

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث  
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Matériau de Génie Civil

Par : - Boukhalfa Yakoub

- Benmoussa Walid

## Sujet

**Caractérisation d'un mortier léger à base des déchets de caoutchouc des pneus usagés**

Soutenu publiquement, le 19/06/2024, devant le jury composé de :

M/Bourahli Amel	MCB	Univ-BBA	Président
M/Laoubi Hamza	MCB	Univ-BBA	Examineur
M/Goufi Abdelmalek	MCB	Univ-BBA	Examineur
M/Guelmine Layachi	MCA	Univ-BBA	Encadrant
M/ Benammar Abdelhafid	MCB	Univ-BBA	Co- encadrant

Année Universitaire 2023/2024

# Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force, le courage et la patience de bien mené ce travail.

Nous tenons à adresser toute notre gratitude à Mr Layachi GUELMINE, notre promoteur, pour son direction scientifique, ses conseils, son confiance, son patience et son encouragement pour ce travail.

Nous remercions aussi notre Co-encadreur Mr Abdelhafid BENAMMAR.

Nous tenons aussi à remercier monsieur les examinateurs de notre mémoire pour l'effort fournir pour évaluer notre travail.

Nous remercions chaleureusement tous les enseignants, personnels et techniciens de laboratoire de génie civil surtout pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Nous aimerons exprimer notre gratitude envers tous ceux qui ont, de diverses façons, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce travail.

# اهداء

الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى واهله ومن وفي اما بعد

الحمد لله الذي وفقنا لتتميم هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه

ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة الى الوالدين الكريمين حفظهما الله وادامهما نورا لدربي

بالأخص لوالدي رحمه الله واسكنه فسيح جناته

ولكل العائلة الكريمة التي ساندتني من اخوة واخوات

والى رفقاء المشوار الدراسي اللذان قاسمني لحظاتهم رعاهم الله ووفقهم

والى كل قسم الهندسة المدنية وإدارة العلوم والتكنولوجيا وجميع دفعة 2024

جامعة البشير الابراهيمى-برج بوعريريج

والى كل من كان لهم أثر على حياتي

والى كل من أحبهم قلبي ونسيهم قلبي.

■ يعقوب ■. وليد ■

## Résumé :

Dans cette étude, nous avons examiné l'impact de l'incorporation des particules de caoutchouc réutilisées PCR sur les propriétés des mortiers légers de ciment. En résumé, bien que l'ajout de granulats de caoutchouc recyclés présente des avantages en termes de réduction du poids des structures, ainsi que d'amélioration de l'isolation thermique, il est crucial de tenir compte de ses implications sur les propriétés mécaniques du mortier. Ce type de matériau offre ainsi une perspective prometteuse pour répondre aux besoins croissants en agrégats de construction, tout en contribuant à la réduction des déchets de pneus usagés et à la préservation de l'environnement.

**Mots clés :** mortier léger, déchets de caoutchouc, les déchets de pneus, matériaux cimentaires, isolation thermique.

## Abstract :

In this study, we examined the impact of incorporating recycled rubber particles (PCR) on the properties of lightweight cement mortars. In summary, while the addition of recycled rubber aggregates offers advantages in terms of reducing the weight of structures and improving thermal insulation, it is crucial to consider its implications on the mechanical properties of mortar. This type of material thus offers a promising perspective to meet the growing needs in construction aggregates while contributing to the reduction of used tire waste and environmental preservation.

**Keys words:** Light mortar, waste rubber, waste tyres , cementitious materials, thermal insulation

## ملخص:

في هذه الدراسة، قمنا بفحص تأثير دمج جزيئات المطاط المعاد تدويره (PCR) على خواص ملاط الأسمنت خفيف الوزن. باختصار، في حين أن إضافة ركام المطاط المعاد تدويره توفر مزايا من حيث تقليل وزن الهياكل وتحسين العزل الحراري، فمن الأهمية بمكان النظر في آثارها على الخواص الميكانيكية للملاط. وبالتالي، فإن هذا النوع من المواد يقدم منظوراً واعداً لتلبية الاحتياجات المتزايدة في ركام البناء مع المساهمة في الحد من نفايات الإطارات المستعملة والمحافظة على البيئة.

الكلمات المفتاحية: الملاط الخفيف، النفايات المطاطية، نفايات الإطارات ، المواد الاسمنتية ، العزل الحراري

## Sommaire de mémoire :

ملخص

Résumé

Abstract

Sommaire

La liste des tableaux

La liste des Figures

Introduction Générale : .....1

**Chapitre I: Etat de l'Art sur les matériaux cimentaires incorporant des particules caoutchouc.....2**

Réutilisés: .....2

I. 1. Introduction : .....2

I .2. Problématique des déchets de pneus: .....2

I.1.Estimation des déchets pneumatiques en Algérie.....3

I.2. l'impact des déchets pneus sur la nature : .....4

.I.3. Les composants d'un pneu.....4

I.4. Valorisation des pneus usagés ..... 5

I.5. Techniques de valorisation des pneus dans le secteur du Génie Civil.....6

I.5.1. Usage des poudrettes et des granulats de caoutchouc dans le domaine routier .....6

I.5.2. La technique Pneu sol.....7

I.2. Mortier et ces constituants : .....8

I.2.1 Définition et rôles d'un mortier de ciment : .....8

I.2.2 Différents types de mortier : .....8

I.2.2.1 Mortiers de maçonnerie : .....8

A. Mortiers de ciment : .....9

B. Mortier de chaux : .....9

C. Mortier bâtards : .....9

I.2.2.2 Mortiers spéciaux : .....9

I.2.2.3 Mortiers de réparation : .....9

I.2.3 Principaux constituants du mortier de ciment: .....9

I.2.3.1 Le sable: .....9

I.2.3.2 Le ciment: .....10

I.2.3.3 L'eau de gâchage :	11
I.2.4. Propriétés essentielles d'un mortier de ciment:	11
I.2.4.1 L'ouvrabilité et la maniabilité:	11
I.2.4.2 La résistance mécanique :	11
I.2.4.3 Réaction d'hydratation:	12
I.2.4.4. Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement):	13
I.3. Les propriétés des matériaux cimentaires incorporant les particules de caoutchouc réutilisés :	14
I.3.1. Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton.....	14
I.3.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C.....	16
I.3.2.1. Résistance en compression.....	16
I.3.2.2. La résistance à la traction.....	17
I.3.2.3. L'absorption d'eau.....	18
I.3.2.4. Capacité de déformation.....	18
I.3.2.5. Comportement au Feu.....	19
I.4. Le mortier de ciment léger incorporant les particules de caoutchouc réutilisé :	21
I.4.1. Composition :	21
I.4.2. Particules de caoutchouc :	21
I.4.3. Propriétés mécaniques :	21
I.4.4. Durabilité :	22
I.4.5. Isolation thermique et acoustique :	22
I.4.5. Applications :	22
I.4.6. Aspect environnemental :	22
<b>Chapitre II Matériaux et Méthodes Expérimentales.....</b>	<b>23</b>
II-1) Introduction :	23
II-2) Caractérisation des matières premières :	23
II.2.1) Essai sur le sable :	23
II.2.2) Analyse granulométrique : NFP.18-560[21].....	23
A. Module de finesse :	24
II.2.1.2 Equivalent de sable : NFB.18-598[21].....	24
II.2.1.3 Masse volumique apparente et absolue :	26
II.1.2. Essai sur le ciment :	27
II.2.2.1. Masse volumique absolue : NFP 18-558[21].....	27
II.1.2.2. Masse volumique apparente :	27
II.1.3. L'eau de gâchage :	28

II.3. Formulation et préparation du mortier léger:.....	28
II.3.1 Préparation des mortiers étudiés :.....	28
II.4. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :.....	31
II.4.1. L'ouvrabilité :.....	31
II.4.2.1.Mode opératoire.....	32
II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci.....	32
II.5.1.Propriétés physiques :.....	33
II.5.1.1 Masse volumique apparente :.....	33
II.5.1.2.Conductivité thermique :.....	33
II.5.2.Propriétés Mécaniques :.....	34
II.5.2.1.Résistance à la flexion : norme EN196-[21].....	34
II.5.2.2. Résistance à la compression : norme EN196-[21].....	35
II.5.2.3. Essai Ultrasonique :.....	35
<b>Chapitre III : Résultats et discussions.....</b>	<b>39</b>
III.1. Introduction :.....	39
III.2. Etude des propriétés fraîches :.....	39
III.2.1. Etalement de table:.....	39
III.3. Etude des propriétés durcies:.....	41
III.3.1. Propriétés physiques :.....	41
III.3.1.1. La masse volumique apparente :.....	41
III.3.1.2. La conductivité thermique :.....	42
III.3.1.2. La vitesse ultrasonique :.....	43
III.3.2. Propriétés mécaniques :.....	44
III.3.1.2. La résistance en traction par flexion :.....	44
III.3.1.2. La résistance en compression :.....	45
Conclusion :.....	45
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>47</b>
Références bibliographiques :.....	48.49
<b>La liste des tableaux :</b>	
Tableau 1.1 : Répartition du parc automobile en Algérie.....	3
Tableau I.2: Différentes matières contenues dans le pneu [2].....	5
Tableau I.6 : Ouvrages Pneu sol réalisés.....	8
Tableau.I.3. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.....	10
Tableau.I.4: Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe.....	11
Tableau II.1 : Résultats d'essais d'équivalent de sable testé.....	25
Tableau II.2 : Opération de malaxage des mortiers .....	29
Tableau II.3 : Composition des mortiers préparés.....	30

## La liste des Figures :

Figure.I.2. Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés.....	4
Figure I. 14 : Schéma des différentes filières de valorisatio.....	6
Figure I. 15 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés (Antoine, 2002)....	6
Figure 1.16 : Chantier expérimental Pneu sol à Bou-Ismaïl.....	7
Figure.I.4.La structure de la pâte de ciment selon le modèle de Feldeman et Serada[7].....	14
Figure I.6 : Influence de G.C. sur l'affaissement [16].....	14
Figure I-7 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GCR[16].....	15
Figure I-8 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [17].....	16
Figure.I.8: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [18].....	17
Figure.I.9. Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [16].....	17
Figure I-30 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C[19].....	18
Figure I-15 : Comportement en flexion des blocs de béton caoutchouc, [20].....	19
Figure.I.22. la montée en température du four et des mortiers étudiés pour différents taux des granulats de caoutchouc recyclés [21].....	19
Figure.I.23. Vue des demi-spécimens exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement à la ambiants (20°C) et à la température 400°C [21].....	20
Figure.I.24. Evolution de la porosité ouverte relative des mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage [100].....	20
Figure.I.25. Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression relative de cette étude et ceux de DTU [21].....	21
photo.II.1 : Analyse granulométrique.....	23
Figure(II.1) : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés.....	24
Photo II.2 : Essai d'équivalent de sable.....	25
Figure II.4 : Masse volumique apparente.....	26
Photo II.4 : malaxeur normalisé EN 196-1.....	29
Photo II.6 : Granulats de Caoutchouc utilisés.....	30
Photo II.7 : Essai d'ouvrabilité.....	31
Figure II.1 : table d'étalement.....	32
Figure II.2 : Appareil de mesure de la conductivité thermique (CT Mètre).....	34
Figure II.3 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion .....	35
Photo II.9 : Dispositif expérimental de l'essai de flexion.....	35
Figure II.5 : Dispositif de l'essai de rupture en compression.....	36
Figure II.10 : Appareillage pour l'essai ultrasonique.....	37

Figure.III.1. Evolution de l'étalement de table avec le dosage en particules de caoutchouc....	40.
Figure.III.2. Effet du dosage en super-plastifiant sur l'étalement de table.....	40
Figure.III.3. L'influence du dosage en particules de caoutchouc sur la masse volumique des mortiers étudiés.....	42
Figure.III.4. L'influence du dosage en PCR sur la conductivité thermique.....	43
Figure.III.5. L'effet de du dosage en PCR sur la vitesse ultrasonique des mortiers légers.....	44
Figure.III.6. L'effet de dosage en PCR sur la résistance en traction par flexion.....	44
Figure.III.7. L'effet de PCR sur la résistance en compression.....	45



## **Introduction Générale :**

L'utilisation de déchets de caoutchouc dans les matériaux cimentaires représente une pratique écologique et économiquement avantageuse par rapport aux granulats minéraux conventionnels. Parmi ces matériaux réutilisables, les déchets de pneus usés constituent une source potentielle de problèmes environnementaux due à leur accumulation. Leur intégration dans la construction répond à la demande sociétale croissante en faveur du respect de l'environnement.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les possibilités d'utilisation des déchets de caoutchouc dans une matrice cimentaire afin de produire des mortiers légers capables d'améliorer l'isolation thermique des matériaux cimentaires, contribuant ainsi à la réduction de la consommation d'énergie fossile et des émissions de gaz résultant de son utilisation. Ces matériaux sont obtenus en remplaçant les granulats minéraux conventionnels par des particules de caoutchouc issues du broyage des déchets de pneus.

Pour atteindre cet objectif, des mortiers de ciment contenant différentes fractions de granulats de caoutchouc seront élaborés. L'influence des adjuvants tels que les super-plastifiants et les hydrofuges sur les propriétés des mortiers de ciment à l'état frais et durci sera évaluée.

La méthodologie de cette étude comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, une présentation des déchets de caoutchouc, des constituants du mortier de ciment et des facteurs influençant son comportement sera effectuée. Ensuite, la caractérisation des matières premières telles que le sable, le ciment et les granulats de caoutchouc, ainsi que l'exposition des différentes techniques expérimentales utilisées dans cette étude seront détaillées.

Enfin, les résultats de l'étude seront présentés, suivis d'une conclusion et de perspectives pour ce travail.

## **Chapitre I : Etat de l'Art sur les matériaux cimentaires incorporant des particules caoutchouc réutilisés**

### **I. 1. Introduction :**

Le présent chapitre propose une analyse bibliographique des travaux de recherche antérieurs sur l'effet des particules de caoutchouc réutilisés (PCR) sur propriétés du mortier léger. Il sera structuré en quatre grandes parties. La première partie abordera la problématique des déchets pneus et leur réutilisation avec les matériaux à base cimentaire. La deuxième partie se concentrera sur les constituants du mortier. La troisième partie examinera l'influence des particules de caoutchouc réutilisé sur les propriétés fraîches et durcies des matériaux cimentaires. Enfin, on discutera les propriétés de mortier léger à base des particules de caoutchouc et ces applications dans le domaine de la construction.

### **I .2. Problématique des déchets de pneus**

L'essor de la prise en compte de l'impact environnemental des constructions et des politiques de développement durable a suscité une réflexion sur les procédés et les matériaux de construction alternatifs. Le secteur de la construction, en particulier celui basé sur l'utilisation de matériaux cimentaires, est amené à évoluer dans ce contexte. Il est nécessaire de limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, de préserver les ressources naturelles, de considérer la déconstruction avec une analyse du cycle de vie, tout en améliorant les propriétés d'utilisation des matériaux conventionnels [1,2] .

