

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Khelaifa Ammar

Arfa El-fadhle

Rebiat Charaf

Belkacem Mohamed Redha

En vue de l'obtention du diplôme de **Master en Génie Civil** :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

THÈME

**Etude de l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc
recyclés de pneus usagés sur le comportement
de mortier de ciment.**

Encadreur : Dr. Mohamed Zohair kaab

Université EL OUED

Co-encadreur : Mr. Hamad khelaifa.

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

*Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant et le miséricordieux .
Nous tenons à remercions vivement notre promoteur **Dr. Mohamed Zohaïr kaab**
et **Mr. Hamad Khelaifa** pour l'aide précieuse qu'il nous a offert dans l'élaboration
de ce travail. Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté d'être
les rapporteurs de notre mémoire.*

*Nous tenons à remercier sincèrement tout ce qui, de près ou de loin ont participé
à la rédaction de ce document il s'agit plus particulièrement:*

*Responsables de laboratoire des travaux publics et bâtiment « Nizolab » et à
tous les membres de laboratoire qui ont participé indirectement ou directement
à ce flux de recherche et à son objectif .*

Enfin, on n'oserait oublier de remercierons chers parents et nos amies.

Dédicaces

À mes chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

*À mes chers frères, Yacine et Salah et la petite Rinade
une source de joie et de bonheur*

À ma fiancée, la source d'inspiration

Pour toute ma famille, une source d'espoir et de motivation

À tous mes amis, en particulier Al-Fadhīl .

À vous, cher lecteur

Signé : Charaf Rebiat



Dédicaces

*Je tiens à dédier ce modeste travail à vous mes chers parents
lumières de mes yeux, quoi que je fasse ou que je dise, je ne
saurai point vous remercier comme il se doit, vous étiez
toujours à mes cotés soutenir et m'encourager*

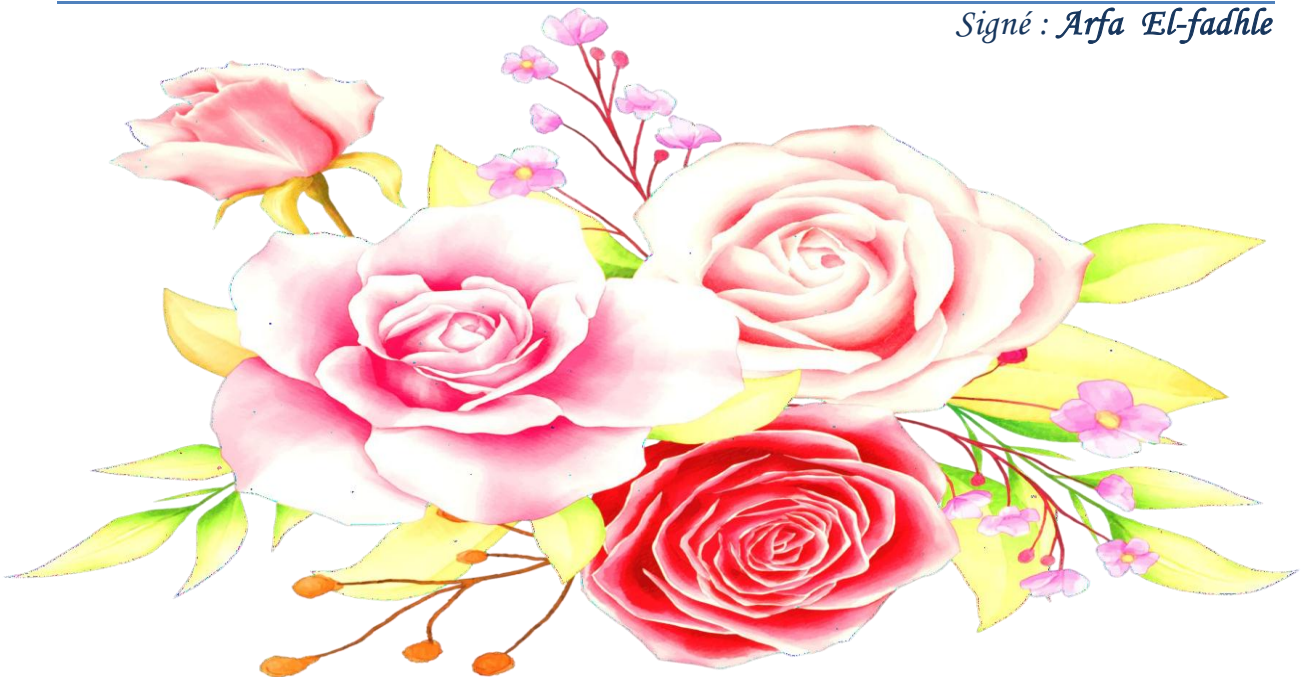
*Mes chères sœurs, Chères nièces de ma sœur, Mes tantes sont
la source de la révélation*

*Aux professeurs qui nous ont enseigné
à différentes étapes.*

À tous mes amis et collègues

À vous, cher lecteur

Signé : Arfa El-fadhle



Dédicaces

*Je tiens à dédier ce modeste travail
à vous mes chers fils et ma femme .*

*Mes chères frères et sœurs .
Aux professeurs qui nous ont enseigné
à différentes étapes.
À tous mes amis et collègues*

À vous, cher lecteur

Signé : Kkelaifa Ammar



RESUME

Les matériaux cimentaires sont handicapés par leur faible résistance à la traction et par leur fragilité, qui les rendent particulièrement sensibles à la fissuration notamment la fissuration de retrait. Si la fragilité est souvent palliée par le renforcement par des armatures, leur mise en place est difficile voire impossible dans certains cas. Le renforcement par des fibres est une solution alternative qui reste perfectible dans ce sens où celle-ci n'empêche pas la fissuration mais en limite l'ouverture.

La solution idéale est un matériau cimentaire capable de supporter des déformations importantes avant localisation de la fissure. Pour cet objectif, nous avons opté pour l'incorporation de granulats déformables en substitution au sable et nous avons décidé d'utiliser des granulats de caoutchouc issus du broyage de pneus usagés. Ces granulats ont été introduits en substitution volumique partielle des granulats naturels.

En contrepartie des chutes de résistances en compression et en traction, la capacité de déformation avant localisation de la macro fissuration est nettement plus élevée en présence de granulats caoutchouc.

Les résultats ont démontré que le composite obtenu a une plus grande résistance à la fissuration.

Ainsi, lorsque la résistance à la fissuration est une priorité, l'incorporation de granulats caoutchouc dans les matériaux cimentaires est une réponse pour des applications plus durables et constitue une nouvelle voie de valorisation des pneumatiques usagés non réutilisables.

Mots clés : Déchets de caoutchouc, composite cimentaire, Mortier, propriétés physico-mécaniques, Matériaux cimentaires, Granulats en caoutchouc, Capacité de déformation, Recyclage.

ABSTRACT

The cementing materials are handicapped by their low tensile strength and their brittleness, which make them particularly sensitive to cracking in particular the cracking of withdrawal. If brittleness is often mitigated by the reinforcement by reinforcements, their installation is difficult even impossible in certain cases. The reinforcement by fibers is an alternative solution which remains perfectible in this direction where this one does not prevent cracking but in limit the opening.

The ideal solution is a cementing material able to support important deformations before localization of the fissure. This objective, we chose the incorporation of deformable aggregates in substitution of the sand and we decided to use rubber aggregates resulting from the crushing of worn tires. These aggregates were introduced in voluminal substitution partial of the natural aggregates.

In the other hand falls of resistances in compression and traction, the capacity of deformation before localization of the macro cracking is definitely higher in the presence of aggregates rubber.

The results showed that the composite obtained with a greater resistance to the cracking of withdrawal.

Thus, when resistance to cracking is a priority, the incorporation of aggregates rubber in cementing materials is an answer for more durable applications and constitutes a new way of valorization of the no reusable worn tires.

Keywords: Scrap rubber, cementing composite, Mortar, properties physic mechanical, cementing Materials, rubber Aggregates, Capacity of deformation, Recycling.

ملخص

المواد الإسمنتية معطلة بسبب قوتها للشد منخفضة وهشاشتها ، مما يجعلها حساسة بشكل خاص للتشقق ، ولا سيما الانكماش. إذا تم التغلب على الهشاشة غالباً عن طريق التعزيزات ، يكون تركيبها صعباً أو مستحيلاً في بعض الحالات. يعد التعزيز بالألياف حلاً بديلاً لا يزال من الممكن تحسينه بمعنى أنه لا يمنع التشقق ولكنه يحد من فتحه .

الحل المثالي هو اقتراح مادة اسمنتية قادرة على تحمل التشوهات الكبيرة قبل تحديد موقع التشقق. لهذا الغرض ، اخترنا دمج الركام القابل للتشوه كبديل للرمال وقررنا استخدام ركام المطاط من تمزيق الإطارات المستعملة كبديل جزئي للحجم للركام الطبيعي .

في مقابل الانخفاضات في مقاومة الانضغاط والشد ، تكون قدرة التشوه قبل توطين التشققات أعلى بشكل ملحوظ في وجود مجاميع المطاط .

أظهرت النتائج أن المركب الناتج لديه مقاومة أكبر للتشقق .

وبالتالي ، عندما تكون مقاومة التشقق أولوية ، فإن دمج ركام المطاط في المواد الإسمنتية يمثل استجابة لتطبيقات أكثر متانة ويشكل طريقة جديدة لتتمين الإطارات المستعملة الغير القابلة لإعادة الاستخدام.

كلمات البحث : حبيبات المطاط ، الملاط ، الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية ، المواد الاسمنتية ، متانة.

Liste des Figures

Liste des Figures

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Figure I.1. Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement	14
Figure I.2. L'influence des GCR sur la masse volumique du béton	14
Figure I.3. Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres	15
Figure I.4. Les risques de feu dans les décharges des pneus usagés.....	17
Figure I.5. La progression des activités de valorisation des pneus usagés en Europe	17
Figure I.6. La production mondiale de caoutchouc naturel en 2014	19
Figure I.7. Processus de recyclage de déchets de caoutchouc	19
Figure I.8. Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recyclés	20
Figure I.9. La technique de Pneu sol : le chantier Cannes-Mandelieu en 1988	21
Figure I.10. Pose des nappes de pneus Projet pilote-Route de Bousmail	22
Figure I.11. Ouvrage végétalisé Projet de Bousmail	22
Figure I.12. Stabilité d'un glissement de terrain-Cas de Tizi Ghenif-Willaya de Tizi Ouzou Algérie	23
Figure I.13. Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie)-Stabilité d'un talus	23
Figure I.14. Superposition et attache des pneus	23
Figure I.15. Bétonnage de la 1 ^{ère} file de pneus	23
Figure I.16. L'influence des GCR sur la masse volumique du béton	25
Figure I.17. l'influence des GCR sur le retrait des mortiers de ciment	26
Figure I.18. Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissementx100)	27
Figure I.19. Effet des particules de caoutchouc sur l'évolution de la porosité des GCR, pâte de ciment et de béton de caoutchouc	28
Figure I.20. Effet des GCR sur le taux l'absorption d'eau des pâtes de ciment incorporé les granulats de caoutchouc d'après	29

Chapitre II : Matériaux utilisés et procédures expérimentales

Figure II.1. Sable Djamaa (0-4mm)	32
Figure II.2. Courbes granulométriques des sables et des granulats de caoutchouc.....	36
Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.	37
Figure II.4. Ciment utilisé.....	39
Figure II.5. Granulats de caoutchouc (0-4mm).....	41
Figure II.6. Pesage des composants du mortier.....	43
Figure II.7. Moule (4 x 4 x 16) cm.	44
Figure II.8. Lubrification des moules	44
Figure II.9. Remplissage à moitié et vibration	45
Figure II.10. Remplissage total et vibration	45
Figure II.11. Dernière vibration et rasage	46
Figure II.12. Dispositif de mesure d'affaissement au cône d'Abrams.....	46

