque année. Bien que ces derniers soient classés comme déchets ordinaires selon les normes européennes, ils représentent néanmoins un défi environnemental majeur en raison de leur volume important, de la difficulté de leur traitement par certaines méthodes conventionnelles, ainsi que de leur résistance à la biodégradation.

Les pneus usagés sont considérés comme des matériaux non biodégradables en raison de leur résistance aux agressions physico-chimiques. Leur composition complexe associe du caoutchouc naturel et synthétique, enrichie de plusieurs additifs visant à améliorer leurs propriétés en matière de durabilité et de sécurité (voir tableau I.1). Selon leur état de dégradation, ces déchets peuvent être classés en deux grandes catégories.

**Tableau I.1.** Composition chimique de pneu.

<b>Matière</b>	<b>Pourcentage dans un pneu</b>
Élastomères	43 à 47 %
Noir de carbone	21 %
Acier	16 à 27 %
Textile	0 à 5,5 %
Oxyde de zinc	1 %
Soufre	1 %
Additifs	6 à 7,5 %

#### I.3.1.1. Les pneus usagés Réutilisables (PUR)

La réutilisation des pneus usagés constitue une stratégie essentielle pour réduire la quantité de déchets en caoutchouc. Deux principales filières sont généralement mises en œuvre. La première consiste en le rechapage, une technique qui permet de remplacer la bande de

roulement usée, particulièrement utilisée pour les pneus de poids lourds et d'engins de chantier. La seconde filière repose sur la commercialisation des pneus usagés sur le marché local ou leur exportation, à condition qu'ils présentent encore une profondeur de sculpture conforme aux normes en vigueur. Ces deux approches contribuent à prolonger la durée de vie des pneus et à limiter leur mise en décharge.

### **I.3.1.2. Les pneus non réutilisables (PUNR)**

Dans un contexte marqué par l'augmentation de la production de déchets industriels et l'exploitation croissante des ressources naturelles non renouvelables, les pneus usagés issus de l'industrie automobile connaissent une hausse constante en raison de l'utilisation intensive des véhicules industriels. D'après des statistiques récentes, la production mondiale annuelle de ces déchets est estimée à environ 17 millions de tonnes. Face aux initiatives mondiales visant à réduire la pollution atmosphérique, il devient impératif d'adopter des méthodes écologiques pour leur élimination afin de préserver l'environnement [3], [4].

La gestion des déchets de pneus usagés repose désormais sur leur valorisation, privilégiant le réemploi, le recyclage et toute autre action permettant d'en extraire des matériaux réutilisables. Le recyclage sous forme de granulats pour la construction apparaît ainsi comme une alternative économique et écologique aux granulats minéraux conventionnels, dont les ressources s'amenuisent [5], [6]. Grâce à ses propriétés remarquables, notamment sa durabilité, son imperméabilité et sa capacité d'absorption des chocs, le caoutchouc des pneus usagés peut être intégré dans les matériaux cimentaires pour améliorer certaines de leurs caractéristiques, telles que l'étanchéité, l'isolation acoustique et thermique, qui est souvent insuffisantes dans les matériaux classiques [4], [7].

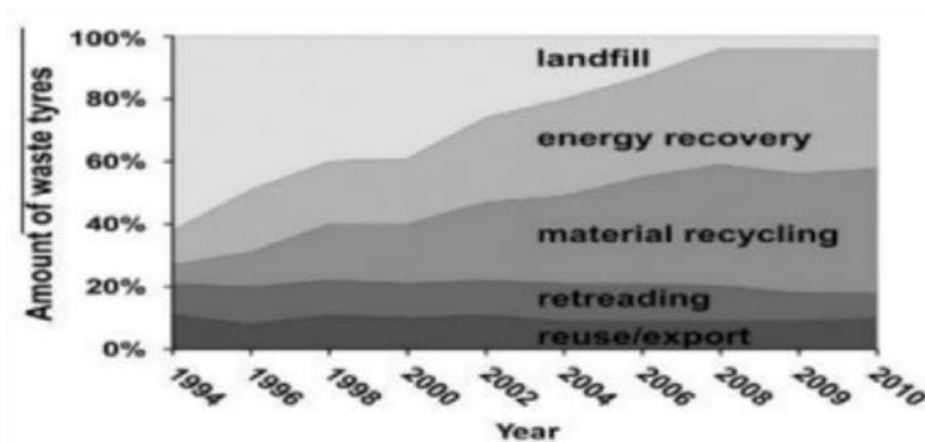
Les pneus usagés non adaptés au rechapage sont souvent recyclés en génie civil pour réduire leur impact environnemental. Transformés en granulats de caoutchouc, ils servent à la fabrication de revêtements de sol, d'isolants acoustiques, de barrières de sécurité et de remblais. Leur mise en décharge présente des risques majeurs, notamment en cas d'incendie, libérant des substances toxiques et menaçant l'air, l'eau et la santé publique, comme l'a illustré l'incendie d'Hager ville au Canada. De plus, l'eau de pluie stagnante dans les pneus favorise la prolifération de moustiques vecteurs de maladies.



**Figure I.1.** Les risques de feu dans les décharges des pneus usagés [8].

### I.3.1.3. Valorisation des pneumatiques usagés

La valorisation des déchets désigne l'ensemble des traitements permettant de leur donner une seconde vie en leur conférant une valeur économique positive. Face aux divers risques évoqués précédemment, le recyclage des pneus usagés devient une nécessité pour limiter leur impact environnemental. En Europe, l'interdiction de leur stockage dans les décharges publiques a favorisé le développement de différentes méthodes de valorisation. Cette approche vise à optimiser leur utilisation en les transformant soit en source d'énergie, soit en sous-produits réutilisables dans divers secteurs, comme l'illustre la Figure 1.2



**Figure I.2.** La progression des activités de valorisation des pneus usagés.

### I.3.1.4. Valorisation est domaine d'application des pneumatiques

La dispersion des déchets de pneus complique leur collecte et leur valorisation, ce qui en fait une source de pollution pour l'environnement. Leur accumulation sous forme de dépôts sauvages et leur combustion, générant des fumées toxiques, aggravent ces nuisances. De plus, leur mise en décharge représente un gaspillage de ressources et d'énergie. Toutefois, les pneus usagés peuvent être intégrés dans diverses filières de valorisation [9].

#### a) Le réemploi :

Rechapage, revente d'occasion et réutilisation en ensilage par les agriculteurs.

**b) La valorisation énergétique**

Le caoutchouc possède un pouvoir calorifique élevé, ce qui fait des déchets de pneus un combustible de qualité adapté aux cimenteries et aux chaudières industrielles. [9].

**c) La valorisation en matière**

Broyage en poudrette pour une utilisation en revêtement de sol. [9].

**d) La valorisation en travaux publics**

Le broyage des pneus usagés permet leur réutilisation dans divers domaines tels que les remblais, le renforcement des digues et le recyclage sous forme de fragments ou de granulats pour des applications comme les enrobés. Les granulats en caoutchouc issus du broyage des pneus usagés peuvent être utilisés en substitution volumique des granulats naturels dans la fabrication du béton [10].

**I.3.1.5. Propriétés de matière caoutchouc**

Le caoutchouc brut, également appelé latex coagulé, est un polymère naturel de couleur blanche ou incolore, dont l'unité de base est l'isoprène ( $C_5H_8$ ). À une température d'environ  $-195\text{ °C}$  (température de l'air liquide), il se présente sous forme d'un solide dur et transparent. Entre  $0\text{ °C}$  et  $10\text{ °C}$ , il devient cassant et opaque, tandis qu'au-delà de  $20\text{ °C}$ , il acquiert une texture souple, élastique et translucide. Lorsqu'il est soumis à un malaxage mécanique ou chauffé au-delà de  $50\text{ °C}$ , il devient plastique et adhésif. À des températures supérieures à  $200\text{ °C}$ , il se décompose [11].

Le caoutchouc brut est insoluble dans l'eau, ainsi que dans les bases et les acides faibles. En revanche, il se dissout dans le benzène, le pétrole, les hydrocarbures chlorés et le sulfure de carbone. Il est sensible à l'oxydation, réagissant facilement avec les oxydants chimiques et lentement avec l'oxygène de l'air.



**Figure I.3.** L'arbre tropical Hévéa (Arbre à caoutchouc).

### I.3.1.6. Chiffre

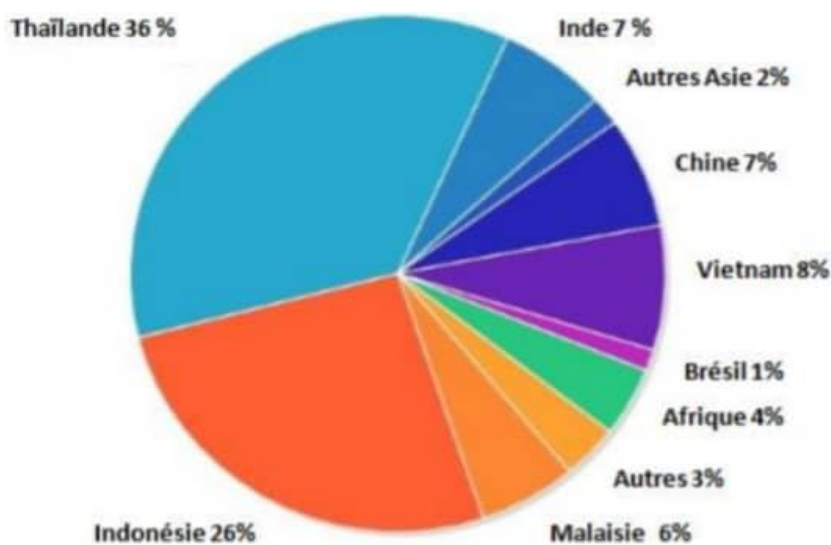
La production mondiale de caoutchouc atteint environ 10,9 millions de tonnes par an, ce qui correspond à un débit continu d'environ 340 kilogrammes de caoutchouc par seconde si l'on considère un compteur. Cette production considérable provient principalement des hévéas, également connus sous le nom d'arbres à caoutchouc, cultivés dans différentes régions tropicales à travers le monde.

Une part importante de la production de caoutchouc est destinée à l'industrie automobile, notamment pour la fabrication de pneumatiques. Ces derniers constituent l'une des principales utilisations du caoutchouc à l'échelle mondiale, grâce à leurs propriétés d'adhérence, de résistance à l'usure et de flexibilité, essentielles pour garantir la sécurité et les performances des véhicules sur la route [12].

**Tableau I.2.** Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde.

Région	Productions en milliers de tonne
Asie-Océanie	7065
Union européenne	2481
Amérique du nord	2458
Reste de l'Europe	1403
Amérique latine	653
Afrique	66

La production mondiale de caoutchouc naturel s'est élevée à 11,8 millions de tonnes en 2014. La part de l'Asie dans ce chiffre est supérieure à 91%.