Dans cette perspective, de nouveaux matériaux innovants "composites" devront à terme remplacer les matériaux usuels. En accord avec les principes du développement durable, les acteurs du secteur du bâtiment manifestent un intérêt croissant pour les coproduits et les déchets issus de l'industrie. C'est notamment le cas pour les déchets de caoutchouc, tels que les pneus usagés, qui peuvent à court terme remplacer certaines additions généralement utilisées comme renfort dans le béton. L'utilisation de ces déchets dans le domaine de la construction présente un double objectif : répondre à la demande sociétale d'un plus grand respect de notre environnement et apporter une valeur ajoutée à certains coproduits ou déchets tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde industriel [1,2].

En Algérie, l'accumulation des déchets de pneus usagés constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. En effet, l'utilisation de véhicules industriels de différentes catégories génère d'importantes quantités de déchets de pneus qui ne sont pas valorisés. Ils sont souvent entreposés dans des décharges non contrôlées, polluant ainsi l'environnement par leur incinération à l'air libre ou leur enfouissement [1]. En Europe, ces méthodes de réduction des déchets sont fortement critiquées et la réglementation actuelle impose la mise en place de filières de valorisation dans différents domaines. C'est dans ce contexte qu'intervient cette étude, qui vise à examiner les possibilités de recyclage des déchets de pneus en Algérie, notamment leur utilisation dans le domaine des matériaux de construction [2,3].

### 1.1. Estimation des déchets pneumatiques en Algérie

Sur la base des statistiques de l'Office National des Statistiques (ONS) concernant la répartition du parc automobile par genre de véhicules au 31/12/2009 ainsi que les immatriculations des véhicules automobiles durant le premier semestre 2010, nous avons calculé le nombre de véhicules en circulation au premier semestre 2010 par genre. Le parc automobile national algérien compte **4 171 827 véhicules** qui se répartissent en 62,162 % de véhicules de tourisme, 8,683 % en camions et 19,694% en camionnettes. Les autocars et autobus représentent 1,679 % du parc. Les tracteurs routiers 1,520 %, les tracteurs agricoles 3,136 %, les remorques 2,779 %, les motos 0,263 % et les véhicules spéciaux 0,080% (Tableau 1.1)[1,2] :

*Tableau 1.1 : Répartition du parc automobile en Algérie*

Genre	Véhicules	Pourcentage(%)
Véhicule de Tourisme	2 593 310	62,162
Camion	362 257	8,683
Camionnette	821 626	19,694
Autocar / Autobus	70 070	1,679
Tracteur Routier	63 417	1,520
Tracteur Agricole	130 839	3,136
Remorque	115 972	2,779
Moto	10 978	0,263
Véhicule Spécial	3 358	0,080
<b>Total</b>	<b>4 171 827</b>	<b>100</b>

## **I.2. l'impact des déchets pneus sur la nature :**

La pollution se définit comme une altération néfaste de l'environnement naturel, largement attribuable à l'action humaine, aux niveaux de radiation, à la composition physico-chimique de l'environnement naturel et à la biodiversité. Les déchets représentent une menace non seulement pour les paysages, mais également pour la pollution des ressources naturelles telles que l'air, le sol et l'eau. De plus, ils exposent les êtres humains à des nuisances et des dangers, certains étant potentiellement graves, en particulier les déchets spéciaux présentant des caractéristiques dangereuses telles que l'inflammabilité, la toxicité, l'irritation, etc [1,2]. De plus, la combustion des déchets dans des décharges à ciel ouvert contribue largement à la détérioration de la qualité de l'air et favorise l'émergence de maladies respiratoires. Selon l'enquête nationale de santé publique de 1990, les maladies respiratoires occupent la première place en termes de morbidité ressentie (35%) et de motifs de consultation médicale (27,2%), et elles se classent au deuxième rang des maladies chroniques identifiées. Actuellement, le nombre d'asthmatiques en Algérie est estimé à environ 2 millions. La répartition des cas varie selon les régions, avec 38% en région centrale, 31% en région orientale, 22% en région occidentale et 9% en région sud. Cette distribution est influencée par le taux de pollution atmosphérique, qui est étroitement lié à l'urbanisation et à l'industrialisation des différentes régions[4].



*Figure.I.2. Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés.*

## **.I.3. Les composants d'un pneu**

Le pneu est généralement composé de caoutchouc naturel ou synthétique, de noir de carbone et de soufre. Sa constitution varie peu entre les pneus tourisme et poids lourds [2]. En fonction des altérations, on distingue deux types des pneus

- **Les pneumatiques usagés réutilisables (PUR)**

Il existe deux filières pour les Pneus Usagés Réutilisables, l'une est le rechapage (remplacement de la bande de roulement) qui concerne surtout les pneus de poids lourds et d'engins de chantier et la seconde est la commercialisation sur le marché de l'occasion ou à l'export, dans le cas où les pneus n'ont pas atteint la limite d'usure autorisée.

**- Les pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR)**

Sont les pneus qui ne peuvent plus assurer la mobilité d'un véhicule en respectant les normes de sécurité, donc on doit les éliminer.

Le tableau ci-dessous présente en ordre d'importance les différentes matières contenues dans le pneu.

**Tableau I.2: Différentes matières contenues dans le pneu [2].**

Matériaux	Pneu Tourisme	Pneu Poids Lourds
Elastomères	47%	43%
Noir de carbone	21.5%	21%
Acier	16.5%	27%
Textile	5.5%	0%
Oxyde de Zinc	1%	2%
Soufre	1%	1%
Autres	7.5%	6%

**I.4. Valorisation des pneus usagés**

Le pneu usagé, qui a complété un cycle de vie, réorienté ensuite vers l'industrie du rechapage ou de la vente de pneus d'occasions. Quant au pneu hors usage, il est inapte à reprendre la route qui doit être éliminé (figure.I.14). Toutefois, dans la littérature, les pneus usagés désignent les pneus usagés réutilisables et les pneus hors usage sont les pneus usagés non réutilisables. Dans notre vocabulaire, les pneus usagés sont les pneus usagés non réutilisables ou encore les pneus hors usage. Les pneus usagés sont utilisés sous différentes formes dans les applications industrielles telles que les infrastructures routières, le remplissage d'aire de jeux, le domaine du génie civil et de nombreux autres produits. La solution économique le plus fiable, qui permet d'éliminer complètement ces déchets, la valorisation. Il existe plusieurs voies de valorisation des pneus usagés qui sont pratiquées parmi lesquels: la valorisation énergétique et la valorisation matière [2,5].

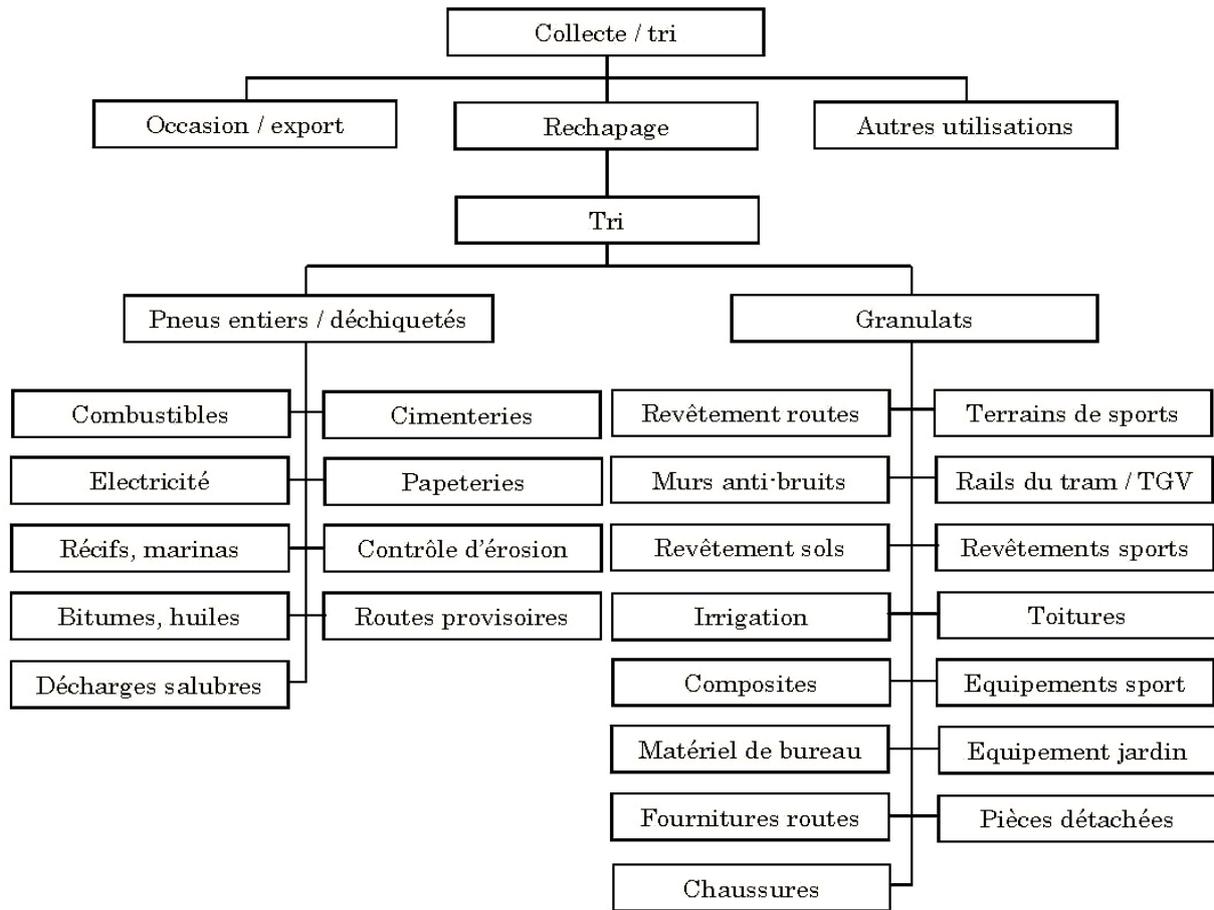


Figure I. 14 : Schéma des différentes filières de valorisation

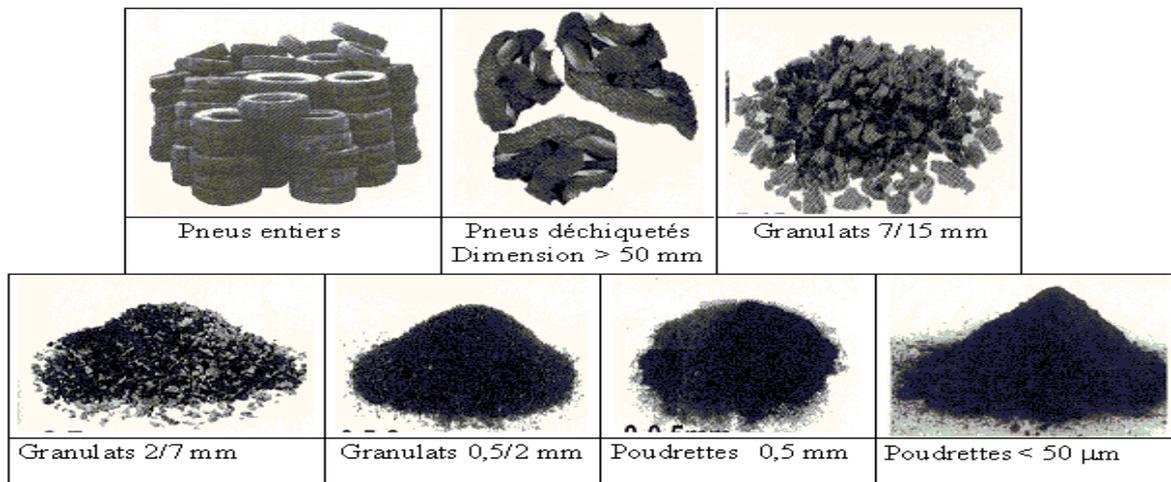


Figure I. 15 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés (Antoine, 2002).

## I.5. Techniques de valorisation des pneus dans le secteur du Génie Civil

### I.5.1. Usage des poudrettes et des granulats de caoutchouc dans le domaine routier

Le broyage poussé permet d'obtenir un matériau de granulométrie inférieur à 1,2 mm, utilisable en technique routière. Il a été estimé par Trivalor que son utilisation sur les chantiers routiers entraîne un surcoût de 10 % par rapport à l'emploi d'un bitume non modifié. Cette différence est compensée par la durée de vie supérieure du bitume traité et par les propriétés thermiques meilleures [6].

Les bitumes mélangés avec poudrettes de caoutchouc permettent également de :

- ✓ limiter les nuisances sonores.
- ✓ d'améliorer la sécurité des automobilistes sur routes mouillées.
- ✓ de limiter les nuisances à l'environnement par une limitation du salage en hiver pour les pays froids, du fait d'une meilleure tenue de route à hautes et à basses températures.
- ✓ Les poudrettes ou les granules pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres matériaux comme les bétons et les mortiers.

### **I.5.2. La technique Pneu sol**

Le Pneu sol est formé par l'association de pneus usagés non rechapés (poids lourds ou tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets. Les éléments de pneus, sont utilisés comme renforts du massif de sol, les bandes de roulement ou les flancs, sont découpés et associés en nappe par des attaches. Ces bandes peuvent être posées sur chant ou aplaties. Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris par Dr Nguyen Thanh LONG Ingénieur du LCPC, est largement diffusée depuis 1982. Les différentes applications concernent des ouvrages de soutènement, des ouvrages réducteurs de poussées ou de charges, des murs antibruit, des ouvrages de protection des berges et des pentes et talus. Plus de 12 ouvrages Pneu sol Anti Marston, sont réalisés en Algérie en 1986 [1,6].



**Figure 1.16 : Chantier expérimental Pneu sol à Bou-Ismaïl****Tableau I.6 : Ouvrages Pneu sol réalisés**

<i>Types d'ouvrage</i>	<i>Lieu de réalisation</i>	<i>Nombre d'ouvrage</i>
Ouvrage de soutènement	Mur de soutènement provisoire Métro d'Alger (2002)	1 Ouvrage
Stabilité de talus	Renforcement d'un talus Evitement de la ville de Bousmail Wilaya de Tipaza (2005)	1 Ouvrage
Protection contre les glissements	Wilaya de Bejaia (2006)	1 Ouvrage
Stabilité de talus	Modernisation de la RN 11- Wilaya de Mostaganem (2007)	1 Ouvrage
Répartiteur de contrainte	Ain T'émouchent (1986)	12 Ouvrages
Digue de Protection	Pont de Bou Arfa - Wilaya de Blida (2008)	1 Ouvrage

## **I.2. Mortier et ces constituants :**

### **I.2.1 Définition et rôles d'un mortier de ciment :**

C'est un mélange dans des proportions convenables (suivent la destination et l'emploi du mortier) de sable, de liant et d'eau, pour former une pâte de plasticité déterminée qui durcie avec le temps pour atteindre des caractéristiques similaires à une pierre naturelle. En plus de la liaison et de la cohésion qu'il assure aux éléments de maçonnerie, de la protection de la construction (rôle d'enduit) contre l'humidité due aux intempéries. Le mortier est une matière première entrant dans la confection des éléments préfabriqués et est le principal constituant du béton, il a pour rôle de colmater les vides inter-granulaires [7,8].