Figure II.13 a,b. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams avant le démoulage.	47
Figure II.14. Mise en place de la première couche	48
Figure II.15. Mise en place de la deuxième couche	48
Figure II.16. Rasage et pesage	49
Figure II.17. Mise à l'étuve des éprouvettes à une température de 105°.....	50
Figure II.18. Dispositif de l'essai d'absorption d'eau par capillarité	51
Figure II.19. Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³	52
Figure II.20. Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³	52
Figure II.21. Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm ³	53

Chapitre III : Analyse et discussion des résultats

Figure III. 1. Maniabilité des mortiers étudiées.	56
Figure III.2. Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à l'état frais de Mortier.....	56
Figure III. 3. Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à sec de Mortier	57
Figure III. 4. Absorption d'eau par immersion totale des Mortiers.....	58
Figure III.5. Valeurs de l'absorption d'eau par capillaire en fonction du temps de Mortier.....	59
Figure III. 6. Relation entre le taux de granulats de caoutchouc et la résistance à la compression à 28 jours.....	60
Figure III. 7 Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la résistance à à traction par flexion à 28 jours.	61
Figure III. 8. Vitesse de propagation d'ultrasons des mortiers.....	62

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I.1. Composition chimique de pneu	16
Tableau I. 2. Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde	18

Chapitre II : Matériaux utilisés et procédures expérimentales

Tableau II.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable.	35
Tableau II. 2. Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers	38
Tableau II.3. regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur le sable utilisé	39
Tableau II.4. Résistance à la compression (NA 234)	39
Tableau II.5. Analyses chimiques (NA 5042)	40
Tableau II.6. Composition minéralogique du ciment (CLINKER).	40
Tableau II.7. Caractéristiques physiques du ciment MATINE	40
Tableau II.8. Propriétés physiques des granulats de caoutchouc utilisés	41
Tableau II.9. Composition des mortier utilisés (Kg/m^3)	42
Tableau II.10. Classes de consistance du mortier.	47

Chapitre III : Analyse et discussion des résultats

Tableau III.1. Maniabilité des mortier étudiées..	55
Tableau III. 2 Le rapport $\text{RC}_{28}/\text{Rt}_{28}$	61

Table des matières

RESUME	6
ABSTRACT	7
ملخص	8
INTRODUCTION GENERALE	5
CONTEXTE DU PROJET D'ETUDE.....	5
BUT DU PROJET D'ETUDE	1
I.1. Introduction	4
I.2. Les mortiers	4
I.2.1. GENERALITES SUR LES MORTIERS.....	4
I.2.2. TYPOLOGIE DES MORTIERS	5
I.2.3. TERRE, LE PREMIER DES MORTIERS	5
I.2.4. MORTIER DE CHAUX	6
I.2.5. MORTIERS HYDRAULIQUES ET CEMENTS	8
I.2.6. MORTIER DE CIMENT	9
I.2.6.1. DEFINITION	9
I.2.6.2. COMPOSITION DU MORTIER DE CIMENT	10
I.2.6.3. LE LIANT	10
I.2.6.4. GRANULATS	11
I.2.6.5. L'EAU DE GACHAGE.....	11
I.2.6.6. LES ADJUVANTS OU ADDITIFS	12
I.2.6.7. LES UTILISATIONS DES MORTIERS DE CIMENT	12
I.2.7. LES MORTIER DE GRANULATS DE CAOUTCHOUCS	13
I.2.7.1. GENERALITES SUR LES CAOUTCHOUCS	13
I.2.7.2. LES CARACTERISTIQUES D'UN MORTIER DE CIMENT AVEC CAOUTCHOUC	13
I.2.7.3. LES MORTIERS CAOUTCHOUC PLASTIQUES	13
I.2.7.3.1. LES MORTIERS PLASTIQUES	13
A) L'OUVRABILITE	13
B) LA MASSE VOLUMIQUE FRAICHE	14
I.2.7.3.2.MORTIER DURCI.....	14
A) MASSE VOLUMIQUE.....	14
B) RESISTANCE EN COMPRESSION	15
I.3. Les pneumatiques usagés.....	15
I.3.1. LES PNEUS USAGES REUTILISABLES (PUR) :.....	16
I.3.2. LES PNEUS NON REUTILISABLES (PUNR) :.....	16
I.3.3. VALORISATION DES PNEUMATIQUES USAGES.....	17

I.3.4. DUREE DE VIE DU CAOUTCHOUC	18
I.3.5. CHIFFRE	18
I.3.6. RECYCLAGE DE CAOUTCHOUC.....	19
I.4. GRANULATS DE CONSTRUCTION	20
I.5. PNEUS ENTIER.....	21
I.6. LA VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC EN ALGERIE	22
I.7. BETON DE DECHETS DE CAOUTCHOUC.....	24
I.7.1. DEFINITION	24
I.7.2. SYNTHESES SUR LES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES BETONS DE CAOUTCHOUC	24
I.7.2.1. PROPRIETES FRAICHES.....	24
A) L'OUVRABILITE.....	24
B) LA MASSE VOLUMIQUE FRAICHE	25
C) RETRAIT.....	25
I.7.2.2. PROPRIETES A L'ETAT DURCI	26
A) RESISTANCE EN COMPRESSION.....	26
I.7.2.3. PROPRIETES HYDRIQUES	27
A) POROSITE	27
B) CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU	28
I.8. Conclusion	30
II.1. INTRODUCTION.....	32
II.2. MATERIAUX UTILISES.....	32
II.2.1. SABLE	32
II. 2.1.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	33
II. 2.1.1.1. LES MASSES VOLUMIQUES	33
A) LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE.....	33
B) LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE.....	33
II. 2.1.1.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE	35
II. 2.1.1.3 MODULE DE FINESSE	36
II.2.1.1.5 COMPACITE ET POROSITE	38
II.1.1.2.5. INDICE DES VIDES	38
II.2.1. CIMENT.....	39
II-2-2. GRANULATS DE CAOUTCHOUC.....	41
II.2.3 EAU DE GACHAGE.....	42
II.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE	43
II.4.1 FABRICATION DU MORTIER	43
II.4.2 LES ESSAIS REALISES	46
III.1. INTRODUCTION.....	55
III.2. MORTIER A L'ETAT FRAIS	55
III.2.1 LA MANIABILITE	55
III.2.2 LA MASSE VOLUMIQUE	56
III.3. MORTIER A L'ETAT SEC	57
III.3.1 LA MASSE VOLUMIQUE	57
III.3.3 L'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE	59
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	67

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Contexte du projet d'étude

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous-produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose de plus en plus à l'homme. Dans l'entier du monde, s'agissant de l'industrie automobile, l'utilisation des pneus en caoutchouc augmente chaque année.

Par ailleurs Peu coûteux et faciles à mettre en œuvre, les matériaux cimentaires dominent le marché des matériaux de construction. Néanmoins, leur faible résistance en traction conjuguée avec leur faible capacité de déformation les rend très fragiles et sensibles à la fissuration. Le cas de la fissuration due aux déformations imposées est un exemple limitant la durabilité des applications. Des essais mécaniques ont confirmé que l'incorporation de granulats à faible module de déformation, en l'occurrence des granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés est préjudiciable de la résistance en compression et en traction des matériaux cimentaires. En contrepartie, en traction, le composite obtenu a une plus grande capacité de déformation.

Ce composite cimentaire contient des particules, morceaux ou granulats en caoutchouc issus du broyage des pneus usagés. Les granulats en caoutchouc sont utilisés en remplacement partiel des granulats naturels. La présence des granulats en caoutchouc induit une relaxation des contraintes, confère au composite une capacité d'absorber l'énergie accompagnant la fissuration et une plus grande capacité de déformation du béton, réduisant ainsi fortement le risque de fissuration des dalles. En contrepartie, il a été observé une baisse des performances mécaniques comme les résistances en compression, en traction, etc. du matériau cimentaire.

Ce matériau est particulièrement intéressant pour les grandes surfaces tel que les dallages et chaussées en béton dans les travaux publics car il permet de limiter le nombre de joints de dilatation, de simplifier la mise en œuvre, tout en augmentant la durabilité de l'ouvrage. Nous nous proposons donc d'en évaluer l'intérêt technique en complétant leurs compositions et caractéristiques. Cependant, en l'état actuel des travaux, l'optimisation de la formulation ainsi que le tableau des caractéristiques des composites cimentaires incorporant des granulats en caoutchouc sont incomplets. En particulier leur résistance à la fissuration aujourd'hui

qualifiée reste à quantifier.

But du projet d'étude

Le but de ce travail est une contribution à l'étude de ce matériau innovant, cette étude est d'ordre expérimental. Elle consiste à évaluer les performances physiques et mécaniques de ce matériau. Pour cela nous allons varier des proportions de caoutchouc en mélange avec du sable (10%,20%, 30%), les grains de caoutchouc varieront de 0 à 4mm.Nous caractériserons l'influence des granulats en caoutchouc sur les propriétés et les caractéristiques d'un mortier cimentaire afin de comparer les résultats obtenus à ceux d'un mortier classique. Afin de rendre le mortier de caoutchouc plus écologique et d'améliorer ses performances,

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant d'une part des généralités sur les mortiers classiques (définition, composition, composants, caractéristiques et utilisation) puis d'autre part, nous parlerons des mortiers à base de granulats de caoutchouc (le recyclage des pneus usagés de caoutchouc, définition, composition, composant, caractéristiques et utilisation des propriétés des mortiers Incorporant des Granulats en caoutchouc).

Dans le deuxième chapitre nous exposerons les composants de notre éco-mortier avec leurs caractéristiques : Sable, ciment, eau, granulats de caoutchouc ainsi que les procédures expérimentales adoptées.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation des formulations de cet éco-mortier et aux analyses des tests réalisés sur ce matériau.

A l'issue de ce travail nous exposerons une conclusion générale et montrerons les voies et perspectives pour la suite éventuelle de ce travail.

Synthèse Bibliographique

Chapitre I

I.1. Introduction

Le présent chapitre est une synthèse bibliographique des travaux de recherches réalisés sur le comportement du mortier. Il sera divisé en trois parties. La première portera sur la description de la problématique des déchets, issus de pneus usagés et leur valorisation dans le domaine des matériaux de construction à matrice cimentaire. Alors que la deuxième partie nous renseigne sur les constituants du mortier, la troisième partie est consacrée à l'influence des granulats de caoutchouc recyclés 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 de caoutchouc sur le comportement des mortiers.

I.2. Les mortiers

I.2.1. Généralités sur les mortiers

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un enduit.

On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc.

Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau (et éventuellement un adjuvant) pour obtenir un <<mortier>>, qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

Les mortiers bâtards sont constitués par des mélanges de ciment et de chaux avec du sable, dans les proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.

Les mortiers peuvent être :

- Préparés sur le chantier en dosant et mélangeant les différents constituants, adjuvants compris,
- Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré-dosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire)

➤ Livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi, dont les derniers nés, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24h.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès : rénovation, travaux souterrains. Le marché du bricolage a profité du développement des mortiers pré mélangés.

On peut aujourd'hui trouver dans les surfaces de bricolages des mortiers répondant à tous les besoins non seulement par la nature du produit, mais aussi par son conditionnement plus adapté : sacs de 5 à 20 Kg.

Dans une première partie nous parlerons des mortiers classiques qui existent puis nous nous intéresserons principalement aux mortiers dont le liant est le ciment puis dans une seconde partie nous parlerons d'un type de mortier artificiel ou expérimental en occurrence le mortier à base de granulats de caoutchouc.