**Figure I.4.** La production mondiale de caoutchouc naturel en 2014 [13]

### **I.3.1.7. Recyclage de caoutchouc**

Le recyclage des caoutchoucs pose plusieurs défis, tant sur les plans économique que technique. La consommation apparente de produits finis vulcanisés se divise principalement en deux grandes catégories : les déchets de pneumatiques, qui constituent environ 60 %, et les déchets de caoutchouc industriel, représentant près de 40 % [14].

#### **a) Collecte et tri**

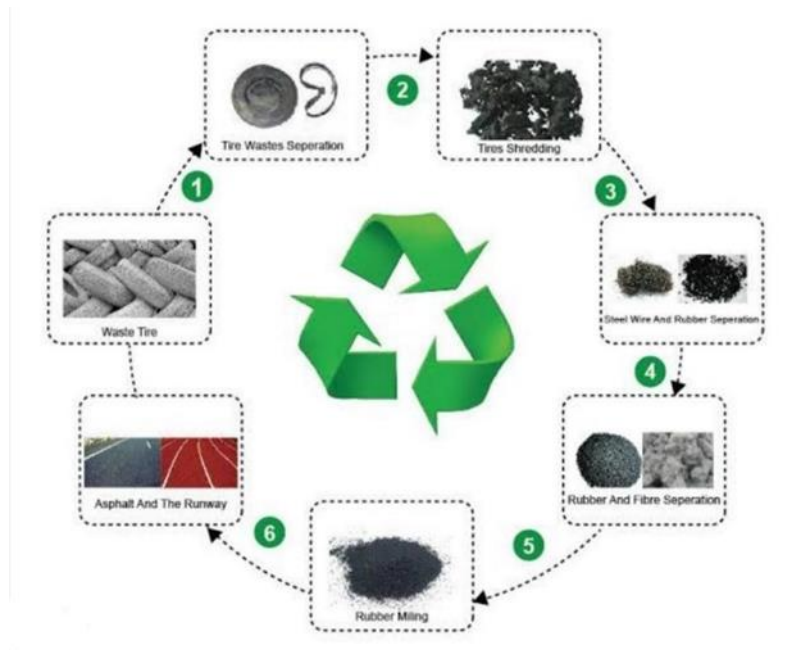
Le recyclage du caoutchouc débute par la collecte et le tri des pneus usagés. Différents systèmes de récupération, tels que des points de dépôt, des collaborations avec les distributeurs de pneus et des programmes gouvernementaux, sont mis en place pour encourager une gestion responsable de ces déchets. Dans les centres de tri, des technologies avancées permettent de séparer le caoutchouc des autres composants, comme le métal et le textile. Cette phase initiale est essentielle pour assurer un recyclage efficace en garantissant un flux de caoutchouc propre et homogène [15].

#### **b) Broyage et granulation**

Après leur collecte et leur tri, les pneus sont soumis à des processus de broyage et de granulation. Le déchiquetage, réalisé à l'aide de machines spécialisées, permet de découper les pneus en fragments plus petits. Ces morceaux de caoutchouc sont ensuite granulés pour obtenir des particules ou du caoutchouc sous forme de granulés. Cette réduction de taille augmente la surface du matériau, facilitant ainsi son utilisation dans les étapes ultérieures du recyclage [15].

#### **c) Vulcanisation et réutilisation**

La vulcanisation et la valorisation jouent un rôle essentiel dans le recyclage du caoutchouc. La vulcanisation est un procédé permettant de décomposer les polymères du caoutchouc afin de les rendre réutilisables dans de nouvelles applications. Ce processus repose sur l'application de chaleur et de pression pour modifier la structure du caoutchouc et lui conférer une plus grande flexibilité. Quant à la valorisation, elle consiste à exploiter le caoutchouc dé vulcanisé pour fabriquer divers produits, tels que l'asphalte caoutchouté utilisé dans les infrastructures routières, les revêtements de surfaces sportives et d'autres articles en caoutchouc [15].



**FigureI.5.** Processus de recyclage de déchets de caoutchouc [16].

### I.3.2. Exemples concrets d'utilisation de déchets de caoutchouc dans la construction

Dans le désert de Taos, aux États-Unis, où les températures varient entre  $-30^{\circ}\text{C}$  et  $+50^{\circ}\text{C}$ , l'architecte Mickael Reynolds a imaginé une maison entièrement construite à partir de matériaux recyclés locaux. Il réside depuis vingt ans dans une maison entièrement construite à partir de pneus et de bouteilles recyclés. Grâce à l'énergie solaire et éolienne, elle est presque autonome sur le plan énergétique et dispos d'un système de récupération d'eau chauffé par le soleil [17].



**FigureI.6.** Exemples concrets d'utilisation de déchets de caoutchouc dans la construction.

Les granulats en caoutchouc sont utilisés pour l'isolation et l'amortissement dans les terrains de tennis par exemple ils sont utilisés aussi comme matière première des matériaux de construction



**Figure I.7.** Exemple d'utilisation des caoutchoucs recyclés.

### **I.3.3. Avantages d'utilisation du caoutchouc recyclé dans les bétons**

L'intégration des granulats en caoutchouc dans le béton présente de nombreux avantages dans le domaine du génie civil, notamment :

- ❖ La valorisation des déchets de caoutchouc et de pneumatiques, réduisant ainsi les coûts liés à leur mise en décharge ou à leur incinération.
- ❖ Une excellente capacité d'absorption des vibrations mécaniques.
- ❖ Une utilisation efficace pour l'amortissement et l'isolation.
- ❖ Excellents résultats aux tests HIC
- ❖ Une flexibilité durable dans le temps.
- ❖ Une performance optimale en matière d'amortissement.
- ❖ Une capacité calorifique élevée.

### **I.3.4. Les déchets du caoutchouc en Algérie**

Depuis 2004, l'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc par an, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Étant donné que chaque pneu neuf vendu équivaut à un pneu usagé en fin de vie et en tenant compte de la perte de masse due à l'usure, la quantité de pneus usagés générée annuellement est estimée à environ 45,65 milliers de tonnes.



**Figure I.8.** Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail [18].

Le nombre de pneus usagés ne cesse d'augmenter chaque année en raison de l'expansion du parc automobile. Avec l'application de la loi sur la gestion des déchets, l'élimination écologique des déchets spéciaux est désormais une obligation.

En Algérie, la valorisation des pneus usés dans le domaine du génie civil représente la principale voie de recyclage. Ces matériaux, bien que non biodégradables, ne sont pas toxiques une fois enfouis. Leur association avec le sol permet de résoudre divers défis auxquels font face les ingénieurs en génie civil. Parmi les méthodes de valorisation, la technique du Pneusol se distingue par sa rentabilité, car elle ne requiert ni équipements spécifiques ni main-d'œuvre qualifiée. Déjà mise en œuvre en Algérie, cette approche promet un avenir prometteur [18].

## **I.4. Béton de déchets de caoutchouc**

### **I.4.1. Définition**

Le béton de déchets de caoutchouc est obtenu en incorporant dans la masse de béton des éléments qui sont les déchets plastiques composante de forme et de nature diverses

### **I.4.2. Propriété du béton de déchets de caoutchouc**

#### **Propriétés à l'état frais**

**a) L'ouvrabilité :** L'ouvrabilité est une propriété fondamentale des matériaux cimentaires à l'état frais. Elle est évaluée, en fonction de la nature du matériau étudié, par l'essai d'affaissement ou d'étalement, permettant ainsi d'apprécier le degré de fluidité de la pâte de béton et sa facilité de mise en œuvre. Les travaux de Khatib et al. (1999) sur la faisabilité des bétons contenant du caoutchouc ont mis en évidence une diminution progressive de leur ouvrabilité à mesure que le taux de granulats de caoutchouc augmente (Figure I.9). Cette

tendance s'explique par la rigidité des granulats de caoutchouc. Des études récentes ont confirmé ce comportement pour divers composites cimentaires

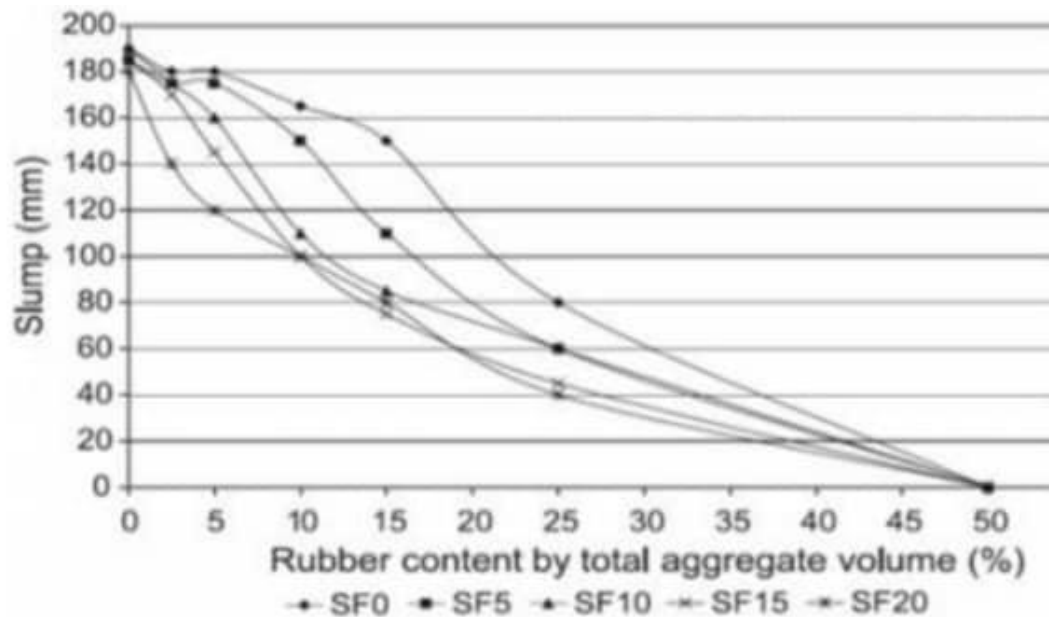


Figure I.9. Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement [19].

### B) La masse volumique à l'état frais

Les recherches menées par Bravo et al. (2012) sur l'évolution de la masse volumique des bétons incorporant du caoutchouc, en remplacement partiel des granulats silico-calcaires à densité relativement élevée par des granulats de caoutchouc à faible densité, ont montré que la densité du béton frais diminue à mesure que le taux de granulats de caoutchouc augmente. Cette réduction s'explique par la faible densité des granulats de caoutchouc (Figure I.10).