### **I.2.2 Différents types de mortier :**

Selon leurs modes d'utilisation, on peut distinguer plusieurs types de mortiers d'après les normes [9] :

#### **I.2.2.1 Mortiers de maçonnerie :**

On peut classer les mortiers en trois catégories selon l'origine du liant entrant dans leur composition :

### **A. Mortiers de ciment :**

C'est un mélange de ciment, de sable et de l'eau. Ils sont utilisés couramment pour les différents travaux du revêtement des murs et du montage des murs en panneaux.

### **B. Mortier de chaux :**

Ils sont composés d'un mélange de Chaux, de sable et de l'eau. Ils sont très plastiques et adhèrent bien à la surface, ils ont un faible retrait. Les mortiers de chaux sont employés dans les parties de bâtiment du dessus de sol.

### **C. Mortier bâtards :**

C'est un mélange de ciment, de la chaux, du sable et de l'eau, ils sont suffisamment maniables ; ils ont une forte résistance mécanique et une forte résistance au gel.

#### **I.2.2.2 Mortiers spéciaux :**

Ils sont utilisés dans le remplissage des joints formés par les éléments de construction en béton armé préfabriqué, mortier d'isolation hydrofuge, acoustique et résistance aux rayonnements.

#### **I.2.2.3 Mortiers de réparation :**

Ce sont des produits nouveaux utilisés pour la réparation des ouvrages en béton. Ils peuvent être classés en trois catégories selon la nature du liant qui assure la cohésion de l'ensemble : hydraulique (ciment), organique réactifs (résine synthétique) ou mixte.

### **I.2.3 Principaux constituants du mortier de ciment:**

#### **I.2.3.1 Le sable:**

C'est un matériau naturel ou artificiel dont au moins 50% des diamètres de grains sont supérieurs à 80 µm et dont la taille n'excède pas 5mm [7,8]. La classification du sable est fondée sur trois paramètres essentiels :

- ❖ La provenance des grains (calcaire, silice) ;
- ❖ La granularité ;
- ❖ La propreté.

En effet, plusieurs types de sables sont à distinguer, parmi lesquels on trouve :

- Les sables naturels : Ils sont utilisés en construction des différents projets de

Construction et prélevés soit dans les alluvions des rivières ou des fleuves (sable Roulé), soit sur les plages ou les dunes naturelles.

- Les sables artificiels : Sont soit du sable de concassage ou du sable roulés provenant de la production des matériaux concassés.

### I.2.3.2 Le ciment:

Il s'agit d'un liant hydraulique artificiel, principalement fabriqué à partir d'un mélange d'environ 75% de calcaire, d'alumine et de silice présents dans l'argile, représentant environ 25%. Le processus de fabrication du ciment implique principalement le broyage des matières premières, leur mélange dans des proportions spécifiques, puis leur cuisson dans un grand four rotatif à une température d'environ 1450°C. À cette température, les matières premières fondent partiellement pour former des nodules appelés clinker. Après refroidissement, le clinker est broyé en une fine poudre, à laquelle est ajouté un pourcentage de gypse (environ 3 à 5% du poids du clinker) ainsi qu'un pourcentage d'additifs inertes ou actifs (comme le laitier, la pouzzolane, les cendres, le calcaire, etc.) afin d'obtenir le type de ciment désiré, en fonction du type de construction à réaliser [1, 4] . Les ciments sont classés en cinq types principaux en fonction de leur composition, selon la norme NFP15-301, notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans la notation européenne [9] .

**Tableau.I.3. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition**

	Ciment Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLK-CEM V/A	CLK-CEM V/B
Clinker (k)	≥ 95%	≥ 80% ≤ 94%	≥ 65% ≤ 74%	≥ 35% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 34%	≥ 5% ≤ 19%	≥ 65% ≤ 90%	≥ 45% ≤ 64%	≥ 40% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 39%
Laitier (S)	•	6% ≤ totale	21% ≤ totale	≥ 36% ≤ 65%	≥ 66% ≤ 80%	≥ 81% ≤ 95%	•	•	≥ 18% ≤ 30%	≥ 31% ≤ 50%
Pouzzolane (Z)	•	≤ 20%	≤ 35%	•	•	•	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendres siliceux (V)	•	(fumée de silice	(fumée de silice	•	•	•	≤ 35% (fumée	≤ 55% (fumée	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	•	≤ 10%	≤ 10%	•	•	•	≤ 10%	≤ 10%	•	•
Cendres calciques (W)	•			•	•	•	•	•	•	•
Schistes (T)	•			•	•	•	•	•	•	•
Calcaire (L)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Fillers (F)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

En fonction de la résistance normale à 28 jours, trois classes principales de ciment sont définies et des sous-classes "R" associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées [9]. Ces classes sont notées 32.5, 42.5 et 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau (I-2).

**Tableau.I.4: Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe**

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours P.15 -433 ( $\mu\text{m/m}$ )	Début de prise EN 196-3 (Min)	stabilité EN 196-3 (mm)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Min	Max			
32.5		17.5	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$	$\leq 800$	$\geq 90$	$\leq 10$
32.5R	$\geq 13.5$	•	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$	$\leq 1000$	$\geq 90$	$\leq 10$
42.5	$\geq 12$	•	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$	$\leq 1000$	$\geq 60$	$\leq 10$
42.5R	$\geq 20$	•	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$	$\leq 1000$	$\geq 60$	$\leq 10$
52.5	$\geq 20$	•	$\geq 52.5$	•	•	$\geq 60$	$\leq 10$
52.5R	$\geq 30$	•	$\geq 52.5$	•	•	$\geq 60$	$\leq 10$

### I.2.3.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. Cette eau doit être propre et satisfaire aux exigences de la norme actuelle NF.18-303 [9]. L'eau utilisée dans la préparation des gâchés des mortiers élaborés dans ce travail est une eau potable du robinet.

### I.2.4. Propriétés essentielles d'un mortier de ciment:

Les propriétés principales d'une pâte de mortier sont la fluidité, l'hydrophile et la résistance mécanique.

#### I.2.4.1 L'ouvrabilité et la maniabilité:

Une pâte de mortier peut avoir, suivent les composants, des consistances différentes, depuis l'état sec jusqu'à l'état fluide. Les mortiers de maçonnerie, des travaux de finissage des bâtiments et autres doivent être suffisamment maniable. L'ouvrabilité de la pâte de mortier détermine la maniabilité, c'est-à-dire le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie, sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérente à la surface de base [7].

#### I.2.4.2 La résistance mécanique :

La résistance d'un mortier au cours du durcissement dépend de l'activité du liant et du rapport E/C. Elle dépend aussi de la quantité de ciment et du sable employé. D'autre part, la résistance du mortier est fonction de la résistance des produits de gel (silice de calcium hydraté S-C-H). Cependant, la source réelle de la résistance du mortier n'est pas entièrement maîtrisée [7, 8, 9,10], mais dépend probablement de deux types de liaisons homogènes:

- Le premier type est l'attraction physique entre les surfaces solides séparées seulement par les petits produits de gel (moins de 3nm). Cette attraction est généralement connue sous le nom de force de Van Der Waals.
- La deuxième source de cohésion vient des liaisons chimiques. Puisque le gel de ciment n'est pas gonflant, c'est -à dire que les particules ne peuvent être dispersées en ajoutant de l'eau, il semble que les particules de gel s'entrecroisent sous l'effet des forces chimiques. Ces dernières sont très fortes que les forces de Van Der Waals, mais les liaisons chimiques ne couvrent qu'une faible fraction de la surface des particules de gel.

#### **I.2.4.3 Réaction d'hydratation:**

L'hydratation du ciment fait référence à toutes les réactions qui surviennent entre le ciment et l'eau. En d'autres termes, lorsque les silicates et les aluminates entrent en contact avec l'eau, ils forment des produits d'hydratation (gel) qui, avec le temps, durcissent pour former une masse solide et résistante (la pâte de ciment hydratée). Lechatelier fut le premier à remarquer que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement identiques à ceux des composés individuels, dans des conditions similaires. Cette observation fut ultérieurement confirmée par H.H. Steneinour [11]. En raison de la faible solubilité des produits d'hydratation du ciment dans l'eau, quelle que soit la méthode de précipitation des produits d'hydratation, la vitesse de cette réaction diminue progressivement. Ainsi, même après un laps de temps considérable, une quantité significative de ciment demeure non hydratée. Par exemple, après 28 jours d'exposition à l'eau, T.C. Powers [12] a constaté que les grains de ciment ne s'étaient hydratés que jusqu'à une profondeur de 4  $\mu\text{m}$ , et jusqu'à 8  $\mu\text{m}$  après un an. Il a démontré que l'hydratation totale dans des conditions normales n'est possible que pour les particules de ciment inférieures à 50  $\mu\text{m}$ . En revanche, une hydratation complète a été obtenue en broyant continuellement le ciment dans l'eau pendant cinq jours.

#### **I.2.4.4. Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement):**

Après le processus de prise, l'hydratation du ciment se prolonge, entrant ainsi dans la phase de durcissement. Cette période est significativement plus longue ; pour les ciments à prise rapide, la quasi-totalité de la résistance est atteinte après quelques jours, tandis que pour d'autres types de ciments, le durcissement peut se poursuivre pendant plusieurs mois . [7,9] Les propriétés mécaniques les plus importantes de la pâte de ciment durcie semblent dépendre non seulement de la composition chimique du ciment hydraté, mais aussi de la structure poreuse des produits d'hydratation (gel), observée à l'échelle colloïdale. Par conséquent, une bonne compréhension des propriétés physiques de la structure du gel de ciment est essentielle. La pâte de ciment fraîche forme un réseau plastique de particules de ciment dans l'eau ; cependant, une fois que la prise a eu lieu, son volume apparent ou brut reste approximativement constant.

À n'importe quel stade de l'hydratation, la pâte durcie est composée d'hydrates très peu cristallisés des différents composés, qui sont collectivement considérés comme un gel, de cristaux de  $\text{Ca(OH)}_2$ , de quelques composants mineurs, de ciment non hydraté et des espaces vides restants remplis d'eau dans la pâte fraîche. Ces vides sont désignés sous le terme de pores capillaires, mais à l'intérieur même du gel, il existe des vides interstitiels appelés pores de gel. La structure de la pâte de ciment a été schématisée par Power T.C. [12] La surface de la phase solide augmente considérablement pendant l'hydratation et une grande quantité d'eau libre est adsorbée sur cette surface. Si aucun mouvement d'eau vers ou depuis la pâte de ciment n'est possible, les réactions d'hydratation consomment presque toute l'eau, ne laissant qu'une quantité trop minime pour saturer les surfaces solides, entraînant ainsi une diminution de l'humidité relative à l'intérieur de la pâte, ce qui est connu sous le nom d'auto-dessiccation. Étant donné que le gel ne peut se former que dans un espace rempli d'eau, ce processus se poursuit jusqu'à la fin du durcissement [7, 13, 14].

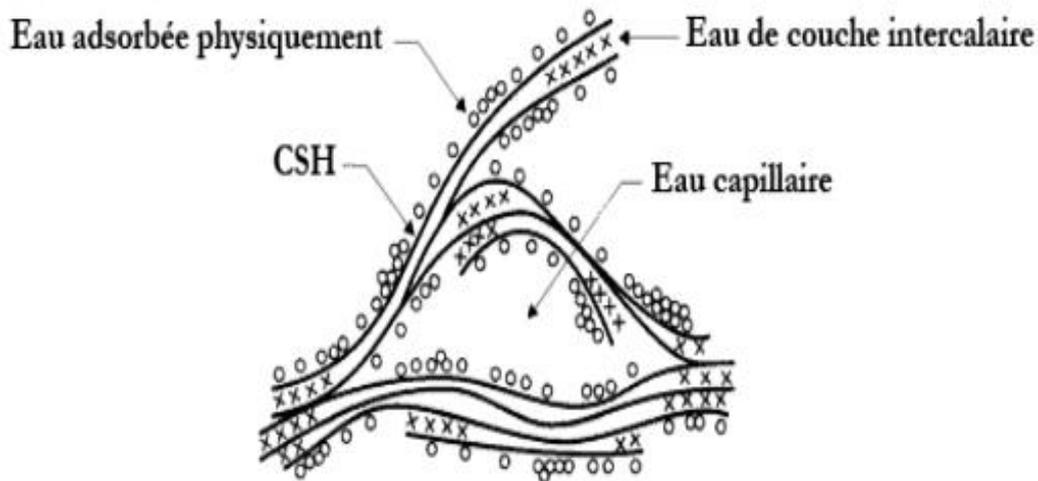


Figure.I.4.La structure de la pâte de ciment selon le modèle de Feldman et Serada[7].

### I.3. Les propriétés des matériaux cimentaires incorporant les particules de caoutchouc réutilisés :

#### I.3.1. Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant. Güneyisi et al. [16] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont de 0% à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF). La Figure I.6 illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en G.C. et du dosage X% de la fumée de silice SF. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.