I.2.2. Typologie des mortiers

Il existe plusieurs types de mortiers :

- Mortier de terre ;
- Mortier de chaux grasse ;
- Mortier de chaux hydraulique ;
- Mortier de plâtre ;
- Mortier de ciment Portland.

Le mélange d'un liant et d'eau sans agrégat s'appelle la barbotine ou eau de chaux.

Le mortier de ciment et de chaux hydraulique (10 à 15 %) s'appelle un mortier bâtard.

Si on ajoute du gravier à un mortier, on obtient du béton.

I.2.3. Terre, le premier des mortiers

Le premier de tous les mortiers a été la terre, ou la terre argileuse, matériau gratuit, disponible à même le sol ne nécessitant pas de processus chimiques de transformation complexes. Viennent ensuite les matériaux produits par transformation thermique de la pierre (Plâtre, chaux et ciments) dont l'invention est très ancienne, mais l'usage discontinu dans le temps. La Rome antique préconisera de chaux grasses (aériennes) dans la confection des mortiers, en remplacement de la terre, ce qui donnera lieux à des mortiers de constitution variable. Dans les pays industrialisés, ce n'est toutefois qu'à partir de la révolution industrielle

et plus particulièrement la fin du XIX^e siècle que les chaux hydrauliques et les ciments s'imposeront sur tout autre moyen.

Début XIX^e siècle on regroupait donc sous le nom de mortier toute espèce de mélange de terres crues ou cuites ou d'autres matières obtenues par calcination ou de chaux avec ou sans sable et de l'eau en suffisante quantité pour pouvoir le gâcher le porter et le mettre en œuvre convenablement à sa destination. Dans les campagnes où les fours à chaux étaient éloignés et la chaux rare et chère on se contentait souvent pour faire du mortier de terre crue mais franche et un peu grasse en la délayant avec de l'eau et il s'en trouvait qui avait beaucoup de ténacité. Quelquefois on y mélangeait de la paille ou du foin haché, du regain et même de la chaux, si on en avait pour lui donner plus de consistance, ou le rendre plus maniable. On s'en servait alors particulièrement pour la bauge et les torchis. Dans tous les cas le mortier fait avec du sable et de la chaux était à préférer pour les habitations si on pouvait s'en procurer facilement.

« Pour que le mortier soit bon, la chaux doit être bonne, de même que le sable et il ne doit y avoir trop ni de l'un ni de l'autre selon la destination; quant à l'eau il en faut toujours le moins possible: le mortier qui en a trop ne vaut rien. »

I.2.4. Mortier de chaux

La chaux est obtenue par calcination de pierre calcaire vers 1000°C, dans des fours à chaux, opération pendant laquelle elle abandonne son gaz carbonique. Le produit restant, un oxyde de calcium est appelé chaux vive et prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface que l'on va hydrater ou éteindre par immersion dans l'eau. Cette immersion, provoque la dislocation, un foisonnement, ainsi qu'une forte chaleur. Le résultat est une pâte, qui prend le nom de chaux éteinte. C'est ce matériaux plastique, qui mêlé à des agrégats va constituer les mortiers. Une fois incorporée dans la maçonnerie, un phénomène de cristallisation (en fait une carbonatation) s'opère au contact de l'air et plus particulièrement le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère qui fait retourner la chaux à l'état de calcaire. L'extinction de la chaux se faisait de préférence dans des fosses attenantes au chantier.

La présence d'argile associée au calcaire de calcination conduit à différents types de chaux: Il y a lieu de distinguer:

- La chaux aérienne: le phénomène de cristallisation s'opère en présence d'air. Les chaux aériennes se répartissent en:
- Chaux grasses, obtenues à partir de calcaires très pures ou contenant de 0,1 à 1% d'argile

- Chaux maigre, obtenues à partir de calcaires contenant de 2 à 8% d'argile
- Chaux hydraulique: le phénomène de cristallisation s'opère aussi en milieu aqueux, obtenues à partir de calcaires contenant plus de 8% d'argile.
- Au-delà de 20% d'argile, les calcaires sont impropres à la confection de la chaux. A partir de 35%, La roche devient tendre et friable. A partir de 50% on parle de marne calcaire, elle devient plastique. Avec 70% d'argile, elle devient marne argileuse.

La dénomination chaux grasse/chaux maigre vient de ce que les chaux maigres augmentent peu de volume lorsqu'on les réduit à l'état de pâte tandis que les chaux grasses donnent un volume plus important, on dit qu'elles foisonnent beaucoup plus. De même les chaux grasses forment avec la même quantité de sable un mortier plus gras que lorsqu'on emploie des chaux maigres.

Pendant longtemps on a appelé chaux maigres celles qui avaient la propriété de durcir dans l'eau et chaux grasses celles qui n'avait pas cette propriété. La distinction, chaux aérienne/chaux hydraulique est venue du fait que certaines chaux maigres ne sont pas hydrauliques.

La présence d'argile comme d'autres corps, pouvant modifier la phase d'extinction, les Romains supposèrent, de manière erronée, que ces substances diminuaient la qualité de la chaux. Les romains n'utilisèrent donc que de la chaux aérienne. Cet état de connaissance perdurera jusqu'au XIXe siècle. En 1863, il suffit d'interroger les maçons et chauxfourniers sur les diverses chaux du pays pour qu'ils désignent les chaux hydrauliques comme les plus mauvaises. Il fallait insister pour qu'ils en fassent mention. Les chaux hydrauliques sont alors recherchées activement car on connaît désormais leurs propriétés exceptionnelles

La chaux grasse entreposée et recouverte d'argile pouvait se conserver fort longtemps, à l'état de pâte, des années éventuellement. Cette caractéristique accompagnait donc les chaux grasses obtenues à partir de calcaires très purs, les marbres par exemple et était très prisée des romains car elle permettait aux maçonneries à mesure qu'on les élève, de se tasser progressivement, assurant au niveau du joint une répartition uniforme des efforts.

Vers l'1er siècle après J-C, la Rome antique améliore la technique de la chaux par l'incorporation de sable volcanique de Pouzzoles (la pouzzolane) ou de tuiles broyées. Comme le dit Vitruve dans son *De architectura* (Livre II, Chapitre 6), le mortier peut résister à l'eau et même faire prise en milieu très humide.

Cette vertu est due à la présence d'une grande quantité de silicate d'alumine. En ajoutant à la chaux aérienne de la pouzzolane ou des tuileaux, on la transforme artificiellement en chaux hydraulique. Ce n'est qu'en 1818 que Louis Vicat expliquera les principes de cette réaction, dans sa théorie de l'hydraulicité ouvrant la voie à la découverte du ciment Portland.

D'après Viollet-le-Duc, au Moyen Âge, les mortiers de chaux sont de qualités très différentes; ils sont de qualité médiocre pendant les IX^e, X^e, et XI^e siècles. Il semble qu'alors on avait perdu les procédés de fabrication de la chaux, et ce n'est que par exception que l'on trouve, dans des édifices de cette époque, des mortiers offrant une certaine consistance. Au XII^e siècle, les mortiers commencent à reprendre de la force; pendant les XIII^e, XIV^e et XV^e siècles, on en fait d'excellents.

I.2.5. Mortiers hydrauliques et ciments

Jusqu'au début du XIX^e siècle la manière de faire le mortier a presque toujours été abandonné aux ouvriers. En comparant les mortiers des anciens et surtout ceux qui ont été faits par les Romains, aux mortiers des temps modernes on suppose alors que les premiers étaient meilleurs. Plusieurs constructeurs annoncent alors avoir trouvé le secret des mortiers romains mais d'autres supposent avec raison qu'il n'a subsisté à travers le temps que les constructions faites avec de bonnes chaux dans de bons mortiers.

Avec le XIX^e siècle, la chimie connaît un énorme progrès quantitatif, avec Antoine Lavoisier qui l'a promue en science exacte. Liés à la révolution industrielle, les progrès réalisés en métallurgie, la maîtrise des fours industriels, la diversification des combustibles, profite à tous les secteurs de l'industrie. On chauffe pour décomposer la matière, pour obtenir de nouveaux matériaux. Enfin la nécessité de grands travaux d'infrastructures (canaux, ports, urbanisme, fortification), aiguillonnée par un climat de concurrence pour la suprématie économique et politique entre l'Angleterre et la France conduit à rechercher de nouveaux mortier. On chauffe pour produire de manière effrénée.

La connaissance des réactions entrant dans la fabrication et dans la prise des chaux, dont l'usage n'a pas beaucoup évolué depuis l'antiquité, est acquise progressivement.

L'intérêt scientifique se porte sur les chaux faisant prise sous l'eau, que les romains obtenaient par adjonction de pouzzolane ou de tuileaux à de la chaux grasse. On leur donnera les noms successifs de ciment aquatique (et improprement le nom commercial de « ciment romain », par James Parker en 1796). C'est à Vicat que l'on doit le nom de chaux hydraulique.

Louis Vicat, ingénieur des ponts et chaussées, part de l'opinion généralement admise à cette époque que c'est l'argile qui donne à la chaux la propriété singulière de durcir dans l'eau. Il expérimente les chaux et parcourt la France à la recherche des calcaires contenant les quantités d'argile nécessaires à leur élaboration. Sous son impulsion l'usage des chaux hydrauliques se généralise.

Ses recherches visent également à produire des chaux factices (qui font prise sous l'eau très promptement) à partir des produits séparés: argiles et calcaire. Il expérimente différentes combinaisons de chaux et d'argile qu'il sèche et fait cuire. Les principes actifs des mortiers hydrauliques sont dit-il en 1828, la chaux, silice, alumine, oxyde de fer¹⁸, en 1856, la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie: « La chaux en est toujours la base essentielle on la mêle selon sa nature tantôt avec le sable seul, tantôt avec le sable et la pouzzolane tantôt enfin avec la pouzzolane seule. Nous comprenons sous ce nom de pouzzolane non seulement les produits volcaniques de l'Italie et de la France mais aussi toutes les substances analogues que l'on modifie par le feu des fourneaux et auxquelles on parvient à donner à très peu près les qualités des pouzzolanes naturelles. Il suit de là que les argiles ferrugineuses, les ocres, les schistes bleuâtres, la houille, le basalte, les laves, le grès ferrugineux, etc. sont autant de matières que le feu peu ramener à l'état des pouzzolanes volcaniques. »

En 1796, James Parker découvre sur l'Île de Sheppey, Grande Bretagne, un calcaire suffisamment argileux pour donner après une cuisson à 900°C, un ciment naturel à prise rapide qui est commercialisé sous la marque Ciment romain. Le ciment prompt, est de même nature. Joseph Aspdin dépose en octobre 1824 le premier brevet et crée la marque « Ciment Portland ». C'est un jalon à partir duquel, la fabrication du ciment va devenir progressivement une industrie chimique.

La fabrication du clinker (Mélange de calcaire et d'argile) ingrédient principal des ciments est pointée du doigt, fin XXe siècle, comme responsable d'approximativement 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques à l'origine du récent réchauffement climatique.

I.2.6. Mortier de ciment

I.2.6.1. Définition

Le mortier de ciment est une poudre qui durcit au contact de l'eau pour devenir solide et résistante en séchant.

I.2.6.2. Composition du mortier de ciment

Par définition, les mortiers contiennent des liants, des granulats et de l'eau; des adjuvants ou des colorants peuvent aussi être ajoutés. Dans notre étude nous nous intéresserons au ciment comme liant, au sable comme granulat, de l'eau et d'éventuels adjuvants.