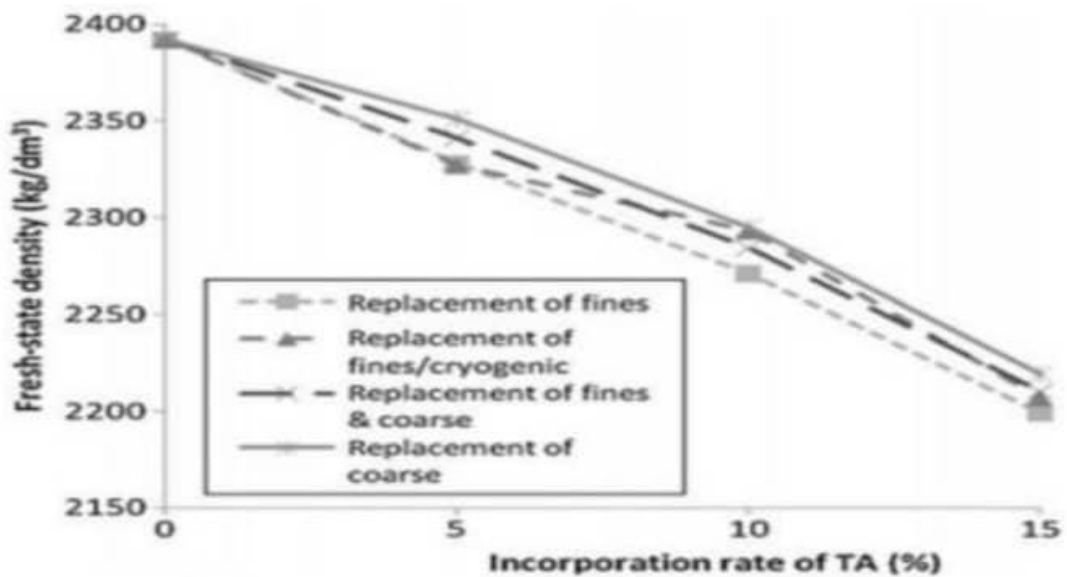


Figure I. 10 : L'influence des GCR sur la masse volumique du béton.

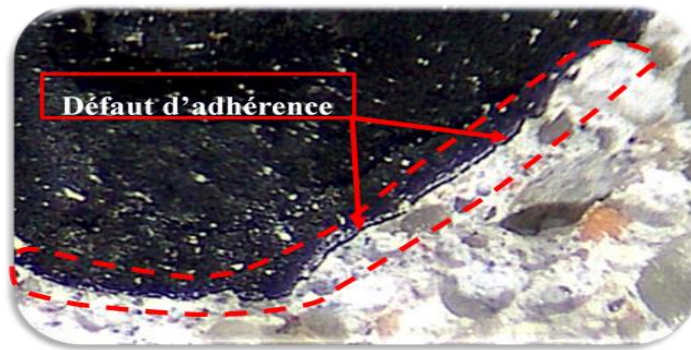
### I.4.3. Propriétés à l'état durci

#### Résistance en compression

La résistance en compression à un âge donné est la caractéristique principale des matériaux cimentaires durcis. Le béton, qui présente de bonnes performances en compression, nécessite une connaissance approfondie de ses propriétés mécaniques pour assurer un dimensionnement optimal des ouvrages. Ainsi, l'analyse de cette résistance permet d'évaluer globalement la qualité du béton.

De nombreux paramètres influencent la résistance en compression du béton, notamment la nature et le dosage des matériaux, les caractéristiques des granulats, la porosité, ainsi que les conditions de mise en œuvre et de cure. Lorsqu'une partie des granulats naturels est remplacée par des granulats de caoutchouc (G.C.), ces derniers, présentant des différences notables en termes de nature, de forme, de densité et de propriétés physiques, modifient inévitablement les caractéristiques du matériau composite obtenu [20].

Les études récentes sur les matériaux cimentaires incorporant des G.C. ont systématiquement mis en évidence une diminution de la résistance en compression due à cette substitution. L'observation au vidéo microscope révèle un défaut d'adhérence marqué ainsi qu'une zone de transition plus large entre la matrice cimentaire et les particules de caoutchouc. La photographie de la Figure I.11 illustre cet effet, qui contribue à une augmentation de la porosité globale du composite et, par conséquent, à réduction de sa résistance en compression [21].



**Figure I.11.**Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissement x100) [20]

## I.5.Déchets de céramique

### I.5.1. Définition

Les céramiques sont des matériaux inorganiques constitués d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures. Elles se caractérisent par des liaisons chimiques fortes, de nature ionique ou covalente. Leur mise en forme repose sur l'agglomération d'une poudre de granulométrie appropriée, suivie d'une densification et d'une consolidation obtenues par un traitement thermique appelé frittage. Contrairement aux verres, les céramiques, en particulier les plus anciennes, présentent généralement deux phases distinctes : une matrice vitreuse désordonnée et une phase cristalline ordonnée [21].



**Figure I.12.** Déchets de céramique de en oued souf- Algérie.

## I.5.2. Les différents types de céramiques

On distingue deux types des céramiques :

### I.5.2.1. Les céramiques traditionnelles

Les céramiques traditionnelles sont élaborées à partir de ressources naturelles comme l'argile, le kaolin et le quartz. Ces matériaux sont généralement façonnés par des procédés tels que le moulage. Parmi les types courants, on retrouve la faïence, la terre cuite — utilisée notamment dans les briques de construction — ainsi que la porcelaine, largement employée pour la fabrication de vaisselle et d'objets décoratifs [22].

### I.5.2.2. Les céramiques techniques

Les céramiques techniques désignent des matériaux récents mis au point dans les laboratoires de recherche pour leurs propriétés physiques et chimiques remarquables. Leur fabrication repose principalement sur des procédés tels que le frittage, un traitement thermomécanique réalisé dans des fours spécifiques permettant la cohésion des particules de poudre à partir d'un aggloméré préparé à froid, ou encore l'électro fusion, qui consiste à couler directement les oxydes en fusion dans un moule [22].



**Figure I.13** : Exemple des céramiques traditionnelles

### I.5.3. Technologie de fabrication d'une céramique

Le terme « céramique » ne désigne pas une composition chimique spécifique, mais plutôt un matériau généralement poly cristallin et densifié, obtenu par un procédé de fabrication particulier. Dans le langage courant, il est souvent associé à des objets du quotidien tels que les carrelages, les sanitaires ou la vaisselle. Cependant, dans le domaine des céramiques techniques, notamment en électronique, la maîtrise des processus d'élaboration permet d'obtenir des propriétés optimisées, adaptées à une large gamme d'applications, allant de la résistance mécanique aux caractéristiques électriques, diélectriques et magnétiques.

Les principales étapes de fabrication des céramiques sont synthétisées dans l'organigramme suivant :

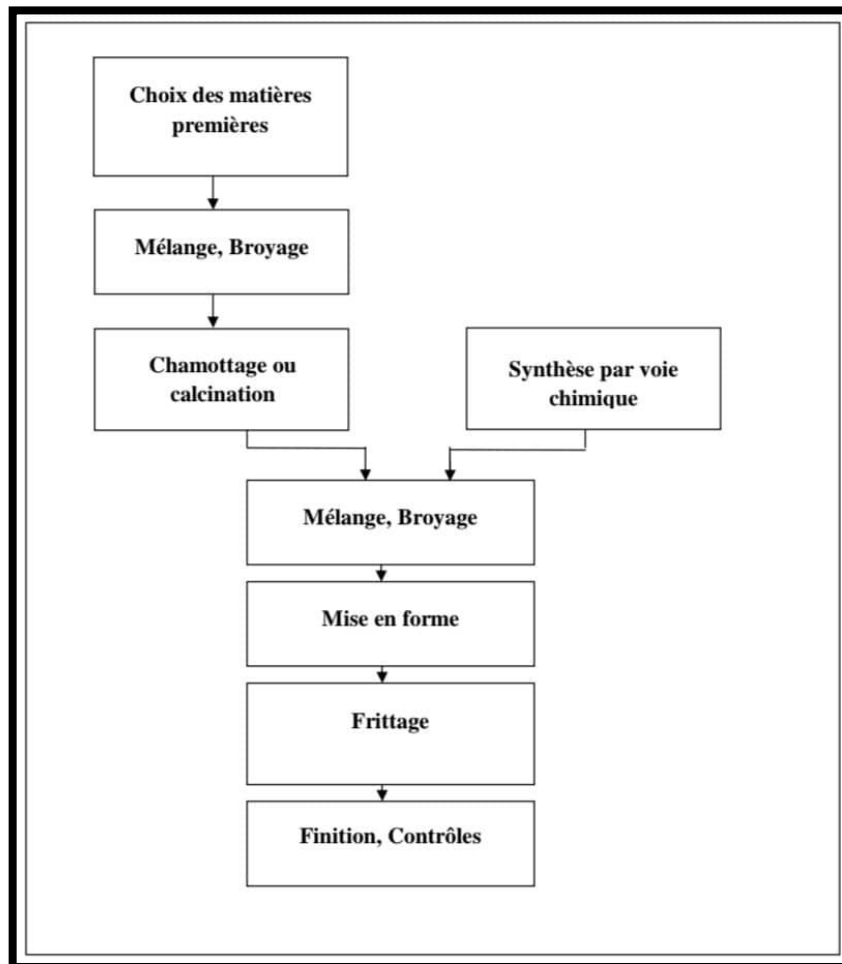
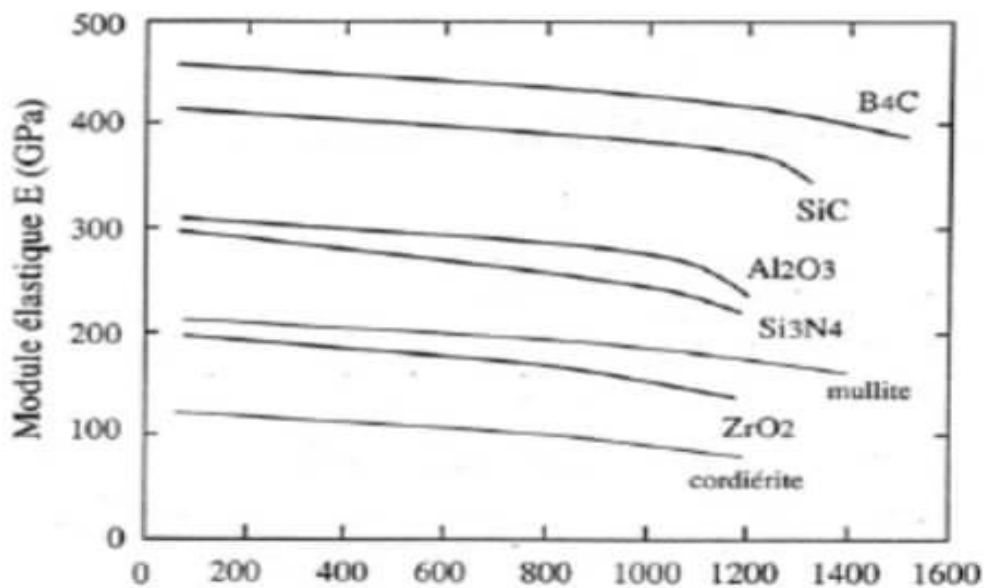


Figure I.14. Différentes étapes d'élaboration des céramiques [23].