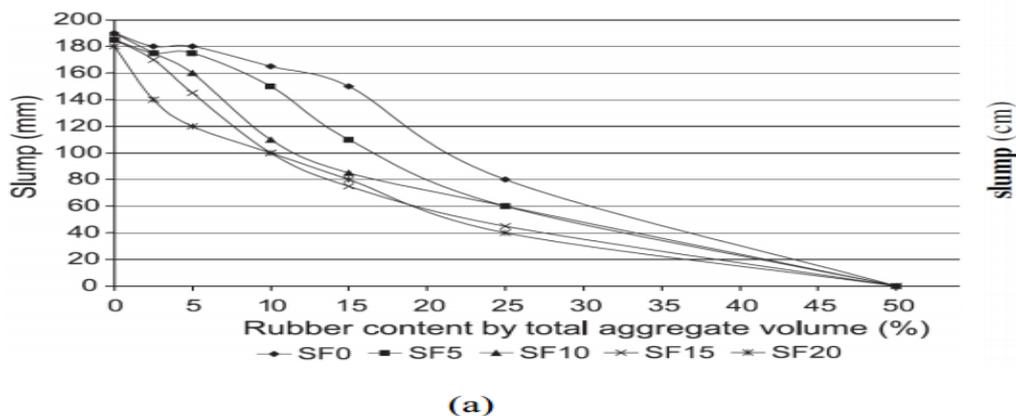
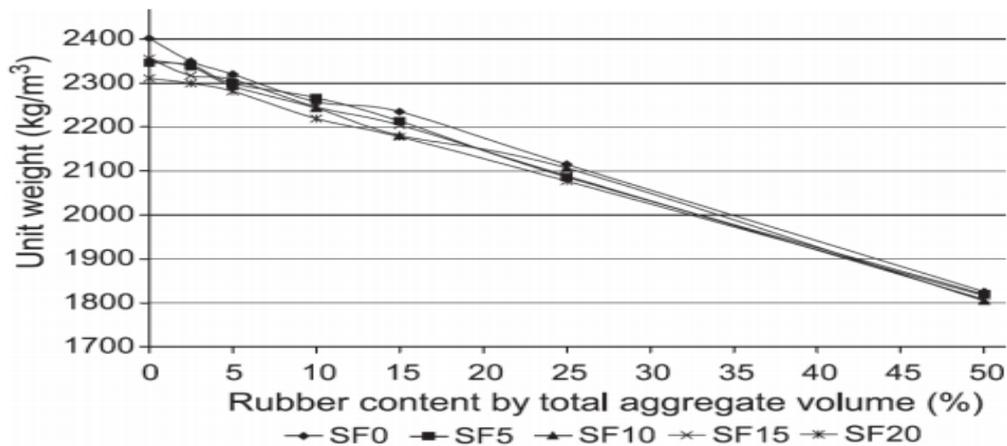


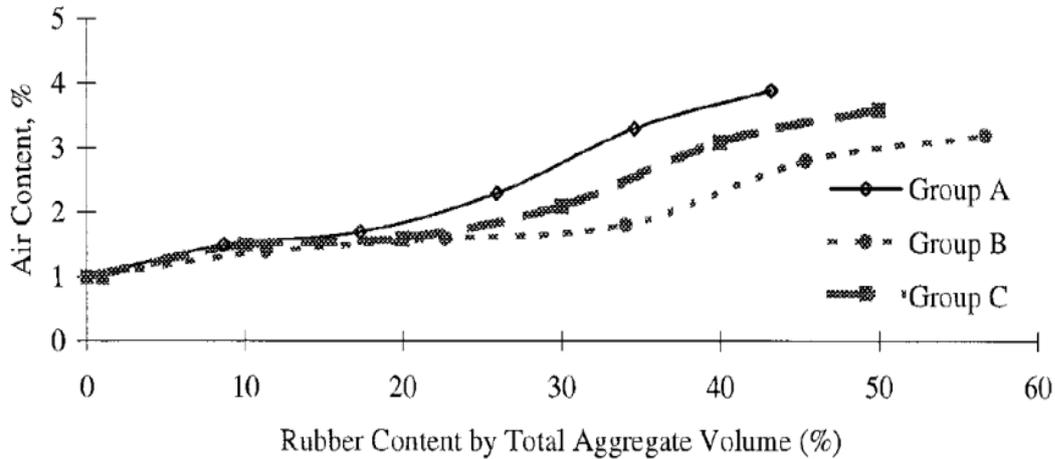
Figure I.6 : Influence de G.C. sur l'affaissement [16].

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Comme le montre la Figure I.7, Güneyisi et al. [16] ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence (la légende étant celle utilisée précédemment à la Figure I.7



**Figure I-7 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GCR[16].**

Concernant la teneur en air occlus, Khatib et al. [17] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure I.8 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des G.C. fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C. Ces chercheurs pensent que la surface rugueuse des particules de caoutchouc sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des G.C.



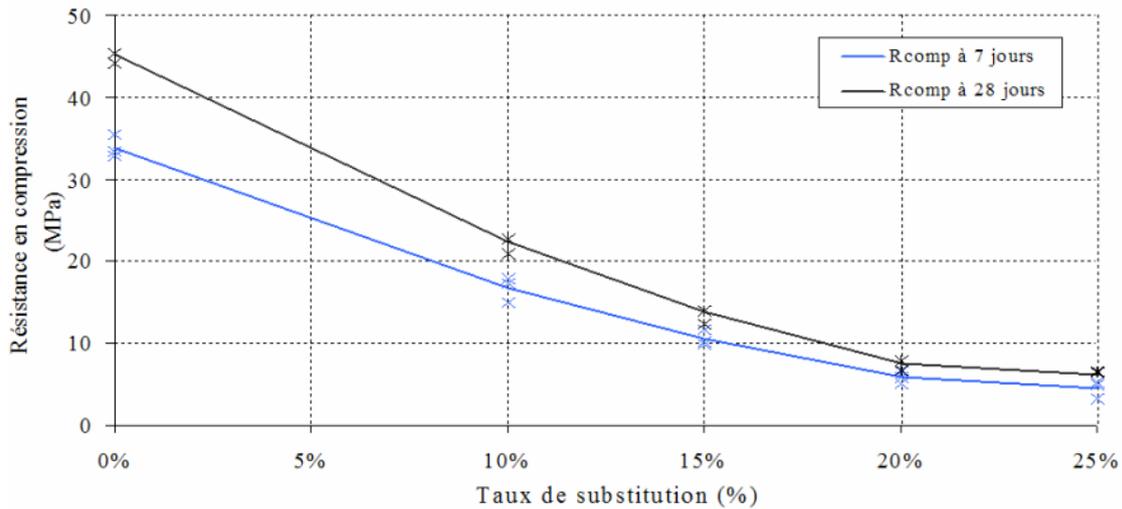
*Figure I-8 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [17].*

### I.3.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C.

#### I.3.2.1. Résistance en compression

La caractéristique essentielle des matériaux cimentaires durcis est la résistance en compression à un âge donné. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le dimensionnement des ouvrages. Ainsi, l'étude de cette résistance en compression peut permettre d'avoir une idée globale sur la qualité du béton. On verra que la résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc. Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des G.C. ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des G.C. entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

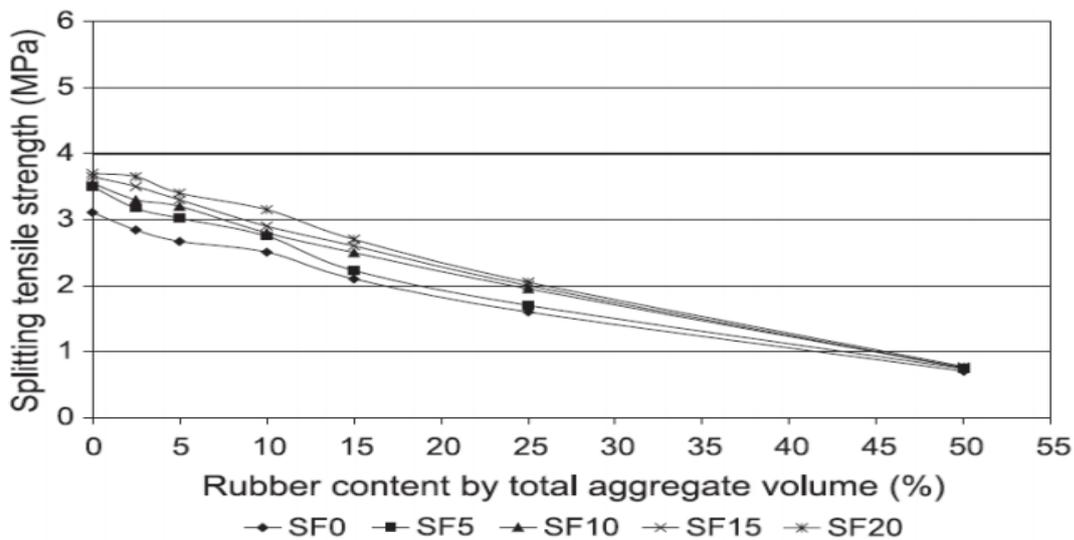
L'examen des résultats obtenus par Garros [18] lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des G.C. sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la Figure I-9 ont confirmé que la présence de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en G.C. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.



**Figure.I.8: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [18].**

### I.3.2.2. La résistance à la traction

Dans l'étude de Güneyisi et al. [16] rapportée dans les pages précédentes, les auteurs observent une tendance baissière de la résistance en traction similaire à celle de la résistance en compression. Cependant, à même taux d'adjonction de G.C., la chute de la résistance en traction s'avère moins importante par rapport à celle observée en compression. La variation de la résistance en traction (mesurée par le biais d'essais de fendage) en fonction du taux d'adjonction des G.C. est illustrée par la Figure I-11 (le reste de la légende étant celui utilisé précédemment).



**Figure.I.9. Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [16].**

### I.3.2.3. L'absorption d'eau

S'agissant de l'absorption d'eau, les résultats de Benazzouk et al. [19] ont montré que la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C., ce comportement est expliqué par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire.

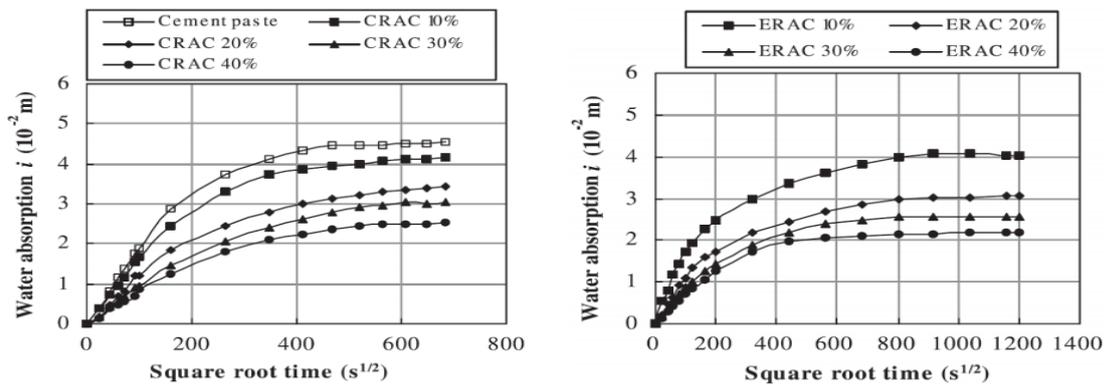


Figure I-30 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C [19].

### I.3.2.4. Capacité de déformation

Si on se contente d'analyser les effets de l'incorporation des G.C. sur les seules résistances en compression et en traction, la conclusion est sans équivoque : cette incorporation est défavorable à la capacité portante et ne présente que des inconvénients.

Les travaux conduits par Sukontasukkul et al. [20] montrent que, malgré la chute de la capacité portante en traction par flexion, les blocs de béton incorporant des G.C. présentent une flèche significativement plus importante en comparaison du bloc en béton de référence. Ces résultats révèlent que les composites des caoutchoucs ont une capacité de déformation plus élevées comparativement au béton de référence, cette bénéfique propriété, permet d'améliorer la ductilité et diminue la fragilité des matériaux cimentaires.

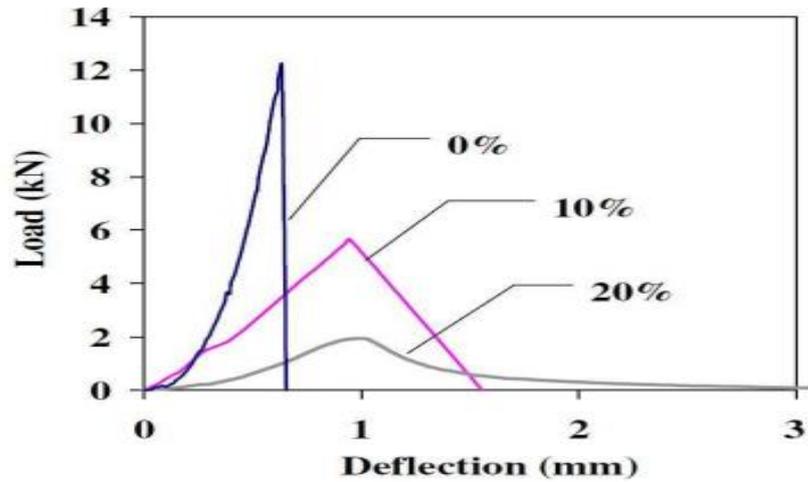


Figure I-15 : Comportement en flexion des blocs de béton caoutchouc, [20].

Des résultats similaires ont été obtenus par Garros [18] qui a montré que la flèche associée à la charge maximale en flexion est plus importante lorsque la fraction du volume de sable remplacé par des granulats en caoutchouc (0, 30 et 50%) est plus élevée.

### I.3.2.5. Comportement au Feu

Les récentes études, [21] sur le comportement des mortiers de caoutchouc aux températures élevées, incorporant un taux de granulats de caoutchouc allant de 0 à 9%, montre que les composites de caoutchouc exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement, ont des réponses thermiques similaires comparativement au mortier de référence (figure.I.21).

[21], Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar, Constr. Build. Mater. 26 (9) (2016) 77–85.

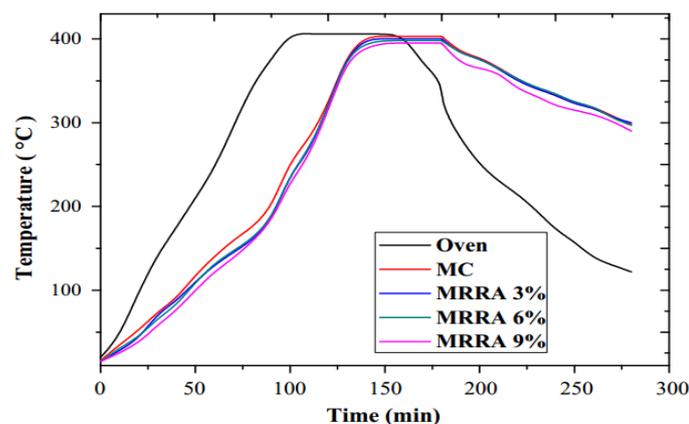
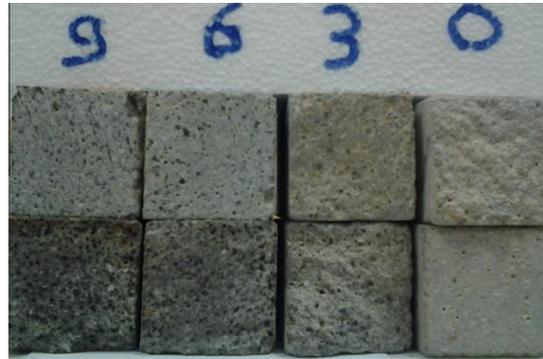


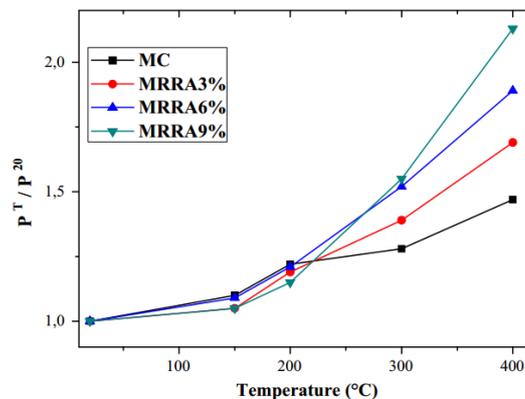
Figure.I.22. la montée en température du four et des mortiers étudiés pour différents taux des granulats de caoutchouc recyclés [21].