I.2.6.3. Le liant

Si les professionnels appellent le mortier la <<colle>>, c'est précisément grâce au liant qui joue le rôle d'adhésif et de liaison entre les différents éléments. Le plus courant des liants, le ciment, est employé pour la réalisation des mortiers et des bétons. Le liant peut être du ciment portland, ou du ciment de maçonnerie, ou un des divers mélanges de ces deux matériaux. Le ciment portland donne au mortier de maçonnerie sa résistance mécanique, en particulier sa résistance initiale, qui est indispensable à une époque où la vitesse de construction est telle que l'on exige qu'un mur puisse supporter une charge importante le lendemain même de sa construction. Les mortiers de ciment portland manquent de plasticité, ont un faible pouvoir de rétention d'eau et sont mal aisés à travailler.

Le ciment blanc, s'emploie pour les enduits, les joints, le dallage visibles et peut être teinté par des colorants spéciaux ou par le sable utilisé en agrégat. Quand il est gris, il demande à être recouvert.

Ciment portland-ciment de maçonnerie :

Le ciment de maçonnerie est un produit déposé contenant du ciment portland et un filler minéral inerte (calcaire) et des adjuvants tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air. Les adjuvants donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants.

Les mortiers à ciment de maçonnerie ont en général une ouvrabilité excellente et une résistance mécanique modérée. Les microbulles d'air entraînées contribuent à créer l'effet de roulement à billes et à améliorer l'ouvrabilité du mortier malgré une mauvaise granulométrie des granulats. L'augmentation de la teneur en air est cependant accompagnée d'une diminution de la résistance à la compression et surtout d'une diminution de la force de liaison. Il est important de souligner que l'on n'a pas spécifié une valeur maximale pour la teneur en air. Les mortiers à ciment de maçonnerie peuvent supporter des quantités de sable élevées, ce dont on

abuse souvent au détriment de la qualité de la maçonnerie. L'addition de ciment portland aux mortiers de ciment de maçonnerie augmente leur résistance mécanique de sorte qu'ils peuvent être classés dans les types M et S. Il est difficile de prévoir les propriétés des mortiers de ciment de maçonnerie parce que leur composition n'est pas connue et peut être modifiée sans préavis. On ne devrait les utiliser qu'en fonction de leur comportement sur place.

I.2.6.4. Granulats

Le sable est le granule employé le plus fréquemment. Il est inerte et sert tout d'abord à accroître la compacité. Ses limites granulométriques sont entre 0,080 mm et 4 mm. Malheureusement, la plupart des granulats sont choisis pour des raisons de coût et de disponibilité, et il est bien connu qu'en Afrique un grand nombre des granulats employés ne sont pas conformes aux exigences granulométriques puisqu'ils contiennent en général trop d'éléments fins. Il peut y avoir une certaine variation granulométrique sans que les propriétés du mortier soient fortement altérées, mais la qualité du mortier serait certainement améliorée si on choisissait le granulat avec plus de soin.

Le rôle du sable est de conférer masse et corps au mélange. Plus le sable est gros, moins est importante sa surface à lier.

Le sable gris, jaune ou blanc, de rivière ou de carrière donne la consistance du mortier.

Pour les mortiers grossiers on utilise du sable de calibre 0.5 mm.

Pour les Mortiers et bases d'enduits on utilise du sable de calibre 0/3 mm.

Pour les enduits de finition on utilise du sable de calibre : 0.3 à 0.8 mm.

Le sable est toujours humide, mais son taux d'humidité varie. Il faut augmenter la proportion de sable préconisé de 10 à 20% s'il est très humide.

I.2.6.5. L'eau de gâchage

L'eau remplit un double rôle:

Elle sert à hydrater le ciment, et, ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à l'eau de gâchage diffèrent beaucoup pour les mortiers et le béton. Dans le cas du béton un faible rapport eau-ciment est préférable. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau devrait être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser. Elle doit être

le plus propre et la plus pure possible. Trop d'impuretés risquent de réduire la résistance de la maçonnerie. Une eau teintée (de rouille, par exemple, si elle est puisée dans un bidon métallique) risque de colorier l'ouvrage. La quantité d'eau (0.5 à 2.5 litre par kg de ciment) se dose en fonction de l'utilisation du mélange.

I.2.6.6. Les adjuvants ou additifs

De nombreux adjuvants sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé. Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne technique permettent habituellement d'obtenir une maçonnerie solide.

Une mauvaise composition, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique défectueuse ne peuvent pas être corrigées par l'emploi d'adjuvants. La quantité des bétons et des mortiers et leurs ouvrabilités peuvent être améliorées par l'apport d'adjuvants. Les plus utilisées sont les plastifiants réduisant la quantité d'eau nécessaire et donc améliorant la cohésion, les antigels hydrofuges et autres accélérateurs ou retardateurs de prise.

Couleurs – Colorants

On peut donner de la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus de 6 % du poids du ciment portland. Le noir de carbone ne devrait pas représenter plus de 2 %. On doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée. Pour que la couleur ne varie pas beaucoup d'un lot à l'autre il est conseillé d'acheter des liants auxquels des colorants ont été ajoutés en usine et de gâcher de grandes quantités de mortier.

I.2.6.7. Les utilisations des mortiers de ciment

La fonction principale d'un mortier est de liaisonner les éléments de maçonnerie de manière à ce qu'ils constituent un seul bloc. Par ailleurs, le mortier sépare les éléments et remplit toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène.

Le rejointoiement doit permettre de renforcer les propriétés structurales des éléments et en même temps empêcher la pénétration de la pluie. Ceci exige une adhérence complète. Si elle est réalisée, le mur aura une durabilité suffisante pour résister aux éléments. Le mortier est employé de diverses manières :

I.2.7. Les Mortier de granulats de caoutchoucs

I.2.7.1. Généralités sur les caoutchoucs

Il existe deux grandes familles de caoutchoucs :

- Les caoutchoucs naturels qui proviennent de l'hévéaculture (hévéa : arbre qui produit du latex),
- Les caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir de dérivés du pétrole. Les caoutchoucs sont

Utilisés dans de nombreux secteurs : automobile/transport (pneumatiques, système de freinage, airbag, étanchéité, ..), équipement industriel, bâtiment et travaux publics (BTP), médical , alimentation , colles et adhésifs...etc.

Les déchets de caoutchouc ont quatre origines :

- Les déchets de caoutchouc industriel (8%),
- Les déchets de fabrication de pneumatiques et chambres à air (3,5%),
- Les pneumatiques usagés (86,6%),
- Les déchets du recyclage (poudrettes, copeaux) (2%).

I.2.7.2. Les caractéristiques d'un mortier de ciment avec caoutchouc

D'après leurs propriétés, les mortiers se subdivisent en deux catégories:

- Les mortiers plastiques
- Les mortiers durcis.

I.2.7.3. Les mortiers caoutchouc plastiques

I.2.7.3.1. Les mortiers plastiques

a) L'ouvrabilité

L'ouvrabilité est la propriété essentielle des matériaux cimentaires à l'état frais. Selon la nature du matériau à étudier, elle est estimée par l'essai d'affaissement ou d'étalement, elle révèle le degré de fluidité de la pâte du béton et sa facilité de mise en œuvre. (Figure I.1). Ce comportement est expliqué par la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc.

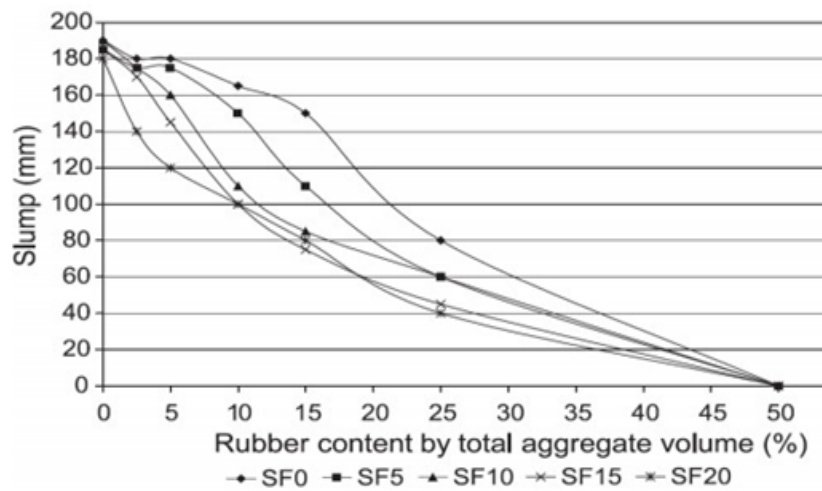


Figure I.1. Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement

b) La masse volumique fraîche

Les travaux de recherches, menés par bravo et al 2012, sur l'évolution de la masse volumique des bétons de caoutchouc obtenus par substitution partielle des granulats classiques silico-calcaires de densités relativement élevées, avec des granulats de caoutchouc de densité faible, ont révélé que les densités fraîches de ceux-ci sont diminuées avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc dans la masse du béton. Cette tendance est expliquée par la légèreté des granulats de caoutchouc (Figure I.2).

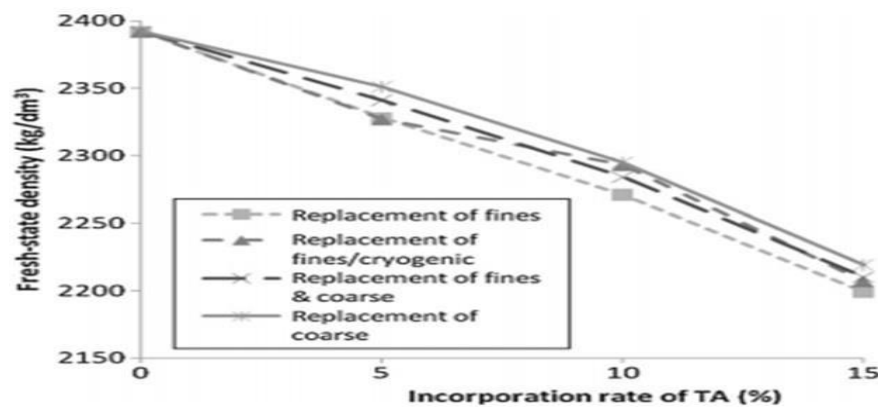


Figure I.2. L'influence des GCR sur la masse volumique du béton.

I.2.7.3.2. Mortier durci

a) Masse volumique

Les travaux de (Pedro et al 2013) ont montré une diminution de la masse volumique apparente, à l'état durci, des mortiers obtenus par substitution des granulats naturels (sable) par les granulats de caoutchouc de même taille (taille de 0-6 mm). En effet, l'allègement

obtenu, à 28 jours de cure, varie de 4,3% à 9,9% pour un taux de remplacement allant de 5% à 15%, respectivement.

b) Résistance en compression

L'incorporation des déchets de caoutchouc, sous forme des agrégats, dans les matériaux cimentaires conduit à la diminution de la résistance en compression. Cette réduction varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment du pourcentage de GCR, de la taille et de la surface des particules de caoutchouc. En effet, (Turatsinze et al 2004), lors de ses travaux, a remplacé le sable naturel par les GCR de même taille (taille maximale de 4 mm) dans les mortiers, avec un taux de substitution allant de 10 % à 30%. Les résultats de cette étude ont montré une réduction importante de la résistance en compression (Figure I.3). La perte de performances est de 58% et 79%, correspondant aux taux de substitution de 20% et 30% de caoutchouc, respectivement. Cette chute importante de résistance en compression, des matériaux cimentaires, enregistrée est due à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice.