## I.5.4. Propriétés des céramiques

### I.5.4.1. Propriétés mécaniques

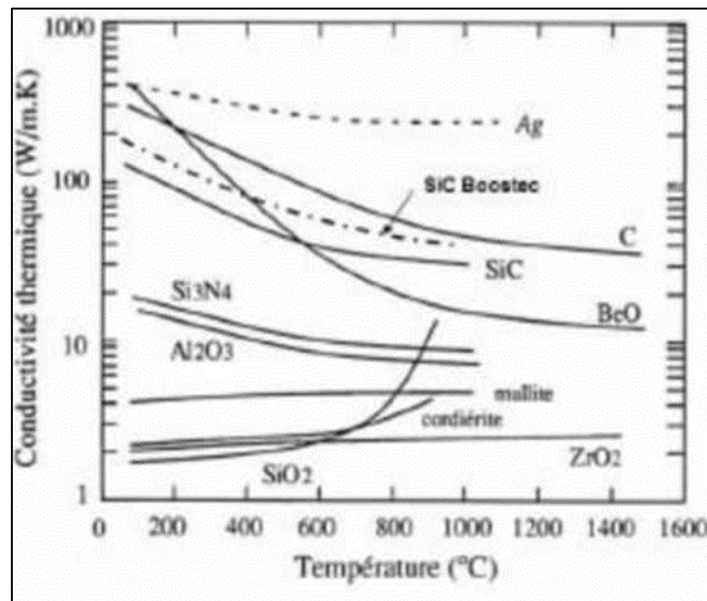
La dureté des céramiques est très élevée ; la limite élastique est très faible leur module de Young à la température ambiante est compris entre 300 et 400GPa et la résistance à la compression entre  $2.10$  et  $30.10^3$  Pa. La figure 1.15 montre que le module de Young diminue avec la température



**Figure. I.15** : Influence de la température sur le module d'Young de différentes céramiques [24].

### I.5.4.2 Propriétés thermiques

Les céramiques se distinguent par leur capacité à résister à des températures élevées. Leur point de fusion atteint environ 2050 °C. La chaleur spécifique, la conductivité thermique ainsi que le coefficient de dilatation thermique augmentent avec la température. La figure 1.3 présente l'évolution de la conductivité thermique des matériaux en fonction de la température.



**Figure. I.16 :** Conductibilité thermique des matériaux en fonction de la température [24].

### I.5.5. Produits céramiques dans la construction

Dans le domaine du génie civil, une variété de produits céramiques est employée pour diverses applications, notamment les briques, les tuiles, les carreaux de revêtement, les tubes de drainage et les matériaux réfractaires. Chaque produit est conçu à l'aide de procédés spécifiques visant à lui conférer les propriétés adaptées à son usage particulier

Par exemple, les briques de construction sont généralement fabriquées à partir d'un mélange d'argile et d'autres composantes, puis soumises à une cuisson à haute température afin d'acquérir solidités et durabilité. Quant à

Un carreau de revêtement, leur composition et leur processus de cuisson sont ajustés pour leur conférer des propriétés spécifiques, telles qu'une meilleure résistance à l'abrasion ou aux conditions climatiques.

En optimisant les paramètres de fabrication, les produits céramiques peuvent être conçus pour s'adapter à diverses applications en génie civil, fournissant ainsi des solutions durables et performantes pour la construction et l'aménagement de l'environnement bâti.

## **I.6. Différents déchets utilisés en génie civil**

En général, les déchets sont classés en cinq catégories, comme illustré ci-dessous. Toutefois, en génie civil, seuls certains types de déchets sont exploitables, notamment les déchets inertes, les déchets ménagers et, sous certaines conditions, les déchets issus de sous-produits industriels [25].

### **A) Déchets inertes**

Tout déchet n'engendrant aucune réaction physique ou chimique, tel que ceux issus de l'exploitation des carrières et des mines, ainsi que des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, et qui ne contiennent ni ne sont contaminés par des substances dangereuses ou d'autres éléments.

### **B) les déchets ménagers**

Les déchets ménagers désignent l'ensemble des déchets générés par les foyers ainsi que ceux assimilés, provenant de certaines collectivités et commerces. Ils regroupent les ordures ménagères non recyclables ou en attente de recyclage, les déchets recyclables secs tels que les journaux, papiers, cartons, magazines, verre, aluminium et plastique, ainsi que les déchets recyclables humides, également appelés organiques ou fermentescibles, incluant les résidus alimentaires, les végétaux et le bois.

### **C) Les déchets industriels banals (D.I.B.)**

Ensemble des déchets non inertes et non dangereux produits par les entreprises, industries, commerces, artisans et prestataires de services, comprenant notamment les ferrailles, les métaux non ferreux, le papier et le carton, le verre, les textiles, le bois, les plastiques, et autres matériaux.

### **D) Déchets toxiques**

Un déchet toxique est un résidu pouvant nuire à la santé des êtres vivants. Ces déchets proviennent généralement des industries et des usines, représentant un risque pour l'environnement et la santé humaine.

## **I.7. Recyclage**

Depuis plusieurs décennies, la quantité de déchets générée par habitant dans le monde ne cesse d'augmenter, constituant une menace pour l'environnement. Autrefois, la seule solution consistait à éliminer ces déchets par incinération ou enfouissement. Cependant, les mentalités ont récemment évolué, et au lieu de nous en débarrasser systématiquement, nous avons choisi d'en valoriser une grande partie. Cela signifie les transformer afin de les réutiliser, permettant ainsi une économie de matières premières.

Ce processus contribue à la préservation des ressources naturelles de la planète et à la réduction de la pollution de l'air et des sols. Parmi les nombreux avantages environnementaux et économiques du recyclage, on peut citer :

- Protection de l'environnement
- Préservation de ressources naturelles
- La réduction des volumes de déchets destinés à la mise en décharge et à l'incinération, un processus qui contribue à limiter la pollution des sols et de l'air
- Création d'emplois.
- La réduction des nuisances liées au transport des matières premières permet de diminuer la consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub>, tout en préservant l'état du réseau routier.

## **I.8. Sable de dunes**

### **I.8.1. Définition d'un sable de dunes**

Les sables présents dans les dunes mouvantes sont constitués de particules siliceuses de dimensions réduites et relativement uniformes. Ils s'accumulent sous forme de dunes aux hauteurs variables. Selon Fookes et Higginbotham (1968) [26].

Le Sahara est composée d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines arides et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts et d'autres formations naturelles. Couvrant près d'un tiers du continent africain, cette vaste étendue reste peu équipée en infrastructures. Ces proportions soulignent l'importance du développement des routes sahariennes et la nécessité de valoriser les matériaux locaux, notamment le sable, dans toute étude visant à améliorer les constructions dans cette région [27].



**Figure I.17.** Sable de dunes en oued souf- Algérie.

### **I.8.2.Mécanismes de formation de dune**

Les dunes se forment dans des environnements où le sable est abondant et non stabilisé par la végétation, comme les déserts, les plages ou les lits fluviaux en période d'étiage. Le vent érode et emporte les particules de sable par un processus de déflation. Transporté près du sol par saltation, le sable s'accumule lorsque la force du vent diminue, notamment sur le versant sous le vent. La dune se déplace progressivement sous l'effet de l'érosion sur son versant exposé au vent et de l'accumulation de sable sur le versant opposé.

### **I.8.3.Types des dunes**

#### **I.8.3.1. Les avant-dunes (fore dune)**

Les avant-dunes sont des formations sableuses situées en bordure de la plage, formant des bourrelets parallèles au littoral et stabilisés, en partie ou totalement, par la végétation, comme les oyats. Elles font partie intégrante du système sédimentaire côtier, interagissant continuellement avec la plage par des échanges de sable. Il ne faut pas les confondre avec d'anciennes dunes arrière en érosion ou des dunes constituées de sable provenant de l'intérieur des terres, là où une avant-dune active ne pourrait se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement intégrées au domaine public maritime, ce qui en facilite la protection. Leur formation résulte de l'accumulation et de la fixation du sable en haut de plage, favorisée par des plantes pionnières adaptées aux conditions côtières.

### **I.8.3.2. Les falaises dunaires**

Les falaises dunaires ne constituent pas une véritable dune, mais plutôt un profil façonné par l'érosion marine d'une ancienne dune stabilisée par une végétation herbacée ou un boisement. Ce processus a conduit à la formation d'une couche d'humus ou d'un sol sableux

### **I.8.3.3. Les dunes *perchées***

Les dunes perchées, appelées Cliff-top dunes en anglais, se forment au sommet d'une falaise vive. Elles sont alimentées en sable par le vent, provenant soit de l'estran, soit du profil de pente, notamment dans le cas des falaises dunaires.

### **I.8.3.4. Les cordons dunaires artificiels**

Les cordons dunaires artificiels, conçus par l'homme principalement pour protéger les zones côtières ou les espaces aménagés, requièrent un entretien constant afin de préserver leur intégrité. Sans cet entretien, ils se dégradent en quelques décennies. Certains de ces cordons sont semi-naturels, comme les avant-dunes partiellement altérées et restaurées à l'aide d'engins et stabilisées par des oyats, à Sangatte, dans le nord de la France.

## **I.8.4. Physique des dunes**

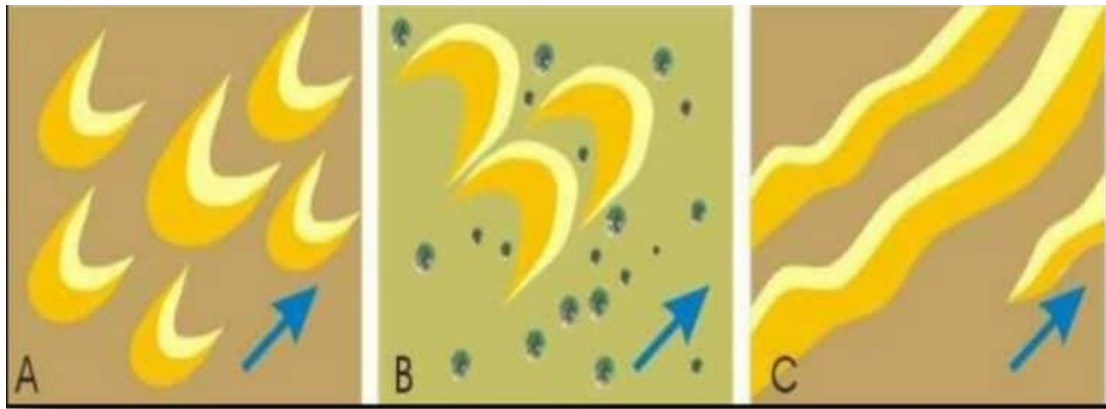
Nous avons tous déjà vu, que ce soit à travers des photographies ou des images télévisées, ces vastes étendues de dunes qui évoquent une mer de sable au cœur du désert.