De plus, les spécimens non montrent aucun signe d'écaillage de surface ou d'éclatement. Néanmoins, les mortiers contenant plus de 3% des granulats de caoutchouc recyclés ont menacé par la décomposition de ces derniers (brûlage), ce comportement montre que les granulats de caoutchouc sont très sensibles aux températures au-delà de 200°C.

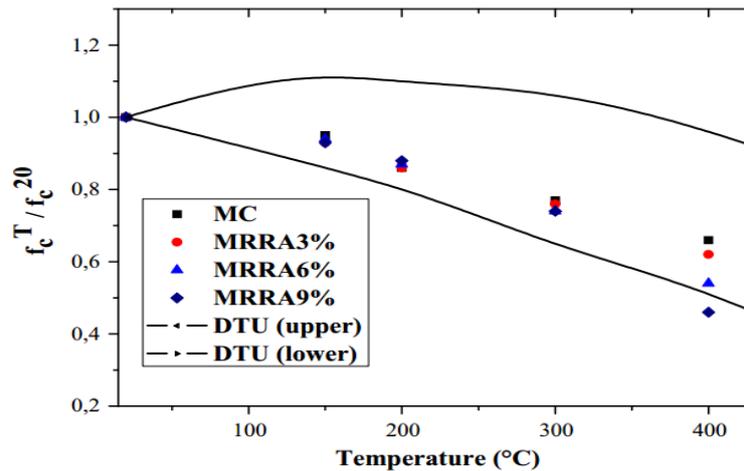


**Figure.I.23. Vue des demi-spécimens exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement à la ambiants (20°C) et à la température 400°C [21].**

Les mêmes les composites cités ci-dessus, les propriétés physico-mécaniques (la perte en masse, la vitesse d'impulsion ultrasonique, la porosité ouverte, la résistance à la compression et la résistance à la traction) composites étudiés sont stables pour les températures jusqu'à 200°C. Au-delà de ce seuil, les propriétés physiques des composites étudiés sont menacés par la décomposition des granulats de caoutchouc, notamment pour les mortiers incorporant les dosages supérieurs à 3% (figure.I.24 et I.25). Donc, pour maintenir la stabilité physico-mécaniques des composites cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc sous l'effet de température le dosage de ces derniers ne doit pas dépasser 3%. Dans cette limite on peut utiliser les granulats de caoutchouc avec les matériaux cimentaires en toutes sécurités.



**Figure.I.24. Evolution de la porosité ouverte relative des mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage [100]**



*Figure.I.25. Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression relative de cette étude et ceux de DTU [21].*

#### **I.4. Le mortier de ciment léger incorporant les particules de caoutchouc réutilisés :**

Les mortiers de ciment léger incorporant des particules de caoutchouc recyclé sont une innovation dans le domaine de la construction durable. Voici quelques informations détaillées à leur sujet :

##### **I.4.1. Composition :**

Ces mortiers sont généralement composés de ciment Portland, d'agréats légers (tels que la perlite, la vermiculite ou des billes de polystyrène expansé) et de particules de caoutchouc recyclé [4,19,20].

##### **I.4.2. Particules de caoutchouc :**

Les particules de caoutchouc proviennent souvent de pneus recyclés ou d'autres produits en caoutchouc usagés. Ces particules sont ajoutées au mélange de mortier pour améliorer certaines propriétés telles que la résistance au choc, l'isolation acoustique et thermique, ainsi que pour réduire la densité globale du mortier [1-4].

##### **I.4.3. Propriétés mécaniques :**

L'ajout de particules de caoutchouc peut affecter les propriétés mécaniques du mortier. Par exemple, il peut réduire sa résistance à la compression mais augmenter sa résistance à la traction et à la flexion. Des études sont nécessaires pour optimiser la quantité de particules de caoutchouc ajoutée afin d'obtenir un équilibre entre ces différentes propriétés.

#### **I.4.4. Durabilité :**

Les mortiers de ciment léger incorporant des particules de caoutchouc recyclé sont souvent vantés pour leur durabilité accrue. Le caoutchouc peut aider à réduire la fissuration du mortier, ce qui peut prolonger sa durée de vie et réduire les besoins en entretien [4, 20-24].

#### **I.4.5. Isolation thermique et acoustique :**

En raison de la présence de particules de caoutchouc, ces mortiers offrent généralement une meilleure isolation thermique et acoustique par rapport aux mortiers conventionnels. Cela peut être particulièrement avantageux dans les applications où une isolation supplémentaire est souhaitée, comme dans les murs extérieurs ou les revêtements de sol .

#### **I.4.5. Applications :**

Les mortiers de ciment léger incorporant des particules de caoutchouc peuvent être utilisés dans une variété d'applications de construction, y compris comme enduits de finition, revêtements de sol, matériaux d'isolation, ou même comme remblais dans les zones où une faible densité est souhaitée [4,16-20].

#### **I.4.6. Aspect environnemental :**

L'utilisation de particules de caoutchouc recyclé dans ces mortiers contribue à réduire les déchets de caoutchouc et à promouvoir la durabilité environnementale en réutilisant des matériaux autrement destinés à l'enfouissement [20-24].

En résumé, les mortiers de ciment léger incorporant des particules de caoutchouc recyclé offrent une alternative écologique et performante aux mortiers traditionnels, en offrant des avantages tels que la légèreté, l'isolation thermique et acoustique améliorée, ainsi qu'une meilleure durabilité.

## Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales

### II-1) Introduction :

L'objectif principal de cette étude, est l'évaluation expérimentale de l'effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc recyclés, sur le comportement de mortier léger de ciment. La première partie de ce chapitre concerne la caractérisation des matières premières, utilisées pour la fabrication des différents mortiers légers. La seconde partie sera consacrée à la formulation, la préparation des mortiers légers étudiés. Par la suite, les différents protocoles expérimentaux utilisés pour déterminer le comportement physiques et mécaniques que ce soit à l'état fraîche ou à l'état durcie.

### II-2) Caractérisation des matières premières :

#### II.2.1) Essai sur le sable :

#### II.2.2) Analyse granulométrique : NFP.18-560[21]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. On utilise une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par tamis est. La courbe qui relie le pourcentage des passants aux diamètres des tamis est appelée courbe granulométrique. A partir de l'analyse Granulométrique, certains coefficients de classification peuvent être déterminés :

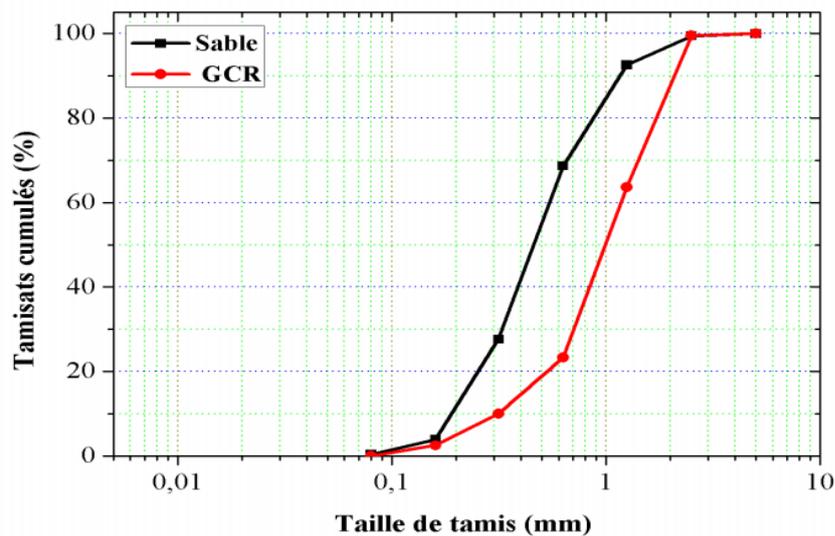


*Photo II.1 : Analyse granulométrique*

**A. Module de finesse :**

La finesse du sable étudié peut être quantifiée par le calcul du module de finesse  $M_f$ . celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis d'ouverture 0.08-0.16-0.315-0.63-1.25-2.5- et 3.15 le module de finesse représente, en quelque sorte, et de manière approchée, la surface comprise entre la courbe granulométrique et l'axe horizontale supérieure du graphe. Il est exprimé par la formule suivante :

$$M_f = \frac{[\sum \text{des refus des tamise (0.08;0.16;0.315;0.63;1.25;2.5;3.15)en(\%)]}{100} \quad (\text{II. 1})$$



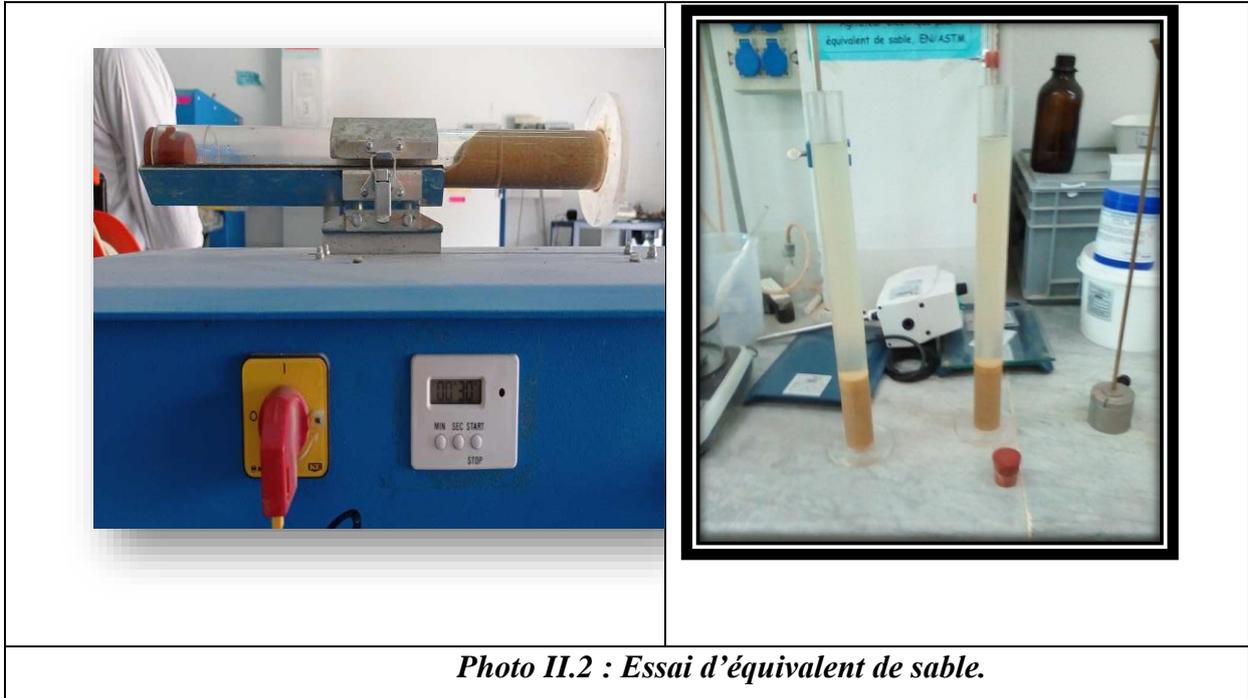
**Figure(II.1) : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés.**

D'après la courbe granulométriques, on remarque que les granulats de caoutchouc recyclés sont plus fins de les granulats de sable de dune.

**II.2.1.2 Equivalent de sable [21] :**

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable, il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, a

la hauteur totale du floculat. Ce coefficient est déterminé conformément à la norme **NFP.18-598. ON** détermine la qualité des sables par les coefficients suivants :



*Photo II.2 : Essai d'équivalent de sable.*

L'équivalent du sable visuel :  $E_{sv} = h'2/h1$  (II.2)

L'équivalent du sable par piston :  $E_{sp} = h2/h1$  (II.3)

Avec :

$h2, h'1$  : hauteur du sable propre seulement avec et sans piston ;  $h1$  : hauteur du sable + les éléments fins.

**Tableau II.1 : Résultats d'essais d'équivalent de sable testé**

Essai	<b>h1(cm)</b>	<b>h2 (cm)</b>	<b>Esv(%)</b>
<b>1</b>	13.2	11.10	84.09

### II.2.1.3 Masse volumique apparente et absolue :

La masse volumique apparente et absolue des différents granulats est déterminés conformément à la norme **NFP 18-555[3]**.

- **Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente est le rapport de la masse d'échantillon sec  $M$  au volume total apparent  $V_t$ . Il s'agit de rempli un volume de  $1 \text{ dm}^3$  et déterminer sa masse  $M$  par peser.

- **La masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Pour déterminer celle-ci, on utilise la méthode de l'éprouvette graduée. Pour opérer dans de bonnes conditions, on utilise une éprouvette graduée en verre de  $500 \text{ cm}^3$ . Le volume du liquide déplacé détermine le volume absolu  $V_s$  des grains solides.

$$\rho_s = M/V_s \quad (\text{II.4})$$



*Figure II.4 : Masse volumique apparente*

### II.1.2. Essai sur le ciment :

#### II.2.2.1. Masse volumique absolue : NFP 18-558[21]

On détermine la masse spécifique d'un liant par le densimètre le Chatelier. La masse spécifique peut être indice de la qualité du liant, en générale, sa valeur permet de déceler l'introduction des adjuvants ou des produits étrangers au liant la masse spécifique est la masse d'un liant par unité de volume de matière pleine, examine dans les conditions ambiantes (température, pression) constantes.

Afin de réaliser cet essai, il faut que le liant à analyser soit nettement pulvérisé en se servant du benzène ou d'une essence minérale n'ayant pas une action chimique sur le liant à analyser, la température doit rester constante pendant l'opération (18-20°C).

- On pèse 60g du liant ;
- On introduit cette quantité dans le densimètre le Chatelier déjà rempli du benzène jusqu'à un niveau déterminé ;
- On introduit le densimètre dans un bain thermostatique à une température de (20±1°C) ;
- Lorsque le niveau du benzène devient stable on note le volume déplacé V ;
- On calcule la masse spécifique par la formule suivante.

$$\rho_s = \frac{M}{V_s} \text{ (II.7)}$$

Où ; M est la masse du liant dans le densimètre.