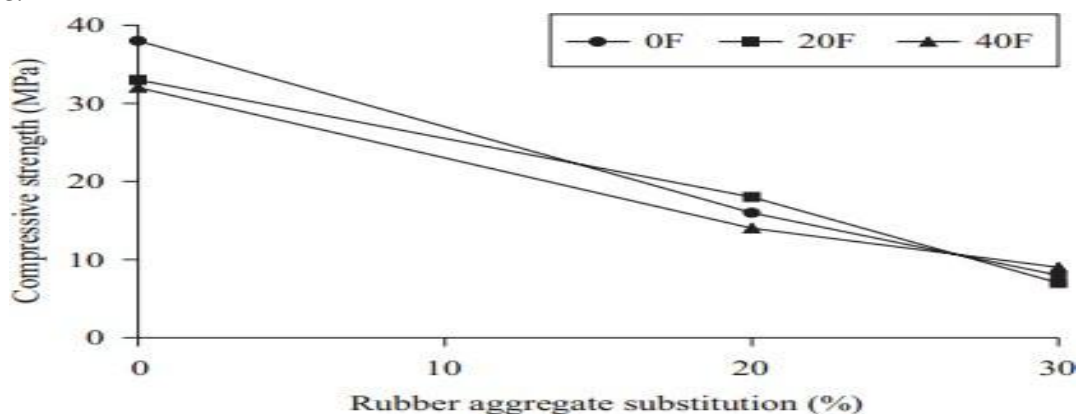


Figure I.3. Effet du taux de substitution de GCR sur la résistance en compression de mortiers de ciment renforcé par des fibres

I.3. Les pneumatiques usagés

Les déchets produits par la société industrielle ne cessent de croître en quantité et en complexité. Parmi ceux-ci, on trouve les déchets de pneus usagés qui croient avec le développement de l'industrie automobile. Selon les rapports des associations des fabricants des pneus, la production mondiale annuelle de pneus est de 1,4 milliard d'unités, ce qui correspond à environ 17 millions de tonnes des pneus usagés chaque année.

Malgré que les déchets pneumatiques soient classés dans les contextes normatifs

Européennes comme des déchets banals, néanmoins, ils sont volumineux, incompatibles et non biodégradables, en raison de leur résistance aux différentes sortes d'attaques physico-chimiques.

Un pneu, est un mélange, à base de caoutchouc synthétique et naturel, dans lequel sont ajoutés des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité (Tableau I.1).

Suivant l'état de dégradation, on peut classer les pneus usagés en deux catégories essentielles

I.3.1. Les pneus 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.

I.3.2. Les pneus non réutilisables (PUNR) :

Ils sont les pneus qui ne peuvent plus de remplir leur fonction initiale, de plus, ce sont des pneus qui ne se prêtent pas à un rechapage. Ces pneus, sont concernés par l'opération de valorisation dans le domaine de Génie Civil.

Tableau I.1. Composition chimique de pneu.

Matière	Pneu
Elastomères	43 à 47%
Noir de carbone	21 %
Acier	16 à 27 %
Textile	0 à 5 5.5%
Oxyde de Zinc	1%
Soufre	1%
Additifs	6 à 7.5%

La mise en décharges, des pneus usagés, n'est pas sécurisés en cas d'incendie criminel ou naturel (foudre). De plus, Le brûlage des déchets de caoutchouc dans les décharges publiques présente une gêne environnementale et économique extrêmement danger pour la nature, il menace non seulement les ressources naturelles en eaux et en air, mais aussi la santé publique. Un exemple concret, relatant cette situation, est celui de l'incendie d'Hager-ville (Canada) qui

a fallu 17 jours pour l'éteindre et a fait des dégâts estimés à environ de 12.6 millions de Dollars, la température de combustion n'est pas assez élevée pour qu'il y ait incinération complète, et des composés toxiques sont libérés dans l'air, le sol et les cours d'eau, provoquant une contamination de ces milieux (Figure I.4) .

Par ailleurs, l'eau de pluie qui s'accumule dans la forme concave des pneus présente un abri idéale pour les rongeurs et la reproduction de moustiques qui transmettent aux êtres humains des maladies graves comme la dengue et la fièvre jaune .



Figure I.4. Les risques de feu dans les décharges des pneus usagés.

I.3.3. Valorisation des pneumatiques usagés

La valorisation des déchets consiste en tout traitement des déchets qui permet de leur trouver une utilisation ayant une valeur économique positive. En vue des risques, cités ci-dessus, la valorisation des pneus usagés devient une obligation pour faire face aux nombreuses menaces qu'ils font encourir à notre environnement. En Europe, l'interdiction de stockage de pneus usagés, dans les décharges publiques, a conduit au développement de méthodes de valorisation de ce type de déchets. L'objectif de cette démarche consiste à apporter une valeur ajoutée à ces derniers, par leur transformation soit en énergie soit en sous-produits pouvant être utilisés dans d'autres secteurs, comme illustré par la Figure I.5.

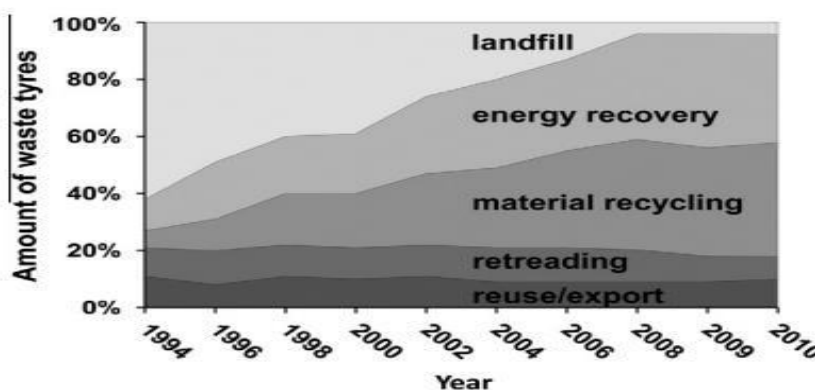


Figure I.5. La progression des activités de valorisation des pneus usagés en Europe.

I.3.4. Durée de vie du caoutchouc

Une dizaine d'années plus tard (≈ 1850), la technologie du caoutchouc connut une nouvelle avancée avec l'apparition des fours à vieillissement accéléré permettant d'étudier la détérioration du caoutchouc dans le temps. On put alors mesurer rapidement les pertes de propriétés dans différentes conditions, en particulier lors de l'exposition à l'oxygène atmosphérique. L'utilisation de ces fours permit de tester différents produits chimiques et d'ajouter des antioxydants qui augmentent la durée de vie des produits en caoutchouc, comme les pneus pour les véhicules et les articles souples, tels que gants, toiles et tuyaux. D'autres progrès vinrent de l'utilisation du latex non coagulé. On introduisit des méthodes permettant d'extruder le caoutchouc en fils minces pour l'utilisation textile ; on peut également déposer le caoutchouc sur des métaux et d'autres matériaux.

I.3.5. Chiffre

On produit 10.9 millions de tonnes de caoutchouc par an dans le monde, soit 340 kilos de caoutchouc par seconde (compteur) ; essentiellement produit par les hévéas et consommé par l'industrie automobile pour les pneumatiques.

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

En 2010, la production dans l'Union européenne est de 798 346 t d'ABS (dont Espagne : 97 809 t, Italie : 96 931 t) et de 188 322 t de SAN (dont Italie : 16 450 t, Royaume Uni: 762t) .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%.

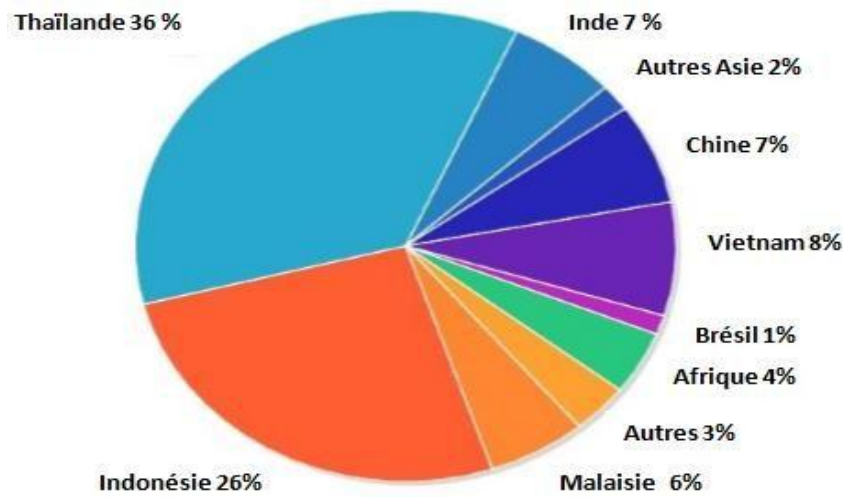


Figure I.6 La production mondiale de caoutchouc naturel en 2014.

I.3.6. Recyclage de caoutchouc

Les difficultés liées au recyclage des caoutchoucs sont nombreuses, à la fois économiques et techniques. La consommation apparente de produits finis vulcanisés est répartie en deux grandes catégories :

Les déchets de pneumatiques (60%) et les déchets de caoutchoucs industriels (40%) Dans une optique de valorisation, il est essentiel de considérer le gisement disponible, c'est-à-dire celui qui peut être récupéré et traité dans des conditions économiquement viables.



Figure I.7 :Processus de recyclage de déchets de caoutchouc

I.4. Granulats de construction

Les pneus usagés, sont réutilisés sous forme des granulats de construction, déchiquetés ou broyés, à différentes tailles, selon le type d'application. Les autres constituants des pneus (aciers, fibres), sont séparés et peuvent être valorisés aussi à part. Les particules de caoutchouc, présentent des caractéristiques chimiques et physiques semblables à celles du caoutchouc vierge. La poudrette est utilisée en combinaison avec des liants pour réaliser des murs anti-bruit, des dalles de sol pour les aires de jeux et des pistes d'athlétisme, comme montre (la Figure I.8).



Figure I.8. Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recyclés.

En vue de l'état de l'art, on constate que plusieurs actions de valorisation des déchets, de pneus usagés, ont été menées dans le monde, particulièrement dans le domaine des matériaux de construction. Ce secteur, grand consommateur de granulats, peut en effet résorber une quantité importante de ces déchets et pallier ainsi les contraintes économiques et environnementales particulièrement dans les régions qui ont souffrit du problème d'épuisement des granulats naturels. A cet effet, nombreux travaux ont été réalisées sur l'emploi des particules de caoutchouc, en substitution aux granulats siliceux- calcaires, dans les matériaux cimentaires, ont montré l'intérêt de l'association du ciment/caoutchouc dans l'élaboration des bétons de caoutchouc.

En Algérie, il y a quelques études réalisées sur la thématique de valorisation des granulats de caoutchouc recyclés dans les matériaux cimentaires. Ces travaux ont bien montré les effets bénéfiques des granulats de caoutchouc recyclés sur quelques propriétés des matériaux cimentaires.

I.5. Pneus Entier

Dans le cadre de la valorisation des pneus usagés, les travaux réalisés par (Nguyen & al Décembre 1993), a consisté en la mise au point d'une technique très efficace et économique, permettant d'améliorer de façon durable les propriétés mécaniques du sol "pneu-sol". Celle-ci consiste à combiner des pneus entiers ou déchiquetés avec de sol afin de construire des ouvrages ayant le rôle de réducteurs de poussées, de murs antichute de pierres et de bassins de rétentions d'eau pluviale. Ainsi, on compte plus de 2000 ouvrages, à travers le monde entier, construits dans cette optique, notamment en Algérie, au Canada, aux Etats-Unis et en France (Figure I.9).



Figure I.9. La technique de Pneu sol : le chantier Cannes-Mandelieu en 1988.