Leurs formes répétitives sculptées par le vent s'étendent sur de vastes surfaces, et leur déplacement représente une menace pour les zones agricoles, les routes et même les villes. Pourtant, le mécanisme de leur mouvement reste encore largement méconnu. Les dunes se présentent sous trois formes :

**La barkhane** est une dune en forme de croissant, dont la convexité est orientée face au vent. Elle se forme dans des environnements où l'apport de sable est limité et sous l'influence de vents soufflant dans une seule direction (Figure 1.8.A).

**La dune parabolique** est une formation sableuse dissymétrique en forme de fer à cheval, dont la concavité est orientée face au vent. Elle est souvent stabilisée, en partie ou en totalité, par la végétation (Figure 1.8.B). Contrairement à la barkhane, son orientation par rapport au vent est inversée. Une fois formée, elle reste généralement peu mobile et ne migre que très rarement.

Les siouf, également appelées sif, sont des dunes en forme de sabre présentant des ondulations **longitudinales** qui s'affinent progressivement vers une extrémité (Figure I.18)



**Figure.1.18.** Types de dunes. A : barkhanes ; B : dunes paraboliques ; C : dunes longitudinales. La flèche bleue indique la direction du vent dominant [28].

## I.8.5. Utilisation du sable de dunes

### I.8.5.1. Diverses utilisations

Les sables constituent un élément fondamental des processus sédimentaires et représentent une ressource d'une grande importance économique. Ils sont utilisés dans les remblais, comme granulats pour le béton, matériaux de construction, ainsi que comme sables siliceux dans diverses industries. Ces derniers, anciennement appelés « sables industriels », forment la principale matière première dans la fabrication du verre, des moules et noyaux de fonderie, et interviennent également dans la production des céramiques et des mortiers spéciaux.

Le sable représente également le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds transportés par l'eau, formant ainsi des concentrations minérales sableuses. On en extrait des minéraux précieux tels que l'or, le diamant, la cassitérite (minerai d'étain), la magnétite (oxyde de fer), l'ilménite (oxyde de titane et de fer), entre autres. Les gisements d'ilménite, connus sous le nom de « sables noirs », revêtent une grande importance économique, car ils sont utilisés dans la fabrication des pigments pour la peinture blanche (comme c'est le cas pour les gisements côtiers en Australie), en plus de constituer une source principale de titane métallique

Les sables jouent également un rôle essentiel en tant que réservoirs potentiels pour les nappes phréatiques ou les hydrocarbures. Il est donc nécessaire de réglementer l'exploitation du sable, souvent pratiquée de manière désordonnée, afin de préserver les équilibres naturels

fragiles : érosion des plages due à l'interruption de l'alimentation naturelle en sable, destruction des nappes phréatiques terrestres, etc. [29]

## **I.9.béton autoplaçant (BAP)**

### **I.9.1. Définition de BAP**

Ces bétons se caractérisent par une excellente fluidité, une homogénéité remarquable et une grande stabilité. Ils peuvent être mis en place sans recourir à la vibration, ce qui représente un atout majeur dans le domaine de la construction. Leur grande facilité de déformation leur permet d'épouser parfaitement les formes les plus complexes des coffrages, garantissant ainsi des structures solides, durables et de haute qualité [30].

### **I.9.2. Domaine d'utilisation des BAP**

Les bétons auto-plaçant (BAP) peuvent être utilisés aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous types de chantiers, qu'il s'agisse de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil. Ils conviennent également à la fabrication de nombreux éléments préfabriqués en béton. La majorité des structures peuvent être réalisées en BAP : murs, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, façades, mobiliers urbains, etc. [31].

Le béton autoplaçant (BAP) convient particulièrement à la réalisation de structures où l'utilisation du béton traditionnel s'avère difficile, notamment en raison de :

- Densités de ferrailage importantes.
- Densités de ferrailage importantes.
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- Voiles de configuration complexe comportant de multiples réservations ou de larges ouvertures
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière.
- Des zones d'accès restreint, voire inaccessibles, pour le coulage du béton dans le coffrage et pour garantir une vibration efficace [32].

Le BAP est une solution bien adaptée pour [33] :

- Tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis.
- Radiers.

- Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
- Rattrapage de niveau en rénovation.
- Fondations superficielles.
  - Voiles, poteaux, poutres.

### **I.9.3. Avantages du béton autoplaçant**

Les bétons autoplaçants BAP présentent de nombreux avantages, on cite :

#### **I.9.3.1. Avantages techniques**

- La mise en œuvre du béton est simple et rapide
- La création d'éléments aux formes complexes.
- Coulage de béton dans des environnements fortement armés.

#### **I.9.3.2. Avantages économiques**

- Diminution du coût de la main-d'œuvre et du temps de coulage du béton.
- Absence de systèmes de vibration, ce qui réduit les coûts et diminue les nuisances sonores sur le chantier et dans ses environs.

#### **I.9.3.3. Avantages écologiques**

- Valorisation des déchets de construction (collecte de ces déchets sur les chantiers, dans les industries, les carrières et les stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [34].

### **I.10. Conclusion**

Les résultats de recherche dans la littérature sur le problème des pneus usagés et des déchets céramiques non recyclables indiquent qu'une étude examinant le recyclage des dunes de sable, notamment son utilisation dans la fabrication de matériaux de construction tels que le béton et le mortier, a montré que cette approche est faisable et pourrait contribuer à réduire la quantité de pneus usagés accumulés. Malgré leur faible résistance mécanique (en compression et en traction), ces alliages présentent une grande capacité à se déformer avant d'atteindre le point de rupture.

En résumé, l'utilisation de granulats de pneus usagés et de déchets de céramique dans des mélanges de construction, en combinaison avec des sables de dune, représente une approche prometteuse pour la gestion durable des déchets.

---

# **Chapitre II**

## **Matériaux et procédures expérimentales**

---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons, dans une première partie, les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la formulation du béton de sable autoplaçants incorporant des granulats de caoutchouc, des déchets céramiques et du sable de dune. Cette analyse portera notamment sur la masse volumique, la granulométrie, la propreté, ainsi que la composition chimique et minéralogique, en plus d'autres propriétés physiques. Dans la deuxième partie, nous présenterons les protocoles des différents essais réalisés dans le cadre de l'étude expérimentale, en vue d'assurer une interprétation rigoureuse et pertinente des résultats obtenus sur les bétons de sable autoplaçants à base de granulats de caoutchouc, de déchets céramiques et de sable de dune.

## II.2. Matériaux utilisés

### II.2.1. Sables

Deux types de sables ont été utilisés dans cette étude, alluvionnaire et dunaire.

Le sable alluvionnaire provenant de la sablière Djamaa, de la Willaya d'El M'Ghair (Voire Figure II.1). Sa masse volumique apparente est  $1.88 \text{ g/cm}^3$  et sa masse volumique absolue :  $2.66 \text{ g/cm}^3$ . Sa granulométrie varie de 0 à 5mm.

Le sable de dune utilisé est un sable provenant de la région d'El oued exactement, la commune d'Al Nakhala (Voire Figure II.2). Sa masse volumique apparente est  $1.69 \text{ g/cm}^3$  et sa masse volumique absolue :  $2.61 \text{ g/cm}^3$ . Sa granulométrie varie de 0 à 0.63 mm

Les Figure II.1 ; II.2 montrent des tas des sables utilisés.



**Figure II.1** : Sable Alluvionnaire Djamaa (SA)



**Figure II.2** : Sable de dune

## II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé dans l'ensemble des essais expérimentales est un ciment portland composé CEM II / B-L 42.5N selon la norme NA 442 [35] le ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (LAFARGE), Biskra, Algérie (Figure II.3).



**Figure II.3.** Ciment utilisé.

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment inscrit sur la fiche technique sont données dans les **Tableaux II., 1. 2. 3. 4,**

**Tableau II.1.** Résistance à la compression (NA 234)

Age	2 jours	28 jours
Résistance à la Compression (MPa)	Différent $\geq 10$	$\geq 42.5$

**Tableau II.2.** Analyses chimiques (NA 5042)

Paramètre	Valeur
Pert au feu (%)	$10.0 \pm 2$
Résidus insoluble (%)	$1.35 \pm 0.65$
Teneur en sulfates $SO_3$ (%)	$2.5 \pm 0.5$
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	$1.7 \pm 0.5$
Teneur chlorures (%)	0.02 – 0.05
Teneur équivalent en alcalins (%)	0.3 – 0.75

**Tableau II.3.** Composition minéralogique du ciment (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C <sub>3</sub> S	60 ± 3.0
C <sub>2</sub> S	15 ± 3.0
C <sub>3</sub> A	7.5 ± 1.0
C <sub>4</sub> AF	11 ± 1.0

**Tableau II.4.** Caractéristiques physiques du ciment MATINE

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

### II.2.3. Granulats de caoutchouc (GC)

Les granulats de caoutchouc utilisés, dans notre étude, sont issus du déchetage mécanique de déchets de pneus usagés (la source des GCR utilisés dans notre étude est les granulats de caoutchouc proviennent d'une usine de broyage de pneus de caoutchouc situé en Sétif-Algérie).

Après l'élimination de leurs parties métalliques et textiles, ils sont déchetés et broyés mécaniquement pour obtenir la finesse désirée Figure II.4. La classe granulaire des granulats de caoutchouc recyclés utilisés, dans notre composite est de 0 à 1 mm.

Les propriétés physiques de ceux-ci sont récapitulées dans le Tableau II.5. La Figure II.4 illustre l'analyse granulométriques de ceux-ci.



**Figure II.4.** Granulats de caoutchouc (0-1mm).

**Tableau II.5.** Caractéristiques physiques du Granulats de caoutchouc (0/1mm).

<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.940
<b>Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.370
<b>Granulométrie</b>	0-1mm
<b>Module de finesse</b>	2.43

#### **II.2.4. Déchets de céramiques (< 0.63mm)**

Les Déchets de céramique utilisés, dans notre étude, sont issus du Fraisage manuel de résidus de construction. Ils sont déchetés et broyés manuellement pour obtenir la finesse désirée Figure II.5. La classe granulaire des Déchets de céramiques recyclés utilisés, dans notre composite est de 0 à 0.63 mm

Les propriétés physiques de ceux-ci sont récapitulées dans le Tableau II.6.

La Figure II.5 illustre l'analyse granulométriques de ceux-ci.