#### II.1.2.2. Masse volumique apparente :

La densité apparente d'un matériau est le poids d'une unité de volume de matériau. Il s'exprime en kg/m<sup>3</sup>. A cet effet on se sert des équipements suivants :

- 1-un entonnoir ;
- 2- un récipient d'un litre de volume
- 3-une réglette ;
- 4-une balance précision 0.01g.

➤ L'essai consiste à :

- 1-Tarer le récipient M1 ;
- 2-Remplir le récipient posé au- dessous de l'axe de l'entonnoir avec la poudre de ciment ;
- 3- Faire l'opération sans vibration. Raser avec la réglette appuyée sur les bords de récipient ;
- 4-nettoyer l'extérieur du récipient ;
- 5-Peser de nouveau le récipient rempli, soit M2, sa masse

La masse volumique apparente est calculer par :

$$\rho_{app} = \frac{M2-M1}{V} \quad \text{(II.8)}$$

### **II.1.3. L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. L'eau de gâchage des mélanges de mortiers confectionnés est issue directement du robinet du réseau public d'eau potable. Ces propriétés chimiques n'ont pas fait l'objet de la présente étude. Donc, elle est supposée propre et ne contenir aucune impureté nuisible conformément à la norme NF.18-303.

## **II.3. Formulation et préparation des mortiers légers:**

### **II.3.1 Préparation des mortiers étudiés :**

Le malaxage de mortier a été réalisé à l'aide d'un malaxeur pour mortier muni d'un axe de rotation vertical. Celui-ci est effectué d'une façon identique pour tous les types de mortiers dans l'objectif d'obtenir une pâte homogène, nous avons suivi les étapes suivantes :

L'eau est introduire en premier dans la cuve du malaxeur ; ensuite on y verse le ciment ;

Aussitôt après mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30s de malaxage on introduit régulièrement et de manière rapide le sable et continuer La malaxage 1min30s pendant les première 15 secondes, enlever au moyen d'une raclette en métal tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en repoussant vers le milieu de celui-ci. On reprendra ensuite le

malaxage à grande vitesse pendant 60s. Le mortier ainsi préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4\*4\*16cm<sup>3</sup>, ceux –ci subiront par la suite des chocs (2\*60 coups) à l’aide d’une table à choc afin de dégager toutes les bulles d’air occlus lors de la mise en moule et d’homogénéiser la structure des éprouvettes préparées, après la fin de l’opération, on araser la partie du mortier en excès. Le démoulage pour mortier de caoutchouc se fait 48 heures après remplissage des moules. La conservation des éprouvettes s’effectuera dans l’ambiance du laboratoire à 20±2°C et HR=55±5%.



*Photo II.4 : malaxeur normalisé EN 196-1.*

**Tableau II.2 : Opération de malaxage des mortiers**

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable, faire le malaxage		Raclage de la cuve	Reprendre le malaxage	
Durée			30 s	30 s	15 s	1mn 15s	Durée

Etat du malaxeur	Arrêt	Vitesse lente	Arrêt	Vitesse rapide
------------------	-------	---------------	-------	----------------



*Photo II.6 :Granulats de Caoutchouc utilisés.*

*Tableau II.3 : Composition des mortiers préparés*

Mélange	Rapporte E/C	Ciment (g)	Eau (g)	Sable (g)	Granulats particules de caoutchoute (g)	Super-plastifiant (g)
<b>M1</b>	0.6	450	270	1350	0	0
<b>M2</b>	0.6	450	270	1150	50	1.5
<b>M3</b>	0.6	450	270	950	100	4.5
<b>M4</b>	0.6	450	270	750	150	6.75
<b>M5</b>	0.6	450	270	550	200	9

Si préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4\*4\*16cm<sup>3</sup>, ceux-ci subiront par la suite des chocs (2\*60coups) à l'aide d'une table à choc afin de dégager toutes les bulles d'air occlues lors de la mise en moule et d'homogénéiser la structure des éprouvettes préparés, après la fin de l'opération, on arase la partie du mortier en excès, le démoulage se fait 48 heures après

remplissage des moules. Après démoulage, les éprouvettes préparées ont été conservés dans l'air de laboratoire durant 28 jours.

## II.4. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :

### II.4.1. L'ouvrabilité :

Il s'agit de trouver une composition optimale permettant d'avoir une bonne cohésion entre les grains de la pâte de mortier, ainsi qu'une bonne mise en œuvre. La maniabilité du mortier est réalisée par l'essai l'étalement conformément à la norme **EN 459-2** :

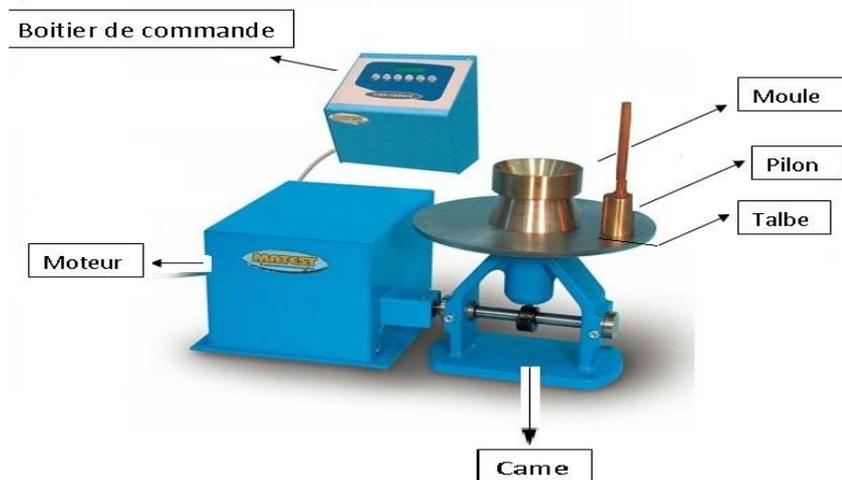


*Photo II.7 : Essai d'ouvrabilité*

#### II.4.2.1. Mode opératoire

Préparer le mortier conformément à la norme **EN 196-1**. Si la table d'écoulement n'a pas fonctionné pendant l'heure précédant l'essai, la faire fonctionner à vide plusieurs fois. Nettoyer et sécher avec beaucoup d'attention le plateau de la table. Placer le moule tronconique au centre de la table à chocs (centrage à l'aide du cercle gravé sur le plateau). Remplir le moule en 2 couches. Chaque couche doit être étalée en la compactant légèrement 10 fois à l'aide de la tige de compactage (pilon en bois). Araser puis lisser. Nettoyer la table d'écoulement et essuyer toute trace d'eau à proximité du moule. Programmer le tableau de commandes : tapes 1 fois sur la touche de sélection (des 0 apparaissent à l'écran) puis plusieurs fois pour atteindre la décimale des dizaines (celle-ci doit clignoter). Incrémenter pour rentrer le nombre 1 pour la dizaine.

Taper 1 fois sur la touche de sélection pour atteindre la décimale des unités (celle-ci doit clignoter). Incrémenter pour rentrer le nombre 5 pour l'unité. Taper 1 dernière fois sur la touche de sélection pour valider le nombre 15 seul le nombre 15 s'affiche à l'écran. Retirer le moule verticalement. Soumettre le mortier à 15 chocs à raison d'1 choc par seconde en appuyant sur la touche START. Evaluer la valeur de l'étalement dans 2 directions perpendiculaires, la moyenne de ces mesures donnée à 1mm près représente l'écoulement.



*Figure II.1 : table d'étalement.*

## **II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci.**

### **II.5.1. Propriétés physiques :**

### II.5.1.1 Masse volumique apparente :

Par définition, la masse volumique apparente sèche  $\rho_{app}$  est le rapport de la masse de l'échantillon  $M$  à son volume apparent sec  $V_t$ , L'état sec est obtenu par séchage de l'échantillon en étuve à 105°C jusqu'à masse constante, les pesées sont effectuées à 0.1g près et les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec précision de 0.1mm. la masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de chaque composition.

### II.5.1.2. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est l'un des paramètres thermo-physiques les plus importants pour la description des propriétés de transport de chaleur des matériaux. Cette propriété intrinsèque nous renseigne sur la qualité d'isolation d'un matériau de construction. Le dispositif, utilisé pour la mesure de la conductivité thermique des matériaux élaboré, est CT Mètre (Figure II.2). Cet appareil, aisément transportable, est initialement utilisé dans le but de permettre l'évaluation, avec précision, de la conductivité thermique des matériaux céramiques, tels que la brique, le mortier et le béton. Le CT Mètre est constitué de deux éléments :

- ✓ L'organe de commande : chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température, induite dans le matériau à tester ;
- ✓ La sonde : chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite. Les deux types de sondes proposés sont :
  - La sonde anneau : destinée à s'insérer entre deux morceaux plans de l'échantillon à section circulaire ;
  - La sonde fil (ou mono-tige) : destinée à s'insérer entre deux morceaux plans de l'échantillon à section rectangulaire. Après l'étalonnage du CT Mètre, à l'aide d'autres matériaux dont leur conductivité thermique est connue (le polystyrène par exemple), on règle le CT Mètre en lui intégrant un temps de mesure de 120 secondes, dans le logiciel d'exploitation. On place la sonde fil entre les deux morceaux plans de notre échantillon et on exécute la mesure tout en attendant la stabilisation de la température. La mesure provoque un échauffement du matériau et il faudrait donc respecter un temps de refroidissement entre deux mesures. Par ailleurs, le CT Mètre donne, sur l'écran

d'affichage, la valeur de la conductivité thermique  $\lambda$  (W/m.K), avec une précision fixée par le fabricant de ( $\pm 5\%$ ).



*Figure II.2 : Appareil de mesure de la conductivité thermique (CT Mètre)*

## II.5.2. Propriétés Mécaniques :

### II.5.2.1. Résistance à la flexion : norme EN196-[21]

L'essai consiste à estimer les résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortiers élaborés. Le dispositif de flexion (photo II.1) comporte deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique, un troisième appui de même diamètre, équidistant des deux premiers permet de transmettre la charge de rupture  $F$  (figure II.2). Afin d'avoir une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, les deux appuis doivent pouvoir légèrement tourner autour de leur centres, dans le plan vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. La résistance à la flexion est calculée selon la formule :

$$R_f = \frac{3F_f L}{2b^3} [\text{Pa}] \dots\dots\dots (\text{II.10})$$

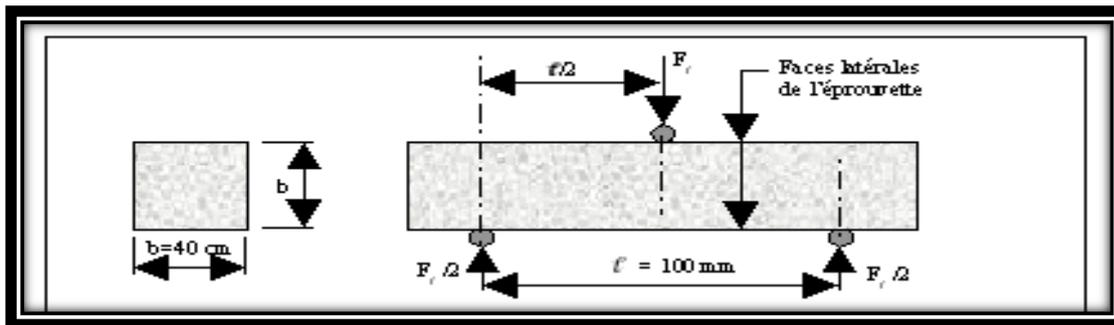
Avec :

$F$  : charge de rupture en (N) ;

B : largeur de l'éprouvette ;

L : distance entre les appuie en m ;

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (II.3) et dans la photo (II.9).



*Figure II.3 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion*



*Photo II.9 : Dispositif expérimental de l'essai de flexion*

### II.5.2.2. Résistance à la compression : norme EN196-[21]

Chaque demi-éprouvette issue de l'essai de rupture par flexion est soumise à l'essai de compression sur ces faces latérales de moulage. La section visée est de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ , l'échantillon est placé entre plaque de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur et de  $(40 \pm 0.1) \text{ mm}$  de largeur. Les plaques sont guidées sans forttement appréciable au cours de l'essai de manière à avoir la projection horizontale, une autre plaque placée sur la surface d'écrasement peut s'incliner légèrement pour permettre un contact parfait. La résistance à la compression est calculée selon. La formule :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots (\text{II.11})$$

Avec :

$F_c$  ; force de rupture ;  $S$  ; section latérale de l'éprouvette, égale à  $16 \text{ cm}^2$ .

L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150KN avec vitesse de 2400N/s (photo II.2). Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que schématisé sur la figure (II.5). Figure (II.5) : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

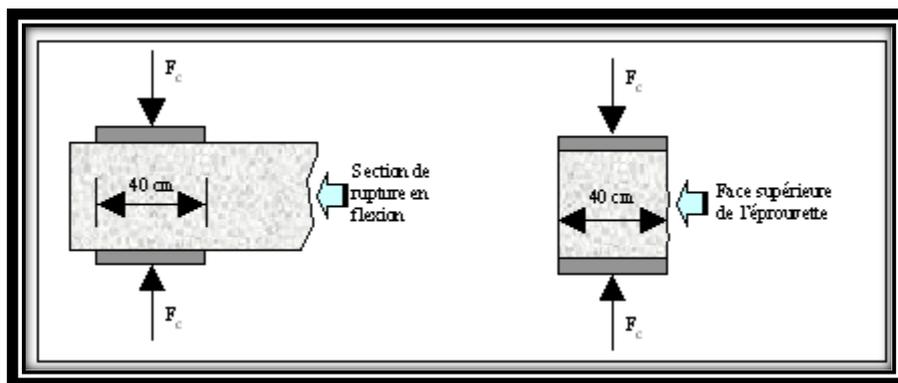


Figure II.5 : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

**II.5.2.3. Essai Ultrasonique :**

- Principe de l'essai :

Les ultrasoniques fonctionnent en transformant un signal électrique en une onde de déformation par un transducteur piézoélectrique. Cette onde se propage dans l'éprouvette de béton ou de mortier et est captée par le transducteur récepteur. On déduit ainsi le temps de propagation et la vitesse des ondes ultrasoniques.

● **Matériels utilisés :**

Pour la mesure des vitesses ultrasoniques, le matériel suivant est utilisé :

1-Unité d'affichage : l'unité d'affichage a les caractéristiques suivantes :

\*Mémoire non volatile d'une capacité 250 mesures.