De plus, dans le domaine des travaux publics (TP), les pneus entiers sont des matériaux idéals pour réaliser des passages souterrains, Ports et marinas, Récifs artificiels, Routes provisoires, Conduits et drainage poreux et remblais de routes.

I.6. La valorisation des déchets de caoutchouc en Algérie

Aujourd'hui, les nombreuses possibilités de transformation ou d'élimination offertes par le pneu usagé non réutilisable en font un matériau à fort potentiel. Les chercheurs et les industriels découvrent ses nombreuses qualités: la résistance de sa structure lorsqu'il est conservé en entier, sa souplesse lorsqu'il est transformé en granulats, ou son pouvoir calorifique lorsqu'il est utilisé comme combustible.

Le problème des pneus usagés est non seulement Mondial mais aussi Maghrébin et Africain; des millions de tonnes sont jetés chaque année dans le monde (déchet encombrant et abondant).

Dans le bassin méditerranéen, l'Algérie comme certains d'autres pays a compris que la technologie est la clé de l'évolution, sur des méthodes et des techniques nouvelles, tout en pensant à la protection et la conservation de l'environnement dans le cadre du développement durable. Les photos des (Figures I.10 à I.15) montrent des applications pratiques avec des pneus de caoutchouc pour la stabilité des talus à l'aide de la technique pneu-sol.



Figure I.10. Pose des nappes de pneus

Projet pilote-Route de Bousmail



Figure I.11. Ouvrage végétalisé

Projet de Bousmail



Figure I.12.Stabilité d'un glissement de terrain-Cas de Tizi Ghenif-Willaya de Tizi Ouzou Algérie



Figure I.13.Ouvrage de Mostaganem RN11 (Algérie)-Stabilité d'un talus



Figure I.14.Superposition et attache des pneus



Figure I.15.Bétonnage de la 1ère file de pneus

I.7. Béton de déchets de caoutchouc

I.7.1. 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.7.2. Synthèses sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de caoutchouc

I.7.2.1. Propriétés fraîches

a) L'ouvrabilité

L'ouvrabilité est la propriété essentielle des matériaux cimentaires à l'état frais. Selon la nature du matériau à étudier, elle est estimée par l'essai d'affaissement ou d'étalement, elle révèle le degré de fluidité de la pâte du béton et sa facilité de mise en œuvre. Les travaux réalisés par Khatib & al 1999 sur la faisabilité des bétons de caoutchouc, ont montré la chute graduelle de leur ouvrabilité avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc (Figure I.1). Ce comportement est expliqué par la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc. Des récentes études, ont confirmé la même tendance pour des composites cimentaires.

b) La masse volumique fraîche

Les travaux de recherches, menés par Bravo et al 2012, sur l'évolution de la masse volumique des bétons de caoutchouc obtenus par substitution partielle des granulats classiques silico-calcaires de densités relativement élevées, avec des granulats de caoutchouc de densité faible, ont révélé que les densités fraîches de ceux-ci sont diminuées avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc dans la masse du béton. Cette tendance est expliquée par la légèreté des granulats de caoutchouc (Figure I.16).

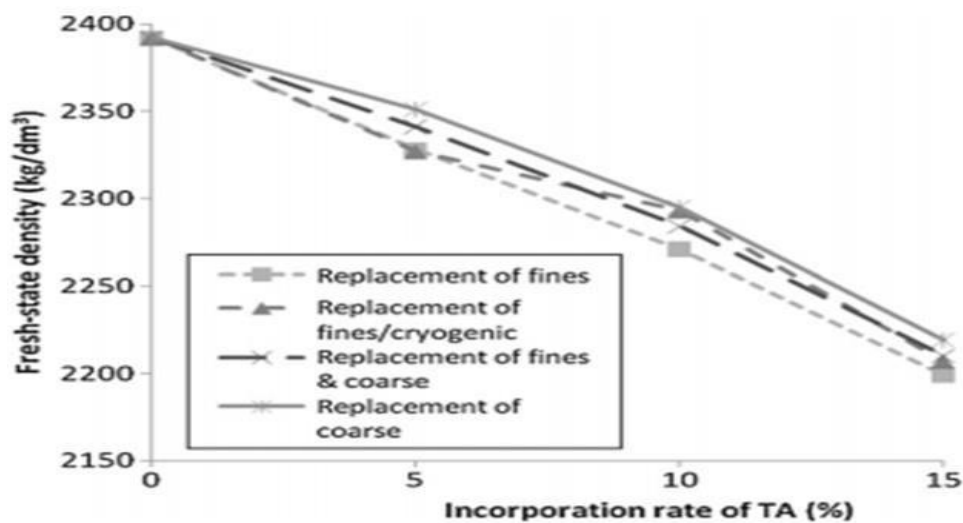


Figure I.16. L'influence des GCR sur la masse volumique du béton.

c) Retrait

La maîtrise des variations dimensionnelles, dues aux retraits et/ou gonflements, des matériaux cimentaires, améliore leurs résistances aux différentes agressions physico-chimiques. L'influence des granulats de caoutchouc sur le retrait et/ou gonflement, des matériaux cimentaires, a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. La plupart des auteurs ont rapporté que l'inclusion des GCR dans les matériaux cimentaires augmente son retrait, en raison de la faible rigidité des particules de caoutchouc.

La Figure I.17 montre que le retrait des mortiers, incorporant les granulats de caoutchouc, est plus élevé que celui du mortier de référence sans granulats de caoutchouc.

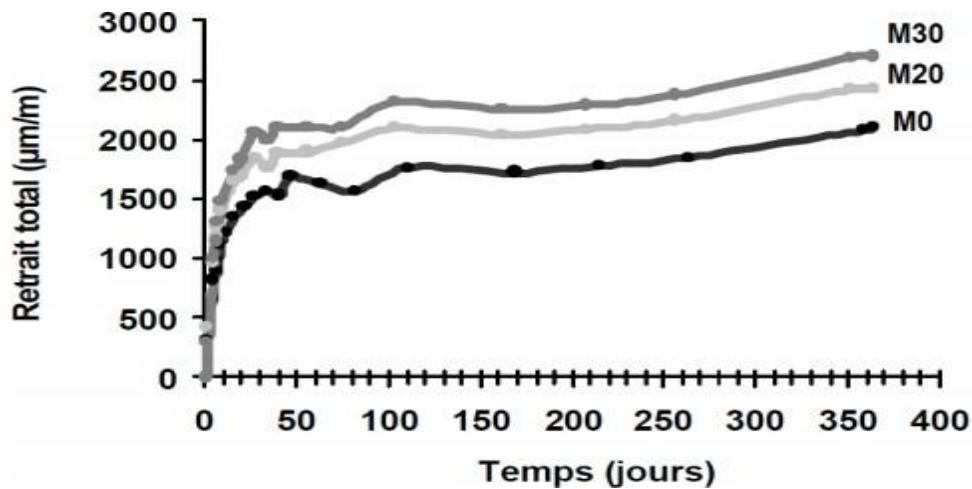


Figure I.17. L'influence des GCR sur le retrait des mortiers de ciment.

I.7.2.2. Propriétés à l'état durci

a) 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.

Dans les matériaux cimentaires, dont une partie des granulats naturels est remplacée par des G.C. de nature, de forme, de densité et en général de propriétés physiques tellement différentes de celles des granulats naturels, de toute évidence il est attendu que ces propriétés du caoutchouc vont influencer la résistance en compression des composites obtenus.

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.

Des observations à la vidéo microscope montrent un défaut d'adhérence manifeste et une auréole de transition plus étendue entre la matrice cimentaire et les grains de caoutchouc. La photographie de la Figure I.18 montre cet état qui contribue sans doute aussi à l'augmentation de la porosité globale du composite et à la chute de la résistance en compression.



Figure I.18. : Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope (grossissement x100).

I.7.2.3. Propriétés hydriques

a) Porosité

Des travaux de Skripkiūnas et al June 2010., ont montré que l'ajout des GCR aux matériaux cimentaires, augmente leur porosité (Figure I.19). Cette hausse en porosité, est liée à l'augmentation de la teneur en air occlus lors de gâchage des mélanges à base de granulats de caoutchouc. L'augmentation de l'entraînement d'air, dans la matrice peut être liée à la nature non-polaire du caoutchouc. En effet, en présence de l'eau, les particules de caoutchouc ont tendance à adsorber de l'air en surface. Des résultats similaires, ont été obtenus par certains auteurs lors de l'étude des propriétés rhéologiques d'un béton à base de granulats de caoutchouc.

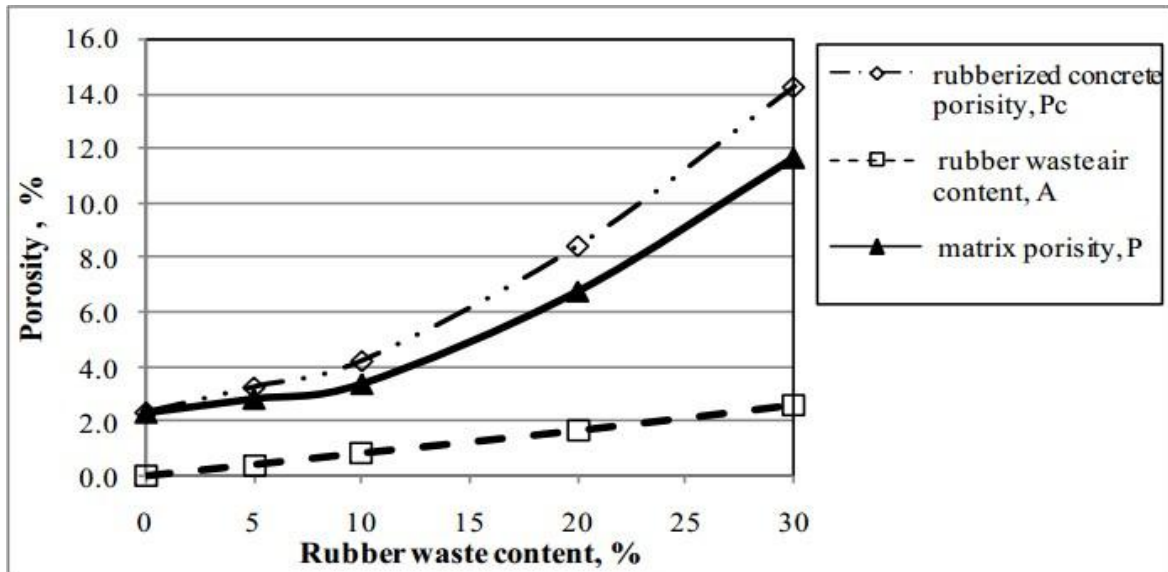


Figure I.19. Effet des particules de caoutchouc sur l'évolution de la porosité des GCR, pâte de ciment et de béton de caoutchouc.

b) Capacité d'absorption d'eau

La propriété d'absorption capillaire quantifie la capacité d'un matériau à absorber de l'eau par capillarité. Celle-ci représente un paramètre important car, elle conditionne les échanges hydriques et thermiques entre les matériaux cimentaires et son environnement. C'est une propriété qui influe considérablement sur la durabilité des matériaux. Cette propriété précieuse, est estimée par la sportivité qui caractérise la capacité d'absorption d'humidité en phase liquide, en fonction du temps. Les travaux réalisés par Benazzouk et al 2006 ont porté sur l'effet de l'inclusion des GCR sur le taux d'absorption capillaire des composites cimentaires avec un taux de substitution du ciment allant de 0 à 50 %. Les résultats obtenus ont montré clairement l'effet positif des granulats de caoutchouc sur la capacité d'absorption d'eau par le matériau composite. On observe une nette diminution de la sportivité, en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc (Figure I.20). De plus, des études récentes, réalisées par plusieurs auteurs, ont confirmé cet effet bénéfique de l'ajout des GCR sur la capacité d'absorption d'eau des mortiers et des bétons.