**FigureII.5.** Déchets de céramiques (<0.63mm.)

**Tableau II.6.** Caractéristiques physiques du Déchets de céramiques (< 0.63mm).

<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.43
<b>Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.34
<b>Granulométrie</b>	< 0.63 mm
<b>Module de finesse</b>	0.85

## II.2.5. Caractéristiques physiques

Les Caractéristiques physiques sont comme suit :

### II.2.5.1. Les masses volumiques

#### La masse volumique apparente

Cet essai est régi par la norme NF P18-554 [36] elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la

Matière du corps et les vides qu'elle contient.

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

Où :

$\gamma$  : Masse volumique apparente.

M : Masse du matériau.

V : Volume total du matériau.

#### La masse volumique absolue

Cet essai est régi par la norme NF P18-301 [37] elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

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

Où

$y$  : Masse volumique apparente.

$M$  : Masse du matériau.

$V$  : Volume total du matériau.

### II.2.5.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P 18 560 [38]. En utilisant un tamis séquentiel comme indiqué sur Figure II.6.



Figure II.6 : Tamis d'analyse granulométrique.

### II.2.5.3. Module de finesse

Les granulats 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 de sable tandis que si le granulat est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un granulat peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 et 5.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des granulats à béton du sable.

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

1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins.

2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel.

2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons du sable résistants mais moins maniables.

**Tableau II.7.** Analyse granulométrique de sable Alluvionnaire.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis (%)
5	0	0	0	100
2.5	20	20	2	98
1.25	58	78	7.8	92.2
0.63	184	262	26.2	73.8
0.315	436	698	69.8	30.2
0.16	228	926	92.6	7.4
0.08	50	976	97.6	2.4

**Tableau II.8.** Analyse granulométrique sable de dune.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis (%)
1.25	0	0	0	100
0.63	37	37	3.7	96.3
0.315	395	432	43.2	56.8
0.16	357	789	78.9	21.1
0.08	187	976	97.6	2.4

**Tableau II.9.** Analyse granulométrique sable Alluvionnaire 50% + sable de dune 50%.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis (%)
5	0	0	0	100
2.5	7	7	0.7	99.3
1.25	29	36	3.6	96.4
0.63	114	150	15	85
0.315	486	636	63.6	36.4
0.16	250	886	88.6	11.4
0,08	101	987	98.7	1.3

**Tableau II.10.** Analyse granulométrique Déchets de céramiques.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis (%)
0.63	0	0	0	100
0.315	345	345	34.5	65.5
0.16	158	503	50.3	49.7
0.08	330	833	83.3	26.7

**Tableau II.11.** Analyse granulométrique Granulats de caoutchouc.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis (%)
1	0	0	0	100
0.63	550	550	55	45
0.315	345	895	89.5	10,5
0,16	93	988	98.8	1.2
0.08	12	1000	100	0

### II.2.5.4. Equivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme NF P18 598 [39], est utilisé pour évaluer la propreté des matériaux entrant dans la composition du béton de sable. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants (Figure II.7).

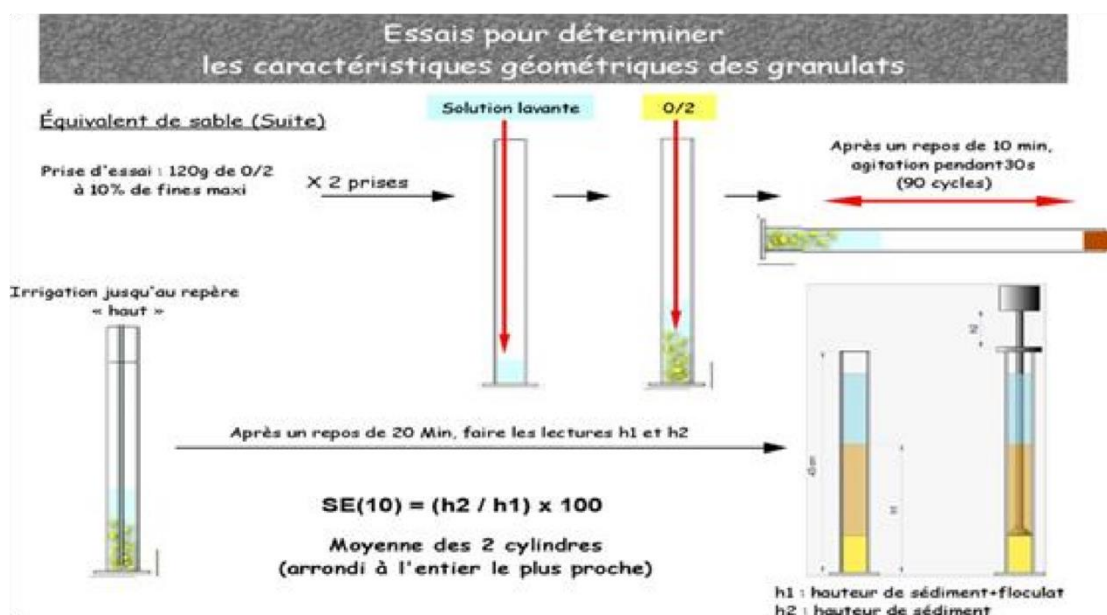
La hauteur h1 : matériaux propres + éléments fins.

La hauteur h2 : matériaux propres seulement.

On en déduit l'équivalent des matériaux qui, par convention, est :

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

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine : équivalent de sable visuel ESV et équivalent de sable au piston (ESP).



**Figure II.7.** Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Conformément à la norme NF P18 598 [39], les recommandations concernant la propreté des sables utilisés dans les bétons de sable sont présentées dans le tableau II.12.

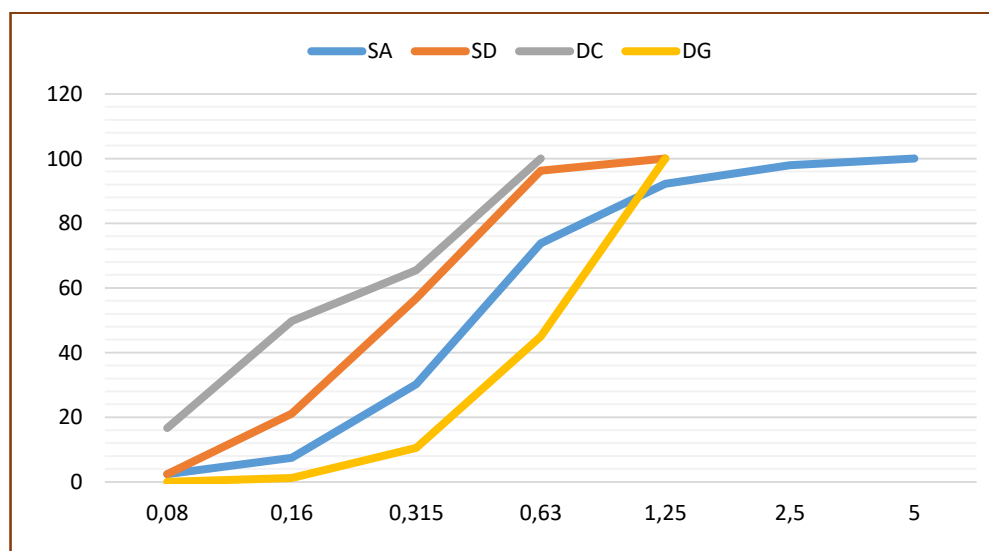
**Tableau II.12.** Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons de sable.

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

### II.2.5.5. Synthèse des résultats

**Tableau II.13.** Regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur utilisé.

Caractéristiques	Masse Volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Masse Volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	MF	ESV (%)
Sable Alluvionnaire (SA)	1.88	2.66	2	76.85
Sable de Dune (SD)	1.69	2.61	1.26	85



**Figure II.8.** Courbes granulométriques des sables utilisés et granulats de caoutchoucs.

## II.2.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage joue deux rôles essentiels dans la préparation du béton de sable : d'une part, un rôle physique en assurant la fluidification du mélange, et d'autre part, un rôle chimique en participant au processus d'hydratation. L'eau utilisée pour le gâchage provient directement du réseau public d'eau potable.

## II.3. Formulations

### II.3.1. Formulations du béton du sable témoin (0%GC, 0%DC)

Pour la composition du béton de sable témoin, nous avons suivi un dosage en ciment et en sable conforme à celui d'un béton de sable normalisé selon la norme EN 196-1. Cela signifie qu'une partie de ciment est mélangée avec trois parties de sable. En ce qui concerne le dosage en eau, nous avons utilisé le rapport E/C (0.6), ce qui signifie que pour chaque unité de ciment, 0,6 unité d'eau a été utilisée dans le mélange. [40]

### II.3.2. Compositions des bétons de sable

Les compositions étudiées sont présentées dans le Tableau II.14 :

**Tableau II.14.** Composition des bétons de sable autoplaçant utilisés (Kg/m<sup>3</sup>)

Désignation du mélange	Ciment (kg)	Eau (kg)	Sable Alluvionnaire (SA) (kg)	Sable De dune (SD) (kg)	Granulats de caoutchouc (GC) (kg)	Déchets de céramiques (DC) (kg)	Super Plasti-fiant (kg)	E/C
Formulation 01 (0%GC, 0%DC)	400	240	612,9	600	/	/	6	0.6
Formulation 02 (0%GC, 4%DC)	400	240	612,9	576	/	22,75	6	0.6
Formulation 03 (0%GC, 8%DC)	400	240	612,9	552	/	45,5	6	0.6
Formulation 04 (0%CG, 12%DC)	400	240	612,9	528	/	68,25	6	0.6
Formulation 05 (5%GC, 0%DC)	400	240	612,9	570	10,62	/	6	0.6

Formulation 06 (10%GC, 0%DC)	400	240	612,9	540	21,24	/	6	0.6
Formulation 07 (15%GC, 0%DC)	400	240	612,9	510	31,86	/	6	0.6

### II.3.3. Procédure expérimentale

#### II.3.3.1. Fabrication du béton de sable autoplaçant

##### II.3.3.1.1. Pesage des composants du béton de sable autoplaçant

Dans un premier temps nous avons pesé individuellement tous les composants du béton de sable pour chaque formulation du Tableau II.14.



Figure II.9. Pesage des composants du béton de sable

##### II.3.3.1.2. Malaxage des composants du béton de sable autoplaçant

Pour le malaxage des constituants, Le processus de mélange a été fait à la main dans l'ordre suivant :



**Figure. II.10.** Matériaux utilisés secs

Mettre les ingrédients secs. (Ciment, et sable Alluvionnaire, granulats de caoutchouc et déchets de céramique et Sable de dune) dans le bol et mélanger jusqu'à ce qu'ils soient homogènes.