\*Ecran LCD graphique de 128x128 points

\*Plage de mesure environ 15 à 6550  $\mu$ s \*Impulsion de tension 1 Kv

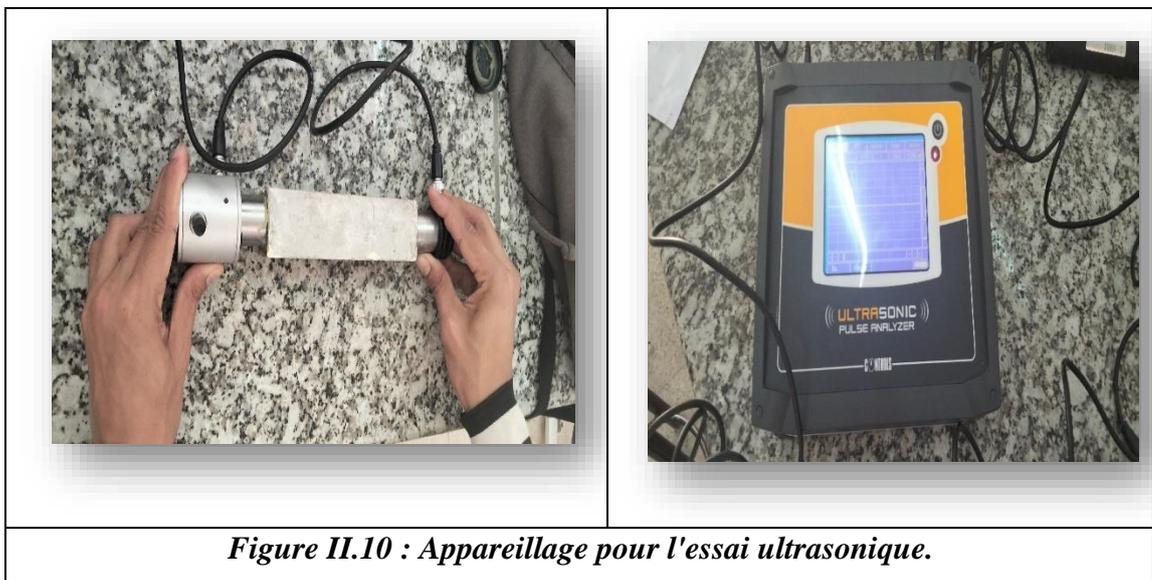
\*Plage de température -10° à +60°C

2- Deux (2) transducteurs de 54 kHz

3- Deux câbles BNC

4- Barre d'étalonnage

5- Boite d'agent couplant de 150ml (ou le Petroleumjelly ).



*Figure II.10 : Appareillage pour l'essai ultrasonique.*

➤ **Mode opératoire :**

✓ **Etalonnage de l'appareil :**

Avant de commencer l'essai un étalonnage de l'appareil est nécessaire pour la précision et la fiabilité des résultats. Pour cela on branche les transducteurs à l'unité d'affichage à l'aide des câbles BNC et on applique une mince couche de pâte de contact entre les surfaces de la barre

et des transducteurs, on règle la distance sur 0,2m, on applique l'onde ultrasonique et on assure que le temps donné est de 20,3  $\mu$ s. L'étalonnage est ainsi terminé.

✓ **Processus de mesure :**

- On mesure la distance entre les points de mesure (c'est la longueur de l'éprouvette).
- On applique une couche de l'agent couplant sur la surface de contact des transducteurs et des éprouvettes (couche mince pour le béton lisse, épaisse pour un béton rugueux).
- On appuie sur la touche START pour commencer la mesure.

✓ **Méthode de calcul :**

Du fait de l'hétérogénéité du matériau, l'interprétation des signaux ultrasoniques n'est cependant pas facile. Généralement, les tests sont souvent basés sur la mesure des vitesses de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales. La vitesse de l'onde traversant un solide élastique est donnée par l'expression suivante :

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Le module d'Young (dynamique) E peut être exprimé en fonction de V,  $\nu$  et  $\rho$  à l'aide de la formule suivante :

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \rho V^2$$

Avec :

**V** : vitesse d'onde mesurée en Km/s .

**E** : module d'élasticité dynamique en Gp.

**$\nu$**  : coefficient de poisson.

## Chapitre III : Résultats et discussions

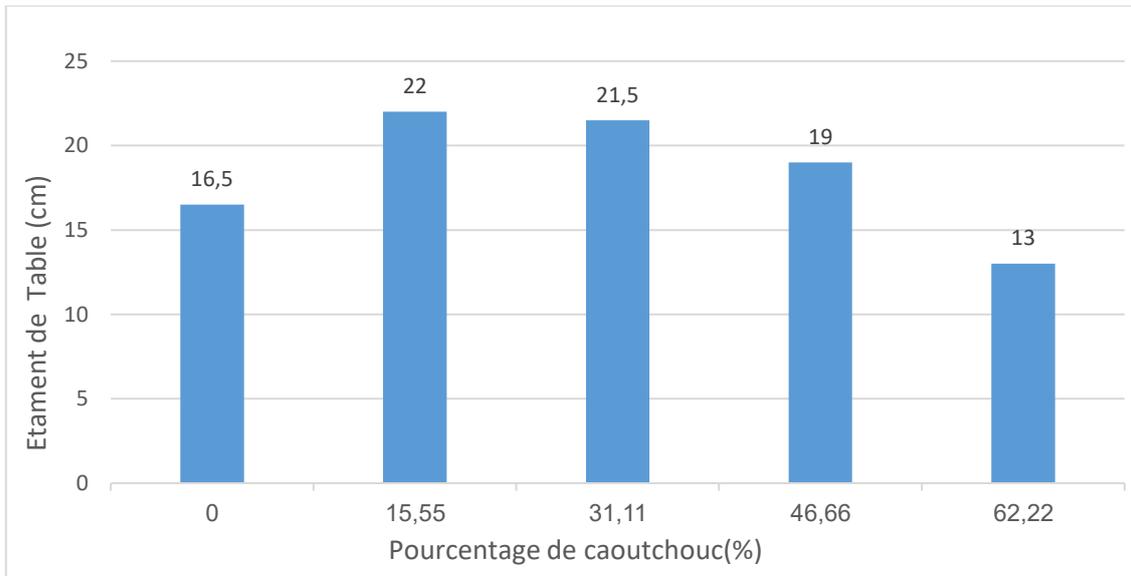
### III.1. Introduction :

L'objectif principal de cette étude, est l'évaluation expérimentale de l'effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc recyclés, sur le comportement de mortier léger de ciment. Dans ce chapitre, on donne au premier lieu, la consistance des mortiers légers étudiés en fonction du dosage en particules de caoutchouc incorporés dans la matrice cimentaire du mortier de ciment normale par substitution volumique. Par la suite, on montre quelques propriétés des mortiers de caoutchouc légers que ce soit à l'état frais au à l'état durci. A la fin, nous présentons les résultats de l'influence des granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique, la vitesse ultrasonique, la masse volumique apparente, la résistance en traction par flexion trois points, la résistance en compression.

### III.2. Etude des propriétés fraîches :

#### III.2.1. Etalement de table:

Le graphe III.1 montre l'effet des particules de caoutchouc réutilisé obtenus à partir de déchiquetage mécanique des pneus usés sur la consistance des mortiers légers incorporant un dosage élevé des particules de caoutchouc. La consistance où l'ouvrabilité a été déterminée par l'eau d'étalement de table. Le graphe III.1. Montre que l'inclusion des particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire a été diminuée fortement la consistance des mortiers étudiés. Ce comportement est à cause de la nature rigoureuse des particules de caoutchouc qui sont male adapter avec les matériaux cimentaires. De plus, la nature légère des particules de caoutchouc produit une incompatibilité physique entre le caoutchouc léger d'un côté, le ciment et le sable lourds d'une autre coté. La joute de super-plastifiant réduit largement le problème incompatibilité entre les matériaux polymère comme le caoutchouc et les matériaux minérales comme le ciment et le sable.



**Figure.III.1. Evolution de l'étalement de table avec le dosage en particules de caoutchouc.**

D'un autre côté, en ce qui concerne les particules de caoutchouc légers, en particulier, il est possible que la perte de maniabilité soit due à la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc recyclés. En comparaison avec les granulats siliceux de forme uniforme. Il est important de prendre en considération cette diminution significative de la consistance des composites en caoutchouc afin de préserver leur maniabilité acceptable, que ce soit en augmentant le dosage en eau ou en ajoutant un adjuvant de type super-plastifiant. Dans cette étude, nous avons remplacé la perte de consistance résulte de l'incorporation des particules de caoutchouc par l'augmentation du dosage en super-plastifiant pour assurer une consistance suffisante pour les différentes utilisations des mortiers légers préparés.

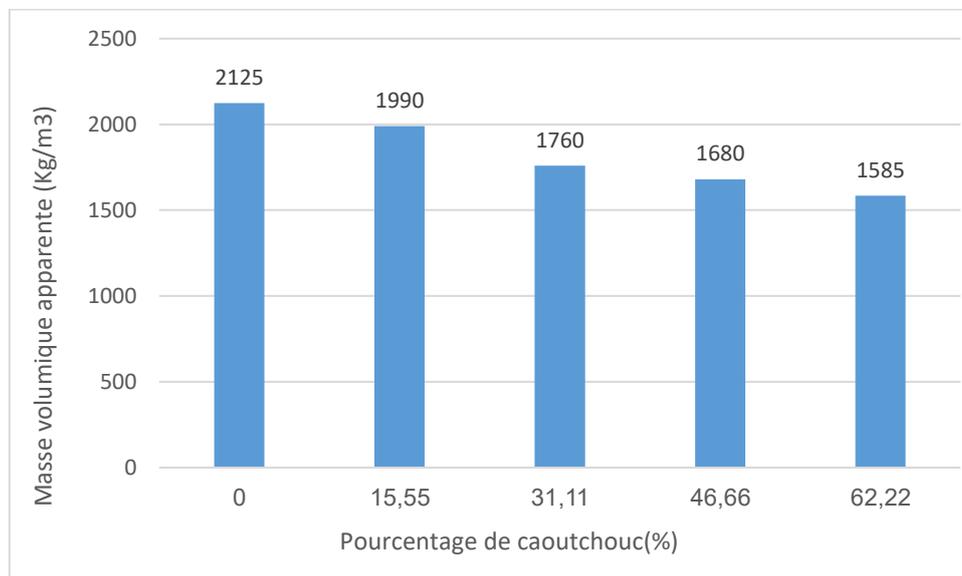
### **III.3. Etude des propriétés durcies:**

#### **III.3.1. Propriétés physiques :**

##### **III.3.1.1. La masse volumique apparente :**

Dans ce section on estimer l'influence des particules de caoutchouc sur la masse volumique apparente. Nous avons estimé la masse volumique apparente des mortiers de caoutchouc léger sur trois éprouvettes de dimensions :  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Nous avons estimé la masse volumique apparente à l'âge de 30 jours. Le graphe ci-dessous montre les résultats de la masse volumique

apparente en fonction du dosage en particules de caoutchouc réutilisés. Le graphe III.3 montre que la masse volumique apparente des mortiers de caoutchouc légers diminue avec l'augmentation du dosage des particules de caoutchouc réutilisé. Cette tendance est logique à cause que les particules de caoutchouc réutilisé sont légères de poids volumique ( $450 \text{ Kg/m}^3$ ). En effet, ces chutes de la masse volumique sont de l'ordre de (6.35%, 17.18%, 20.95%, et 25.4%) pour l'inclusion de caoutchouc de l'ordre de (50g, 100 g, 150 g, et 200 g). Ce comportement est innovant et permet d'alléger le poids des structures fabriquées par ce matériau léger.



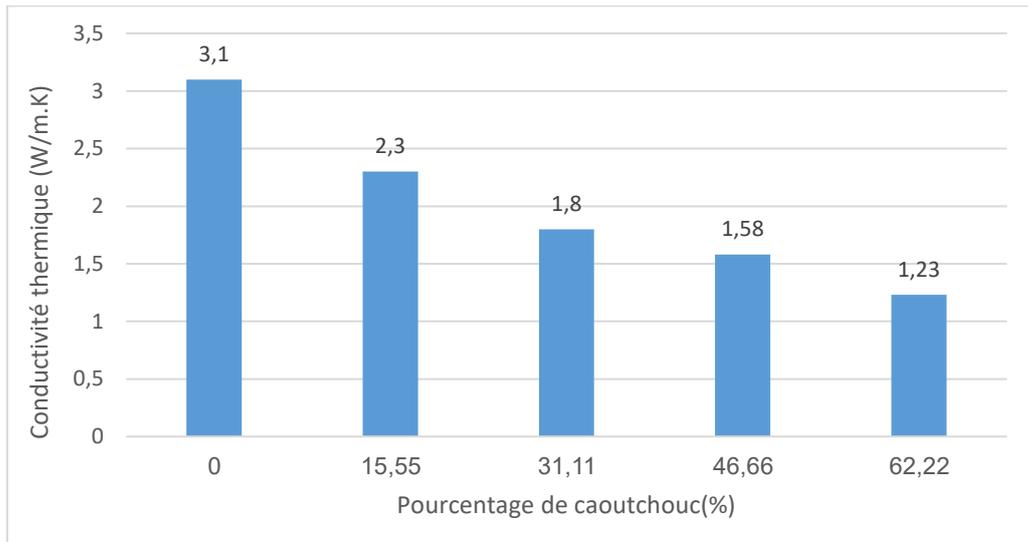
**Figure.III.3. L'influence du dosage en particules de caoutchouc sur la masse volumique des mortiers étudiés**

### III.3.1.2. La conductivité thermique :

La conductivité thermique d'un matériau de construction est une propriété innovante qui caractérise la propriété d'isolation des matériaux de construction. Elle est en relation la réduction de la consommation d'énergie et d'émission de gaz dans la nature. Plus le matériau a une conductivité basse plus le matériau est isolant.

D'après la Fig.III-4, on remarque que les conductivités thermiques des mortiers de caoutchouc incorporant les qualités suivantes (0, 50 g, 100 g, 150 g, 200 g ) diminuent de façon significative de l'ordre (26 %, 42 %,49 %, et 62%) respectivement par rapport au mortier de référence. Ce

comportement des PCR est expliqué par leur faible taux de transfert thermique et leur résistivité élevée par rapport aux granulats siliceux. Ceci est en corrélation avec les travaux de, qui a reporté une valeur de la conductivité des bétons de caoutchouc nettement inférieure en comparaison avec les bétons traditionnels. Cette propriété précieuse des PCR peut être investie pour améliorer l'isolation thermique des matériaux cimentaires afin de réduire le bilan énergétique des bâtiments.