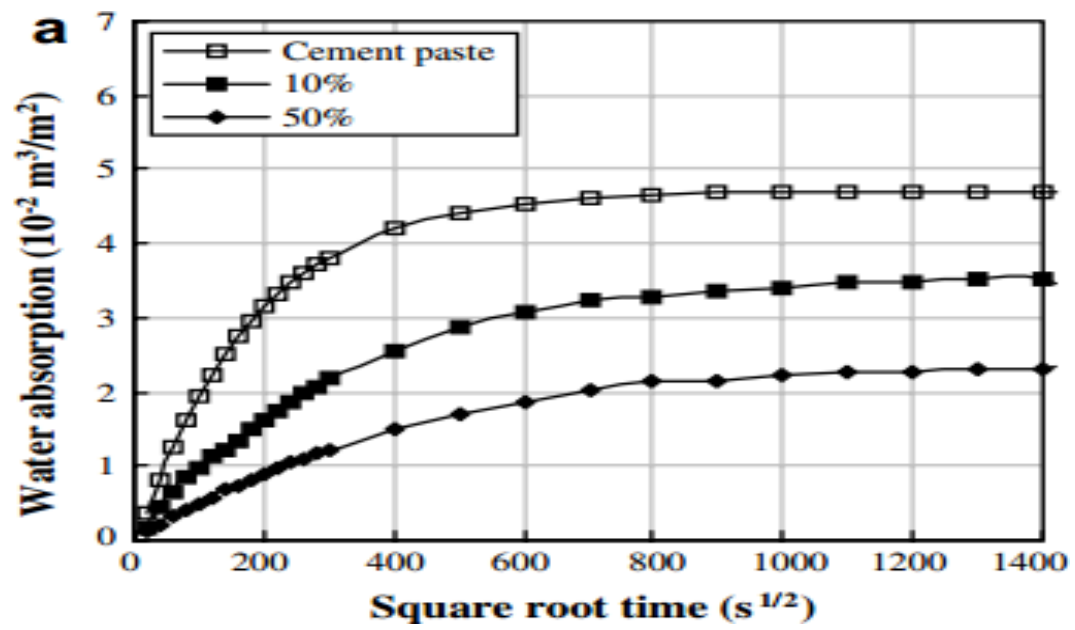


Figure I.20. Effet des GCR sur le taux l'absorption d'eau des pâtes de ciment incorporé les granulats de caoutchouc .

I.8. Conclusion

L'analyse des résultats de recherches rapportés dans la littérature concernant la problématique des pneumatiques usagés non réutilisables, notamment leur valorisation sous forme des granulats de construction (bétons, mortiers), montrent que cette pratique est faisable et peut diminuer le stock des déchets de pneus usagés. Malgré la chute des résistances mécaniques (en compression et en traction), ce composite offrit une grande capacité de déformation avant la localisation de la fissuration.

CHAPITRE II MATERIAUX UTILISES ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons dans la première partie, les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition du mortier incorporé des granulats de caoutchouc à savoir : la masse volumique, la granulométrie, la propreté, la composition chimique et minéralogique ainsi que d'autres propriétés physiques. Dans la deuxième partie, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, dans le but d'une bonne interprétation des différents résultats expérimentaux sur les mortiers à base de granulats de caoutchouc car en effet le mortier à base de granulats de caoutchouc est un matériau composite qui se compose de deux matériaux non homogènes à savoir le mortier et les granulats de caoutchouc. Les qualités fondamentales du mortier de granulats de caoutchouc sont largement marquées par divers facteurs tels que : la composition du mortier, le dosage et les dimensions des granulats de caoutchouc, la maniabilité.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Sable

Le sable utilisé est un sable alluvionnaire provenant de la sablière Djamaa, de la Wilaya d' El-oued souf. (Voire Figure II.1). Sa masse volumique apparente est : 1640 Kg/m^3 et sa masse volumique absolue est : 2700 Kg/m^3 . Sa granulométrie varie de 0 à 4 mm. La Figure II.1 montre un tas de sable utilisé.



Figure II.1. Sable Djamaa (0-4mm)

II. 2.1.1. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

II. 2.1.1.1. Les masses volumiques

➤ La masse volumique apparente

Cet essai est régi par la norme NFP 18-554, 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 :

γ : Masse volumique apparente ;

M: Masse du matériau ;

V: Volume total du matériau.

➤ La masse volumique absolue

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301, 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 :

γ_s : Masse volumique absolue ;

M_s : Masse du matériau ;

V_s : Volume total du matériau solide.

II .2.1.1.2. 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.

Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont présentés par les Figure II. 2.

Tableau II.1. Résultats d'analyse granulométrique du sable.

Dimension N°ouverture Tamis (mm)	Poids des Refus Partiels (g)	Refus cumulés (g)	Pourcentage des Refus cumulés (%)	Pourcentage des Tamisâtes cumulés (%)
5	0.00	0.00	0.00	100.00
4	5.70	5.70	0.30	99.70
3.15	9.40	15.10	0.80	99.20
2.5	14.10	29.20	1.50	98.50
2	21.30	50.90	2.50	97.50
1.6	28.60	79.50	4.00	96.00
1.25	59.20	138.70	6.90	93.10
1	79.00	217.70	10.90	89.10
0.8	190.80	408.50	20.40	79.60
0.63	311.90	720.40	36.00	64.00
0.5	178.00	898.40	44.90	55.10
0.4	591.80	1490.20	74.50	25.50
0.315	141.70	1631.90	81.60	18.40
0.25	110.20	1742.10	87.10	12.90
0.2	99.80	1841.90	92.10	7.90
0.16	100.30	1942.20	97.10	2.90
0.125	32.90	1975.10	98.80	1.20
0.1	17.10	1992.20	99.60	0.40
0.08	5.40	1997.60	99.90	0.10
Fund	2.40	2000.00	100.00	0.00

II .2.1.1.3 Module de finesse

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du mortier tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). 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 sables à mortier.

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

- ✚ 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 mortier résistants mais moins maniabiles

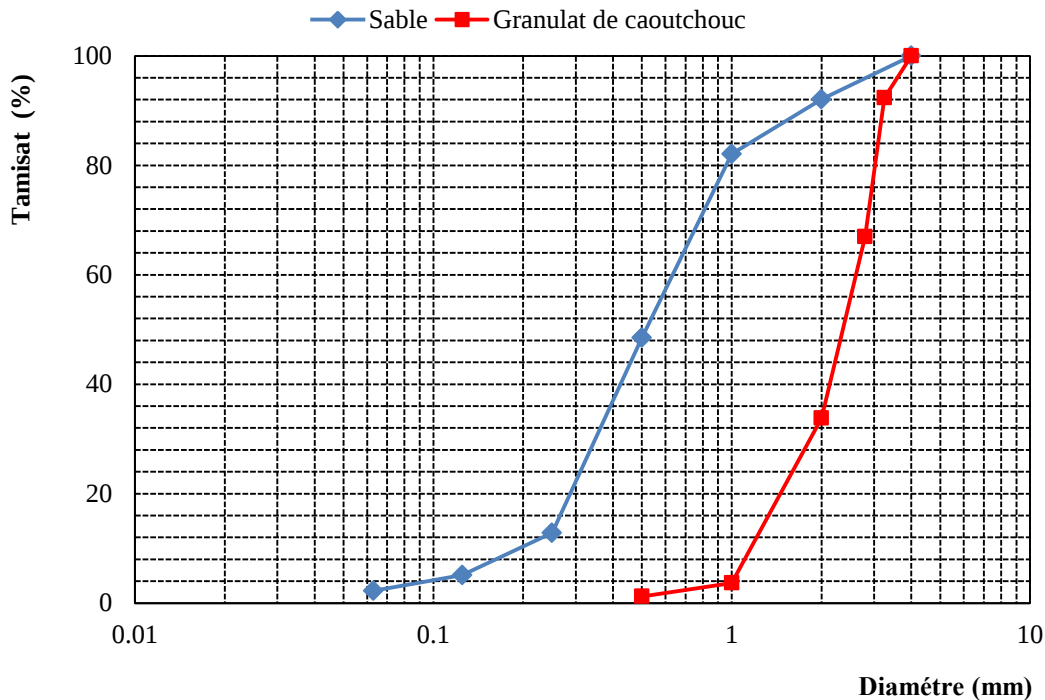


Figure II.2. Courbes granulométriques des sables et des granulats de caoutchouc.

II.2.1.1.4. Equivalent de sable

Cet essai, référencé par la norme NF P18 598, est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers. 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.3.):

La hauteur h1 : sable propre + éléments fins.

La hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est:
$$ES = \left(\frac{h2}{h1} \right) \times 100 \quad (II.4.)$$

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.

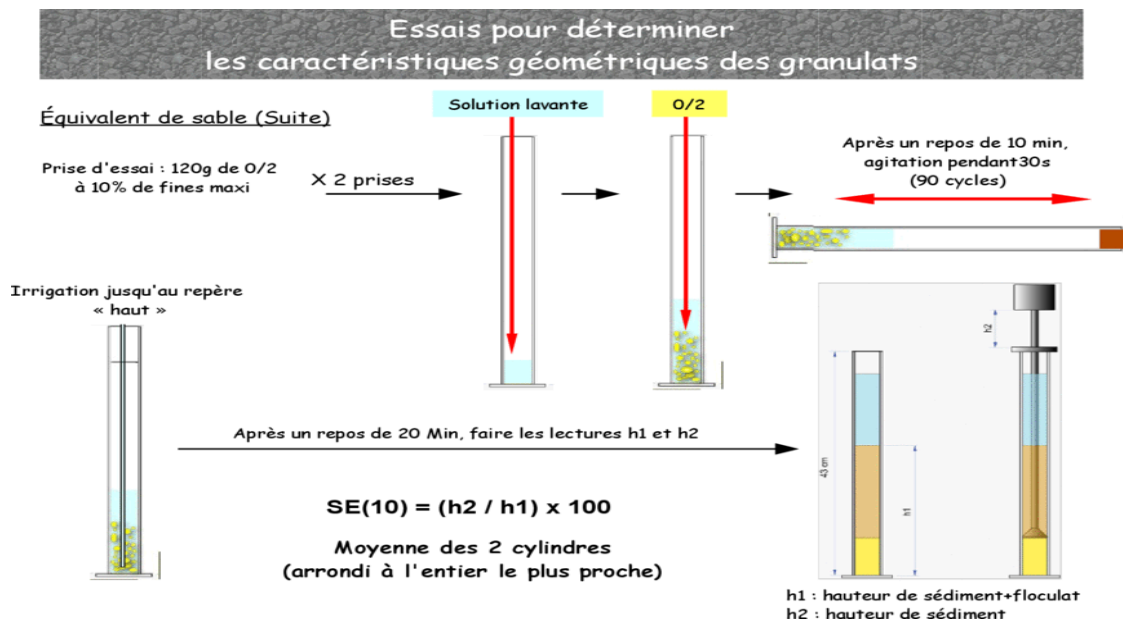


Figure II.3. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Selon la norme NF P18 598, les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers sont indiquées sur le Tableau II.2 :

Tableau II.2. Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les mortiers.

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.2.1.1.5 Compacité et porosité

La compacité (**C_p**) est le rapport du volume de la matière solide au volume total. Elle est définie par :

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

Où : **p** est la porosité. porosité.

II.1.1.2.5. Indice des vides

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$\mathbf{e = \frac{V_V}{V_s} = \frac{P}{(100-P)}} \quad (\text{II.6.})$$

II.1.1.3. Synthèse des résultats

Tableau II.3., regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur le sable utilisé.