**Figure.II.11.** Mélanger les matières sèches

Ajouter de l'eau petit à petit tout en mélangeant :



**Figure.II.12.** Ajouter de l'eau en mélangeant

#### II.3.3.1.3. Coulage des éprouvettes :

Dans ce travail nous avons confectionné 14 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm



**Figure.II.13.** Moule de l'éprouvette utilisée

#### II.3.3.1.4. Etapes de coulage des éprouvettes

**a) Première étape :** Lubrifier les moules avec de l'huile moteur brûlée pour que le béton de sable autoplaçant ne colle pas à ses parois Voir Figure II.14



**Figure.II.14.** Lubrifié de moule

**b) Deuxième étape :** Versez le mélange dans le moule et remplissez-le au texte comme indiqué sur la 2 Figure II.15



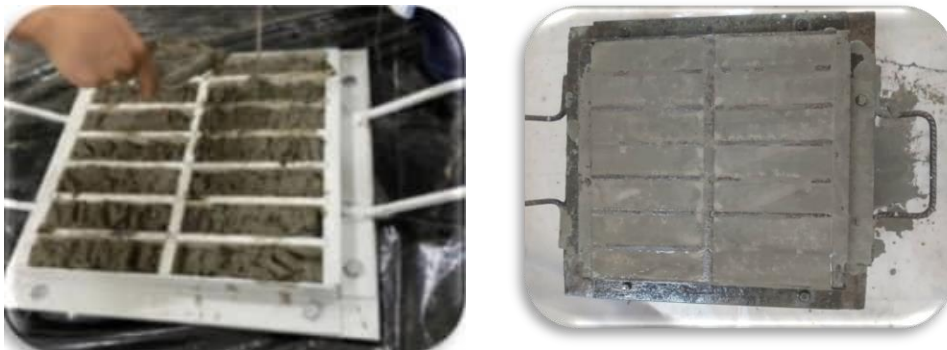
**Figure.II.15.** Verser la mmolette de la quantité dans le moule

c) **Troisième étape** : Ensuite, nous l'enroulons en frappant le moule 25 coups à gauche et à droite comme indiqué sur la Figure II.16



**Figure.II.16.** Décanter l'échantillon en secouant

d) **Quatrième étape** : Ensuite, nous terminons de le remplir et de le secouer à nouveau de la même manière, puis j'ai nivelé la surface et laissé sécher pendant 24 h.



**Figure.II.17.** Remplissage du modèle terminé

e) **Cinquième étape** : En effet pour chaque formulation, le démoulage des éprouvettes s'est fait après 24h. Nous retirons les échantillons, les nettoyons (Fig.II.18) et y écrivons leur contenu (Fig.II.19). Puis on les met dans l'eau pendant 28 jours.



**Figure.II.18.** Ouvrir les éprouvettes



**Figure.II.19.** Nettoyage des échantillons

## II.3.4. Les essais réalisés

### II.3.4.1. Essais réalisés à l'état frais

#### II.3.4.1.1. Essai d'étalement au mini cône

##### a) principe

La qualité du béton de sable autoplaçant à l'état frais est mesurée par différents essais. L'essai d'étalement au cône d'Abram (Slump flow test) est utilisé pour caractériser les propriétés des bétons de sable à l'état frais.

##### b) Objectif

Mesurer l'étalement au mini cône pour du béton de sable.

##### c) Mode opératoire de l'essai

humidifier légèrement la plaque en acier,

Humidifier légèrement le mini cône,

Remplir le cône par le mortier,

Lever le cône par une geste régulière et vertical et laisser s'écouler le mortier déterminer le diamètre final de la galette du béton de sable par la moyenne de deux mesures du diamètre

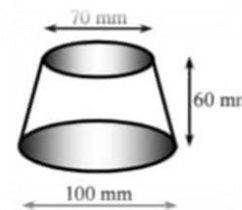


Figure.II.20. Essai d'étalement au mini cône.

#### II.3.4.1.2. Essais de V Fennel (Mesure du temps d'écoulement)

### a) principe

Essai à l'entonnoir en V (figure 21) permet d'évaluer la mobilité en milieu confiné. Cet essai est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles.

### b) Objectif

Évaluation de la viscosité du béton autoplaçant

### c) Mode opératoire de l'essai

1. Bien humidifier l'entonnoir de l'intérieur avant de commencer le test.
2. Fermez le trou de vidange inférieur.
3. Remplissez l'entonnoir de béton frais sans le secouer ni le comprimer.
4. Ouvrez la trappe inférieure et démarrez le chronométrage au même moment.
5. Enregistrez le temps nécessaire au béton pour sortir complètement de l'entonnoir (enregistré en secondes).



**Figure.II.21.**Essais de V Fennel (Mesure du temps d'écoulement).

### II.3.4.1.3. Détermination de la masse volumique

Cette méthode permet de déterminer la masse volumique du béton de sable autoplaçant frais, ce qui est essentiel pour évaluer sa qualité et sa performance. En remplissant un récipient de volume et de masse connus avec le béton de sable frais, puis en mesurant la différence de masse entre le récipient plein et vide, on peut calculer la masse du béton de sable. En divisant cette masse par le volume du récipient, on obtient la masse volumique du béton de sable frais, exprimée en  $\text{kg/m}^3$ . Cela permet de comparer la masse volumique mesurée à la formulation théorique pour évaluer la conformité du béton de sable autoplaçant préparé.

Uniformisation de la surface du béton de sable puis pesage sur la balance en gramme. Voir figure II.22.



**Figure.II.22.**Rasage et pesage.

### II.3.4.2. Essais réalisés à l'état sec

Les essais sur le béton de sable autoplaçant à l'état sec ont tous débuté lorsque les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dans l'eau.

En effet les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dans l'eau pour les permettre de bien sécher dans un milieu naturel dont le pH est sensiblement égal à 7 sans être influencé par des facteurs externes.



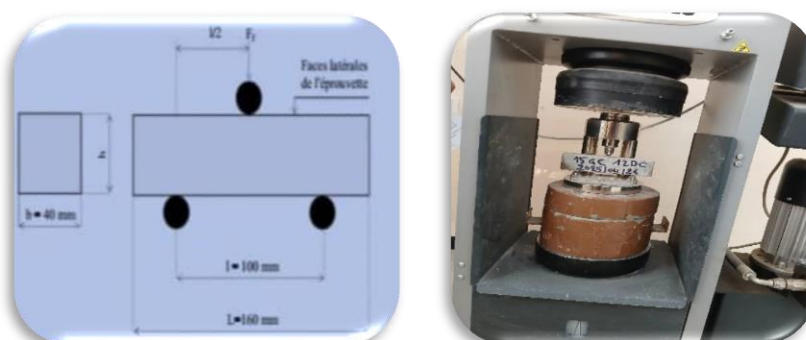
**Figure.23.** Échantillons après leur sortie de l'eau.

### II.3.4.2.1. Essai de traction par flexion

Des éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm ont été utilisées pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes en vigueur, munie d'une bane de flexion à 3 points. Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton de sable étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette.

La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

Les résistances à la traction du béton de sable autoplaçant durci ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 20 KN, pourvue d'un dispositif de flexion à 3 points (Figure II.24). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.



**Figure.II.24.** Essais de tractions par flexion.

### II.3.4.2.2. Essai de compression

La résistance à la flexion du béton de sable autoplaçant est déterminée à l'aide d'un essai de flexion en trois points, effectué jusqu'à la rupture d'éprouvettes de béton de sable durci. Les moitiés résultant de cet essai sont ensuite utilisées pour évaluer la résistance à la compression.

L'objectif principal de cet essai est de déterminer la résistance à la compression du béton de sable. Pour ce faire, chaque éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture. La charge maximale enregistrée au moment de la rupture correspond à la charge de rupture.

La résistance à la compression est calculée comme la moyenne des contraintes d'écrasement mesurées sur trois éprouvettes. Ces essais sont réalisés à 28 jours à l'aide d'une presse hydraulique de compression, capable d'appliquer des charges allant jusqu'à 1500 KN, et équipée d'un dispositif spécifique pour les moules de béton de sable.

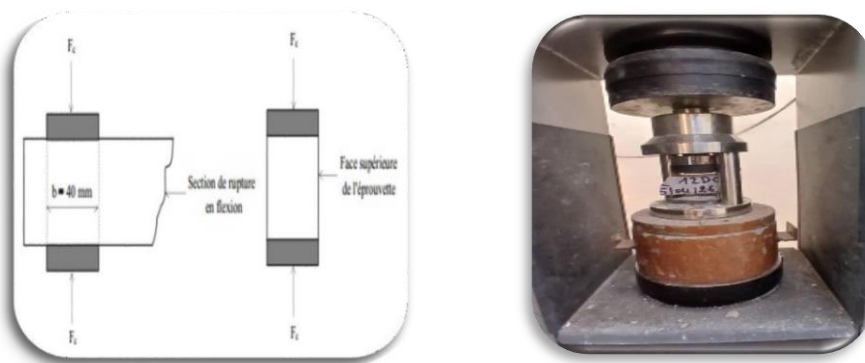


Figure.II.25.Essai de compression.

### II.3.4.2.3. Essai par immersion totale

L'absorption est généralement déterminée en séchant les éprouvettes jusqu'à obtention d'une masse constante, puis en les immergeant dans l'eau et en mesurant le gain de masse, exprimé en pourcentage par rapport à la masse sèche.

L'essai d'absorption par immersion a été conduit selon une démarche rigoureuse consistant à sécher des éprouvettes de béton de sable autoplaçant de dimensions  $(4 \times 4 \times 16)$  cm dans une étuve jusqu'à obtention d'une masse constante. Par la suite, les éprouvettes ont été totalement immergées dans l'eau afin d'assurer la saturation complète des matériaux, permettant ainsi d'évaluer leur capacité d'absorption.

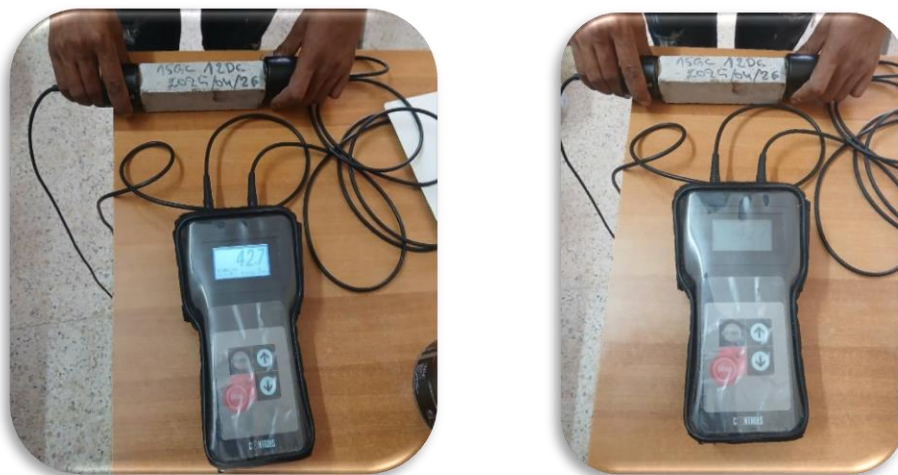
L'Objectif de cet essai est de déterminer la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.