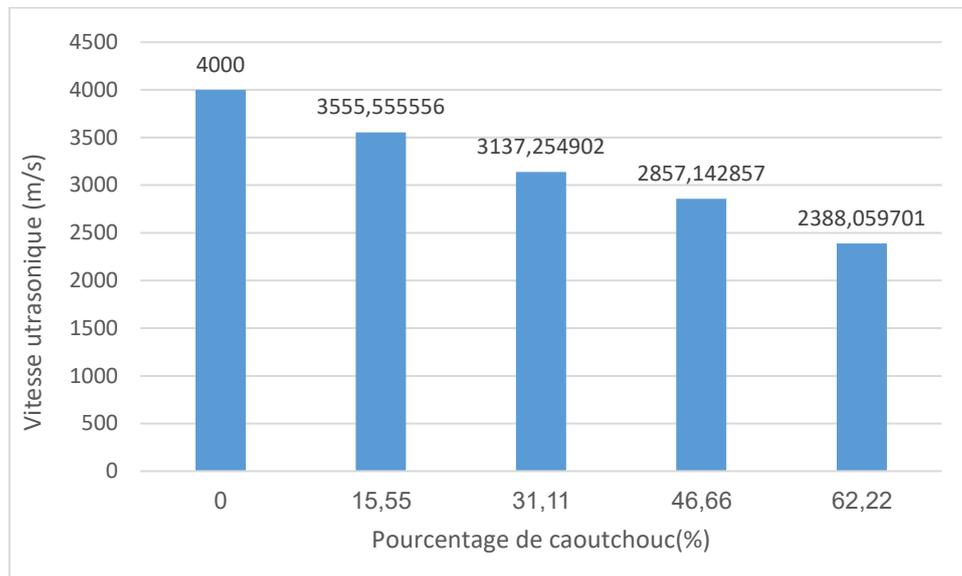
**Figure.III.4. L'influence du dosage en PCR sur la conductivité thermique**

#### III.3.1.2. La vitesse ultrasonique :

La Fig.III.5 montre l'évolution de la vitesse d'impulsion ultrasonique VMU de mortiers légers incorporant des particules de caoutchouc (0,50,100,150, et 200g). Celle-ci diminue de façon linéaire progressivement avec le dosage en caoutchouc. En effet, on enregistre une chute de l'ordre de (11% ; 21 % ; 28%, et 40) respectivement, par rapport au mortier témoin.

Cette tendance est expliquée par l'effet que les particules de caoutchouc réutilisés PCR absorbent les ondes ultrasoniques et se comportent comme des vides dans la structure des composites cimentaires. Cette potentialité élevée d'absorption des chocs mécaniques des PCR peut être investie dans les matériaux cimentaires pour l'amélioration de leur isolation acoustique et thermique. Par ailleurs, des nombreux travaux de recherches sur les mortiers ou les bétons de caoutchouc dans la littérature sont en corrélation avec nos résultats parmi lesquels [Benazzouk& al., 2007 ; Guelmine, 2017]. Ceci, nous amènera à conclure que la valorisation des PCR dans le domaine de la construction permet la satisfaction des besoins croissantes en

agrégats de construction, et elle contribuera à la protection de notre environnement face aux effets nocifs des déchets de pneus usagés.

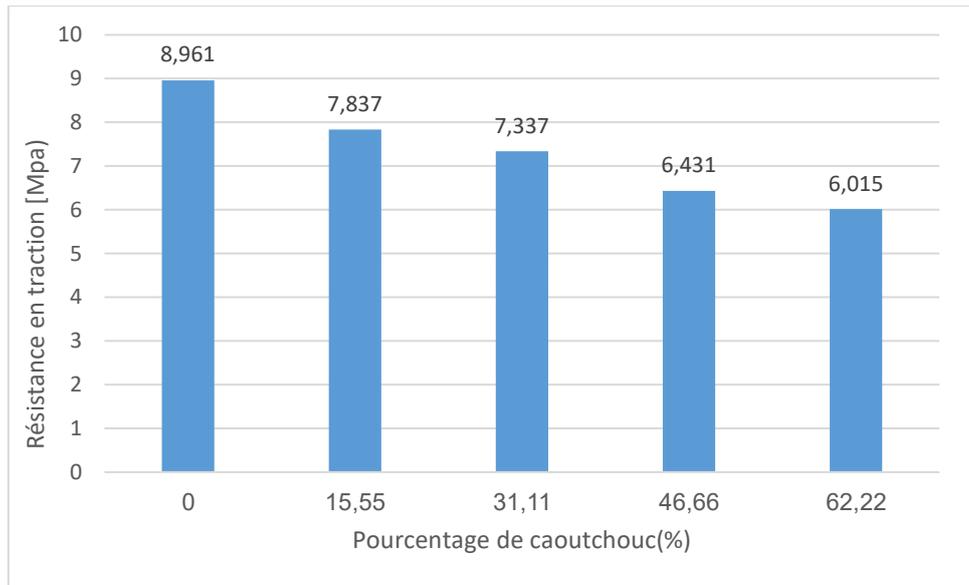


**Figure.III.5. L'effet de du dosage en PCR sur la vitesse ultrasonique des mortiers légers.**

### III.3.2. Propriétés mécaniques :

#### III.3.1.2. La résistance en traction par flexion :

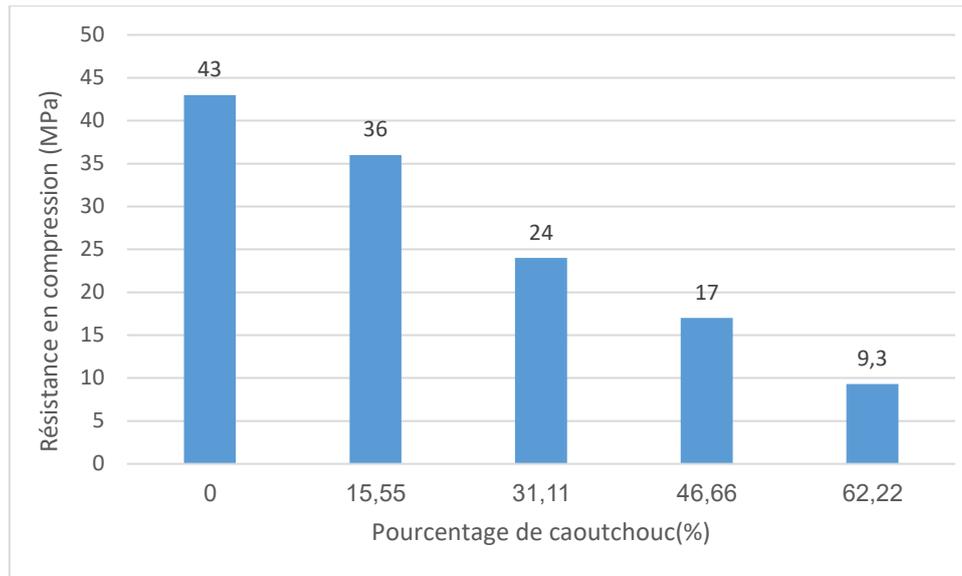
La fig.III.6 montre la variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés en fonction du dosage en PCR à l'âge de 28 jours. Elle diminue progressivement inversement proportionnelle au dosage en PCR est cela comme pour la résistance en compression. En effet, l'inclusion de (0, 50g, 100 g, 150g, et 200 g) de PCR dans le mortier produit une chute de l'ordre de (12%, 18 %, 28%, et 33 %) respectivement par rapport au mortier témoin. Ce comportement est dû à la mauvaise adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire qui résulte cette chute de la résistance des mortiers incorporant ce type des granulats.



**Figure.III.6. L'effet de dosage en PCR sur la résistance en traction par flexion**

### **III.3.1.2. La résistance en compression :**

La fig.III.7 illustre l'évolution de la résistance en compression de mortier de ciment en fonction du dosage en particules de caoutchouc recyclé PCR à l'âge de 28 jours. L'inclusion des PCR jusqu' à 200g produit une réduction de la résistance en compression de l'ordre de 78 % par rapport au mortier sans particules de caoutchouc. Cet effet négatif des PCR est dû à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire. De nombreux chercheurs croient que le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment est l'une des raisons de la chute de la résistance à la compression des matériaux cimentaires incorporant ce type des granulats [Guelmine, 2017; Turatsinze et al., 2005].



*Figure.III.7. L'effet de PCR sur la résistance en compression*

### **Conclusion :**

Nos résultats montrent les points suivants :

- L'incorporation de granulats de caoutchouc recyclés a entraîné une diminution de la consistance des mortiers, pouvant être compensée par l'utilisation de super-plastifiants. De plus, la masse volumique apparente a diminué avec l'augmentation du dosage en particules de caoutchouc, ce qui offre une solution innovante pour alléger le poids des structures construites avec ces matériaux légers.
- En ce qui concerne l'isolation thermique, les mortiers contenant des particules de caoutchouc ont montré des conductivités thermiques nettement réduites par rapport au mortier de référence, ce qui pourrait contribuer à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. De même, la vitesse d'impulsion ultrasonique a diminué de manière linéaire avec l'augmentation du dosage en caoutchouc, offrant ainsi des opportunités pour améliorer l'isolation acoustique et thermique des matériaux cimentaires.

- Cependant, l'incorporation de granulats de caoutchouc a entraîné une diminution de la résistance à la traction par flexion et à la compression, principalement en raison de la mauvaise adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire.

## **Conclusion Générale:**

En conclusion, cette étude a examiné l'effet de l'incorporation de granulats de caoutchouc recyclés sur les propriétés des mortiers légers de ciment. Les résultats démontrent que l'ajout de ces particules de caoutchouc influence considérablement plusieurs caractéristiques du mortier, notamment la consistance, la masse volumique apparente, la conductivité thermique, la vitesse ultrasonique, ainsi que les résistances à la traction par flexion et à la compression.

Premièrement, l'incorporation de granulats de caoutchouc recyclés diminue la consistance des mortiers, ce qui peut être compensé par l'utilisation de super-plastifiants pour maintenir une maniabilité adéquate. De plus, la masse volumique apparente diminue avec l'augmentation du dosage en particules de caoutchouc, offrant ainsi une solution innovante pour alléger le poids des structures construites à partir de ces matériaux légers.

En ce qui concerne les propriétés d'isolation thermique, les mortiers contenant des particules de caoutchouc présentent des conductivités thermiques nettement réduites par rapport au mortier de référence, ce qui peut contribuer à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

De même, la vitesse d'impulsion ultrasonique diminue linéairement avec l'augmentation du dosage en caoutchouc, offrant des possibilités d'amélioration de l'isolation acoustique et thermique des matériaux cimentaires.

Cependant, l'incorporation de granulats de caoutchouc entraîne une diminution de la résistance à la traction par flexion et à la compression, principalement en raison de la mauvaise adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire.

En somme, bien que l'ajout de granulats de caoutchouc recyclés présente des avantages en termes de réduction du poids des structures, d'amélioration de l'isolation thermique et acoustique, il est essentiel de prendre en compte ses implications sur les propriétés mécaniques du mortier. Ce type de matériau offre ainsi une perspective prometteuse pour répondre aux besoins croissants en agrégats de construction tout en contribuant à la réduction des déchets de pneus usagés et à la préservation de l'environnement.

**Références Bibliographiques :**

- [1] Trouzine H, A.Asrom, N. Asrom, F.Belabdelouhab, N.T.Long: Problématique des Pneumatiques usagés en Algérie, Revue nature et technologie, Vol.5, pp. 28-35, 2011.
- [2] 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, P52, Avril 2008.
- [3] Scrap Tire Recycling in Canada : From Scrap to Value/Recyclage des pneus hors d'usage au Canada: La transformation des pneus hors d'usage en produits à valeurs ajoutée. [www.catraoline.ca/pdf/Recyc\\_2006\\_pneus.pdf](http://www.catraoline.ca/pdf/Recyc_2006_pneus.pdf).
- [4] Gelmine, L., Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures, thèse de doctorat en sciences, stub d'Alger, 2017, pp.159.
- [5] ETRMA – European Tyre & Rubber Manufacturers' Association (Belgium), 2010b. Used Tyres Recovery 2010 (table) – UT/Part Worn Tyres/ELT's Europe – Volumes
- [6] Nguyen Thanh L., Thèse de doctorat : Le Pneusol : Recherches Réalisations – Perspectives. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 1993.
- [7] M.N. Adam, Propriétés des bétons, Ed Eyrolles, pp. 754 (1998), Paris.
- [8] G. Dreux, J. Festa, Nouveau guide de béton et de ses constituants, Ed Eyrolles, pp.317 (1998), Paris.
- [9] Guelmine, L., L'influence du rapport E/C et du mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques et de transfert d'humidité des mortiers de ciment durcis, Mémoire de Magister, Université de Laghouat 2006, pp.86.
- [10] J. Baron, J.P. Ollivier, Les Bétons bases et données pour leur formulation, Ed Eyrolles, pp. 345 (1998), Paris
- [11] H.H. Steneinour, The system CaO-SiO<sub>2</sub> –H<sub>2</sub>O and the hydration of the calcium silicates, Chemical Reviews, pp. 40 (1947).
- [12] T.C. Powers, The physical structure and engineering properties of concrete, Portland.Cement.

Association. Research. Department. Building. pp. 39 (1958).

[13] COURS de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada).

Site Internet : [www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/84](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/84)

[14] R.A. Olson, H.M. Jennings, Estimation of C-S-H in a blended cement paste using water adsorption, *Cement and Concrete Research*, vol.31, pp.351-356 (Décember 2000).

[15] Provine, A., Divet, L.A., Fenouillet, S., Randazzo, V & Davy, J.P., Impact de conditions de cycle de séchage et d'humidification sur la formulation différée d'étringite dans les bétons, *Materials & Structures Journal*, Vol.36,2012,pp.189-196.

[16] Güneysi E., Gesoğlu M and Özturan T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 34, 2309–2317, 2004.

[17] : Khatib Z. K. and Bayomy F. M., Rubberized portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 206-213.

[18] Garros M., Thèse de doctorat : Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.

[19] Benazzouk A., Douzane O. and Quéneudec. t'Kint M., Transport of fluids in cement–rubber composites. *Cement & Concrete Composites* 26, 21–29, 2004.

[20] Guelmine L, Hadjab H, Benazzouk A , Effet des granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur les propriétés physiques et mécaniques de mortier de ciment, *Papier de Conférence International SIGC2018*, d'Oran Novembre 2018, 10 pages Algérie. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35857.48484>

[21] Guelmine, L., Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar, *Constr. Build. Mater.* 26 (9) (2016) 77–85.

[22] Guelmine layachi, Hadda Hadjab , Effect of Recycled Rubber Particles on the Deicing Salt-Scaling Durability of Concrete, *Recent Progress in Materials*, 2021; 3 (3), <https://doi:10.21926/rpm.2103033>

[23] Guelmine, L. (2022). The freeze-thaw durability of concrete containing the rubber aggregate of tire waste. *Research on Engineering Structures & Materials*, 8(2): 253-264. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2022.371ma1207>.

[24] Layachi Guelmine, Deboucha Sadek , Hadda Hadjab , Amar Benazzouk. Effect of recycled rubber powder on the compatibility of rubber-cement paste. *Annales de Chimie - Science des Matériaux* 2022, 46, ( 3) : 135-139. <http://doi.org/10.18280/acsm.460304>.