**Figure II.26.** Essai par immersion totale d'eau par.

#### **II.3.4.2.4. Essai d'auscultation dynamique**

La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton de sable résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le béton de sable. Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton de sable. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme la montre là (Figure II.25).



**Figure.II.27.**Essai d'auscultation dynamique.

## **II.4. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation de bétons de sable autoplaçants incorporant des granulats de caoutchouc et des déchets de céramique. Leurs propriétés physico-chimiques ont été déterminées, et les procédures expérimentales ont été décrites. Les méthodes de formulation des bétons tiennent compte des caractéristiques des matières premières utilisées. Les mélanges ont été réalisés conformément aux normes en vigueur. Après la caractérisation des bétons de sable autoplaçants, avec et sans incorporation de déchets, le chapitre suivant présentera et discutera les résultats obtenus.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion Générale

Ce travail expérimental sur les bétons de sable autoplaçant avec les granulats de caoutchouc, déchets de céramiques, nous a permis de trier les conclusions suivantes :

- L'étalement au mini cône de bétons de sable autoplaçant varie en fonction du pourcentage de substitution du sable par le déchet de céramique. On constate aussi que plus le pourcentage de déchets de céramiques, plus l'étalement ne diminue. Cela est peut-être dû à la couche imperméable de céramique.
- L'étalement au mini cône augmente en augmentant le dosage des granulats de caoutchouc. L'adjonction de granulats de caoutchouc dans des bétons entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant l'augmentation de l'étalement lorsqu'en augmente du taux d'incorporation.
- Le temps d'écoulement V-Funnel augmente en fonction d'augmentation de déchets de céramiques. Cette augmentation est liée à la forme anguleuse de déchets céramiques incorporés qui jouent un rôle d'obstacle.
- Diminution de temps à l'entonnoir V-Funnel avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc. Cette diminution est liée à la nature hydrophobe des granulés de caoutchouc rend le béton plus liquide.
- Diminution de la masse volumique avec l'augmentation du taux de déchets de céramique. Cette diminution est due à la plus faible masse volumique des déchets de céramiques par rapport à celle du sable substitué. De plus, l'introduction de ces déchets crée un béton plus poreux.
- Les granulats de caoutchouc apportent un allègement aux bétons étudiés. La faible masse volumique des granulats de caoutchouc est le facteur essentiel qui explique cette réduction. La nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, responsable du piégeage des bulles d'air, participe à l'allègement des composites des granulats de caoutchouc.
- Les résistances mécaniques (en compression et en traction) de différents bétons de sable autoplaçants augmentent avec l'âge, suivant une évolution similaire à celle du béton de sable autoplaçant de référence. Cette progression peut être attribuée à l'interaction entre le sable et les granulats issus des déchets de céramique, ce qui contribue à renforcer la structure du béton. Par ailleurs, l'incorporation de ces déchets permettrait également de réduire la porosité du matériau.
- Les granulats de caoutchouc font chuter les résistances mécaniques (en compression et en traction) des bétons étudiés. Cette diminution peut s'expliquer par le défaut d'adhérence

entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire, ainsi que par la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels.

- L'absorption d'eau par immersion totale diminue à mesure que le pourcentage de déchets de céramique augmente. Ces derniers semblent limiter la pénétration de l'eau dans les bétons étudiés, ce qui suggère que leur ajout contribue à réduire la porosité de ces matériaux.
- L'absorption d'eau par immersion totale augmente avec l'accroissement de la teneur en granulats de caoutchouc. Ce phénomène peut s'expliquer par la formation de pores induite par la nature non polaire des granulats de caoutchouc, ainsi que par leur tendance à piéger de l'air à leur surface.
- Les vitesses ultrasoniques mesurées sur les bétons incorporant des déchets de céramique augmentent nettement avec la hausse du taux de substitution. Cette amélioration est principalement attribuée à l'effet filler des particules céramiques, qui contribue à densifier la matrice. La vitesse de propagation des ondes ultrasonores est étroitement liée à la porosité du matériau : plus cette dernière diminue, plus la vitesse n'augmente.
- La vitesse des ultrasons dans les éprouvettes contenant des granulats de caoutchouc diminue nettement. Cette baisse est due aux difficultés de compactage des mélanges comportant une proportion élevée de granulats de caoutchouc, ce qui entraîne une porosité accrue. Ce phénomène est renforcé par la présence de bulles d'air dans la matrice cimentaire.

### **Perspective**

Des recherches complémentaires sont nécessaires afin d'analyser l'impact de l'optimisation des pourcentages de déchets de caoutchouc et de céramique, du dosage en ciment, des méthodes de prétraitement des particules de caoutchouc, ainsi que des techniques de valorisation des déchets céramiques sur les propriétés mécaniques du béton.

---

# Références bibliographique

---

## Références bibliographique

- [1] M. HỌ Anh Cuong." Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés " Application aux éléments de grande surface, 2010.
- [2] Algérie Presse Service. (2018, 21 juin). L'Algérie importe 7 millions de pneus par an, selon Ahmed Ouyahia. APS
- [3] Sienkiewicz M., Kucinska-Lipka J., Helena Janik 11., Balas A., Progress in used tyres management in the European Union: A review, Waste Management, 32(2012) 1742-1751
- [4] Conférence des Parties à la Convention de BALE sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination, Directives Techniques Révisées pour une Gestion Ecologiquement Rationnelle des pneus usés, (2008) pp.52.
- [5] Rashad M,A., comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementations materials, International Journal of Sustainable Built Environment, 5(2016) 46-82.
- [6] ETRMA-European Tyre Rubber Manufacturers' Association (Belgium). 2010b, Used Tyres Recovery 2010 (table) - UT/Part Worn Tyres/ELT's Europe Volumes Situation 2010, Data downloaded from <http://www.etrma.org/default.asp>, May 2011,
- [7] Malek K, B, Marie I, ASI I., Promoting the use of crumb rubber concrete in developing.
- [8] <https://images.app.goo.gl/GHFPoWLMDCcz4wVm8> (site Internet Google, fr), 2016.
- [9] CONSTANT E, "Le problème du pneu usagé non réadaptable P, U, N, R", (site Internet Google. Fr). Oct., 1997, Mar, 1998
- [10] SANDRA B ; ANACLET T ; LOINS GRANJU J. "Un composite cimentaire résistant à la fissuration : synergie << Granulats en caoutchouc renfort par des fibres >>", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; 250-251.Mai-Juin-Juil-Aout, 2004.
- [11]"Production mondiale de caoutchouc" statistiques mondiales en temps réel PLANETOSCOPE (site Internet google.fr). Avril 2015.
- [12] La production mondiale de caoutchouc.wipiv.com.
- [13] M. HỌ Anh Cuong, Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés Application aux éléments de grande surface, 2010.

- [14] Asnawi, AF, Higashi, T., & Tanaka, Y. (2021). Le recyclage du caoutchouc comme voie vers l'économie circulaire. *Journal de la production plus propre*, 293, 126243.
- [15] Encyclopédie Universel ÉLASTOMERES ou CAOUTCHOUCS, universalis.fr (site Internet google.fr) avril 2015.
- [16] Reporterre. (2017, 24 juillet). Pneus, soleil et recyclage : bienvenue dans le monde étonnant des maisons « géonefs »
- [17] F. Belabdelouhab, H. Trouzine, *Le Pneu sol en Algérie : recherche, réalisations d'ouvrages et protection de l'environnement - IV th International Congress on Renewable Energy and the Environment*, Tunisie, 2009.
- [18] Turatsinze A; Bonnet S et Granju, J, L, "Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance". *Construction and Building Materials*, 21: 176-181, 2005,
- [19] Benazzouk A et Quécudec M, "Effet du caractère cellulaire des granulates sur le comportement d'un composite ciment-caoutchouc aux cycles de gel/dégel", *Proceeding of CNR IUT Roanne*, publication de l'Université de St-Etienne, ISBN 2 86272 2200, Tome 2, pp, 477-87, 2001.
- [20] Kerasley E, P, ET Wainwright P, J, "Porosity and permeability of foamed Concrete ", *cement Coner Res.* 31: 805-12, 2001,
- [21] J. Dejou. *Les céramiques Société Francophone de Biomatériaux Dentaires.* 2010.
- [22] Wikipedia contributors. (Dernière modification en 2024). Céramique. Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9ramique>
- [23] J.L., Chermant, «Les céramiques thermomécaniques, Presses du CNRS, ISBN 2-87682-021-8, (1989).
- [24] W. Kingery, *Introduction to ceramics*, John Wiley and Sons éd, New York, 1960.
- [25] LANGUEDOC R, "Guide pratique des déchets" (site Internet google, fr), 2001,
- [26] BEN DHIA. M.H (1998) : Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, *bulletin des laboratoires des ponts et chaussées.* P 33-42.
- [27] Khangaoui S. (2013) : Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable.
- [28] Chihoub. K et Medgadem. S. "Influence de la substitution total ou partielle de Sable d'oued par le sable de dune sur la résistance à la compression des bétons", université Zain Achour, Djelfa, 2012-2013
- [29] AZZOUC. H. (2009) : Etude des bétons à base des sables de dune, thème de Magister, université Mohamed Khider Biskra.

- [30] OKAMURA.H. OZAWAK, "Selfcompactablehighperformanceconcretein Japan" ACI International Works hoponhigh Performance Concrete, Bangkok, Thailand. (1994).
- [31] CSTC (centre de recherche), Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités, Belgique, 2004.
- [32] FICHES TECHNIQUES TOME 2, LES BETONS : formulation fabrication et mise en œuvre.
- [33] BOUSSAFER A. Formulations des bétons autoplaçants par la méthode japonaise D'OKAMURA présenté ; Université Constantine thème master 2010-2011.
- [34] Benaddad S, Benatsou. N, "Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)", Mémoire de Master. Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- [35] NA 442. Caractérisation physico-mécanique d'un liant hydraulique à base de Poudre de verre. Liant hydraulique. Poudre de verre. Ajouts cimentaires, SAYOUD, ACHRAF. Comportement mécanique, Réaction pouzzolanique. Publisher : Université 8Mai 1945-Guelma
- [36] NF P18-554 Granulats. Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des granulats. (D supérieur ou égal à 4 mm). Homologuée décembre 1979.
- [37] NF P 18-301. Normes française "Granulats" Granulats naturels pour bétons hydrauliques. Homologuée décembre 1983.
- [38] NF P 18-560. Norme française Analyse granulométrique. septembre 1990.
- [39] NF P 18-598. Normes française Equivalent de sable». octobre 1991.
- [40] NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments, Partie 1 : détermination des résistances mécaniques Indice de classement. Avril.2006