Caractéristiques	D _{max} (mm)	γ (kg/m ³)	γ_s (kg/m ³)	M _f	C _p (%)	ESV (%)	p (%)	e (%)
Sable Alluvionnaire Djamaa	4.00	1640	2700	1.87	61.36	84	38.64	62.97

II.2.1. 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, le ciment a été fourni par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (LAFARGE), Biskra, Algérie (Figure II.4.).



Figure II.4. Ciment utilisé.

Les caractéristiques physico-chimiques du ciment inscrite sur la fiche technique sont données dans les Tableaux II., 4., 5.,6.

Tableau II.4. Résistance à la compression (NA 234)

Age	2 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	Différent ≥ 10	≥ 42.5

Tableau II.5. Analyses chimiques (NA 5042)

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

Tableau II.6. Composition minéralogique du ciment (CLINKER).

Minéraux	Pourcentage
C_3S	60 ± 3.0
C_2S	15 ± 3.0
C_3A	7.5 ± 1.0
C_4AF	11 ± 1.0

Tableau II.7. Caractéristiques physiques du ciment MATINE

Caractéristique	Valeurs	Unité
S.S. Blaine (NA 231)	$3700 - 5200$	Cm^2/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	$\mu\text{m}/\text{m}$
Expansion	≤ 0.3	Mm
Masse volumique apparente	975	kg/m^3
Densité spécifique	3080	kg/m^3

II-2-2. Granulats de caoutchouc

Les granulats de caoutchouc utilisés, dans notre étude, sont issus du déchiquetage 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 située dans la ville de Setif. Après l'élimination de leurs parties métalliques et textiles, ils sont déchiquetés et broyés mécaniquement pour obtenir la finesse désirée Figure II.5. La classe granulaire des granulats de caoutchouc recyclés utilisés, dans notre composite est de 0 à 4 mm.

Les propriétés physiques de ceux-ci sont récapitulées dans le Tableau II.8. La Figure II.5 illustre l'analyse granulométriques de ceux-ci.



Figure II.5. Granulats de caoutchouc (0-4mm)

Tableau II.8. Propriétés physiques des granulats de caoutchouc utilisés

Masse volumique absolue	940 Kg/m ³
L'absorption d'eau (%)	0.3
Granulométrie	0-4 mm

II.2.3 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 publique d'eau potable.

II.3. Formulation du mortier d'étude:

Pour la composition du mortier témoin (M0), nous avons utilisé un dosage en ciment et sable qui correspond à celui d'un mortier normalisé conformément à la norme EN 196-1; c'est à dire une part de ciment et trois part de sable. Concernant le dosage en eau nous avons utilisé l'essai de cône D'Abrams pour la détermination de la quantité d'eau correspondant à un mortier "plastique". Un rapport E/C de 0,58 est obtenu à partir de ce test.

C'est à partir de cette Formulation que nous avons lancé une campagne de formulation de mortiers incorporant des granulats de caoutchouc que nous présentons dans ce qui va suivre.

II.3.1 Compositions des mortiers :

Les compositions étudiées sont présentées dans le Tableau II.9 suivant :

Tableau II.9. Composition des mortier utilisés (Kg/m³)

Désignation du mélange	Teneur en caoutchouc (%)	Ciment (kg)	Sable (kg)	Granulats de caoutchouc (kg)	Eau (L)	E/C
M0	0	400	1200	0	232	0.58
M10	10	400	1080	41,36	232	0.58
M20	20	400	960	82,72	232	0.58
M30	30	400	840	125	232	0.58

II.4. Procédure expérimentale

II.4.1 Fabrication du mortier

II.4.1.1 Pesage des composants du mortier

Dans un premier temps nous avons pesé individuellement tous les composants du mortier pour chaque formulation du tableau II-9.



Figure. II.6. Pesage des composants du mortier.

II.4.1.2 Malaxage des composants du mortier

Pour le malaxage des constituants, un malaxeur à mortier de capacité 5 litres a été utilisé avec le séquençage suivant :

- Introduction dans un premier temps de tous les composants solides et secs dans le malaxeur (ciment, sable, granulats de caoutchouc) puis malaxage pendant trois (3) minutes à vitesse lente (1) afin d'assurer une bonne dispersion des G.C. parmi les éléments traditionnels du mortier.
- Introduction dans un second temps du mélange contenant 80% d'eau puis malaxage pendant deux (2) minutes à vitesse lente.
- Introduction dans un troisième temps éventuellement les 20% restant d'eau puis malaxage pendant 2 minutes à vitesse lente.
- Dans un quatrième temps malaxage de tout le mélange pendant trois à quatre (3-4) minutes à vitesse rapide.

II.4.1.3 Coulage des éprouvettes

Dans ce travail nous avons confectionné 40 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm Voir Figures II.7.



Figure. II.7. Moule (4 x 4 x 16) cm.

II.4.1.4 Etapes de coulage des éprouvettes

Le coulage des éprouvettes s'est fait en quatre (4) tapes ci-dessous :

a) Première étape

Dans un premier temps nous avons mis en place les moules puis les avons lubrifiés avec de l'huile à moteur 40 afin que le mortier ne se colle pas aux parois des celles-ci. (Voir figure II.8).



Figure II.8. Lubrification des moules

b) Deuxième étape

Dans un deuxième temps nous avons rempli l'éprouvette à moitié puis vibrer le tout pendant trente (30) secondes afin d'éliminer les vides. (Voir Figure II.9)



Figure II.9. Remplissage à moitié et vibration

c) Troisième étape

Dans un troisième temps nous avons rempli totalement l'éprouvette puis vibrer le tout une deuxième fois pendant trente (30) secondes. (Voir Figure II.10.)



Figure II.10. Remplissage total et vibration

d) Quatrième étape

Dans un quatrième temps nous avons vibré une troisième fois l'éprouvette et tout son contenu pendant vingt (20) secondes puis rendu uniforme sa face supérieure en la rasant avec la truelle (Voir Figure II.11).



Figure II.11. Dernière vibration et rasage

II.4.1.5 Démoulage et pesage des éprouvettes après 24h

En effet pour chaque formulation, le démoulage des éprouvettes s'est fait après 24h

II.4.2 Les essais réalisés

II.4.2.1 Essais réalisés à l'état frais

II.4.2.1.1 Essai de maniabilité (cône d'Abrams) :

Cet essai consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassés avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche.
- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm voir figure II.12., 13a., 13b.

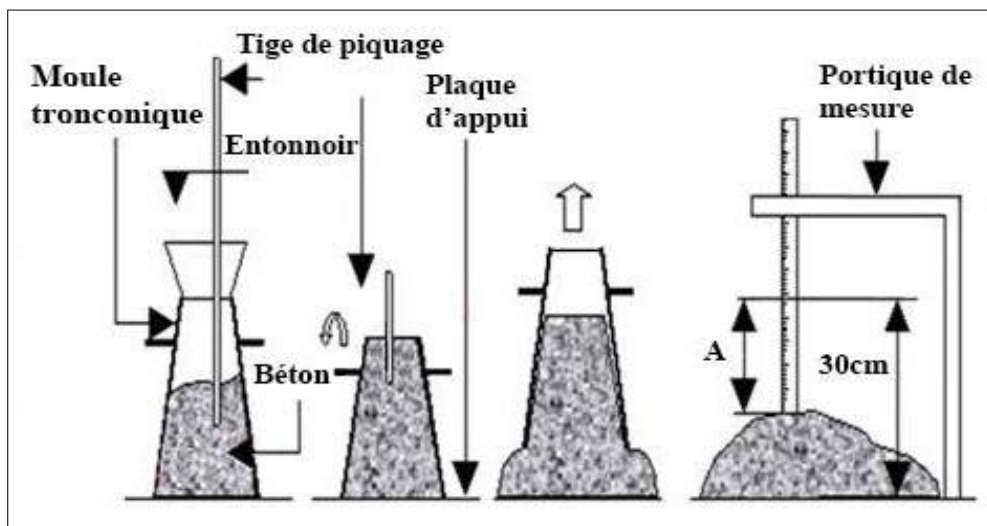


Figure II.12. Dispositif de mesure d'affaissement au cône d'Abrams



Figure II.13a. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams avant le démoulage.



Figure II.13b. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams après le démoulage.

Afin de définir la classe d'affaissement, la norme NF P18 305 définit les classes d'affaissement indiquées sur le Tableau II.10.

Tableau II.10. Classes de consistance du mortier.

Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams Norme NF P18 305	
Consistance	Affaissement au cône d'Abrams (en cm)
Ferme	1 - 4
Plastique	5 - 9
Très plastique	10 - 15
Fluide	16 - 21
Très fluide	≥ 22

II.4.2.1.2 Détermination de la masse volumique

Cette mesure détermine le rendement volumique de la composition du mortier frais et permet de vérifier la validité de la formulation théorique.

Pour effectuer cette mesure, on utilise un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement de mortier et sa surface libre est ensuite arasée. On pèse alors le récipient plein. Le rapport entre la masse du mortier (masse du récipient plein à laquelle on

soustrait la masse du récipient vide) sur le volume du récipient correspond à la masse volumique du mortier frais exprimée en kg/m^3 .

Cette mesure s'est faite en effet en trois étapes :

a) Première étape

Mise en place de la première couche du mortier jusqu'à la moitié du récipient suivi de Vingt-cinq coup avec la tige de piquage. (Voir figure II.14)



Figure II.14. Mise en place de la première couche

a) Deuxième étape

Mise en place de la deuxième couche du mortier jusqu'à remplissage du récipient suivi de Vingt-cinq coup avec la tige de piquage. (Voir figure II.15)



Figure II.15. Mise en place de la deuxième couche

C) Troisième étape

Uniformisation de la surface du mortier puis pesage sur la balance en gramme. Voir figure II.16



Figure II.16. Rasage et pesage

II.4.3 Essais réalisés à l'état sec

Les essais sur le mortier 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 influer par des facteurs externes.

II.4.3.1 Détermination de la masse Volumique

Après la cure à l'eau, les éprouvettes ont été saturées d'eau. Afin de pouvoir réaliser d'éventuelle essais il a fallu sécher les éprouvettes dans l'étuve à la température optimum de 105 degré.

Ainsi pour déterminer la masse volumique à l'état sec. Nous avons dans un premier temps séché les éprouvettes dans l'étuve jusqu'à la masse constante.

Une fois la masse constante obtenue, nous avons mesuré les dimensions des éprouvettes pour déterminer le volume. La masse constante trouvée et le volume calculé, nous avons pu déterminer la masse volumique de chaque éprouvette à l'état sec.



Figure II.17. Mise à l'étuve des éprouvettes à une température de 105°

II.4.3.2 Essai d'absorption d'eau par immersion totale

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher des éprouvettes jusqu'à la masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche.

L'essai d'absorption par immersion a été effectué effectivement, en séchant des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm du mortier à l'étuve jusqu'à masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l'eau jusqu'à saturation des matériaux.

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

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

II.4.3.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité

Les essais d'absorption capillaires sont également intéressants et faciles à effectuer. Ils renseignent globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Ils sont aussi utilisés en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du mortier.

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5. Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette de dimension (4 x 4 x 16) cm du mortier posé à sa base sur de petits supports de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés.

On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps jusqu'à 24h. A chaque échéance, l'éprouvette est sortie du récipient, pesée (M) et replacée dans le récipient en position vertical.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.



Figure II.18 Dispositif de l'essai d'absorption d'eau par capillarité

II.4.3.4 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'un banc de flexion à 3 points. Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du mortier 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 mortier 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.19). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

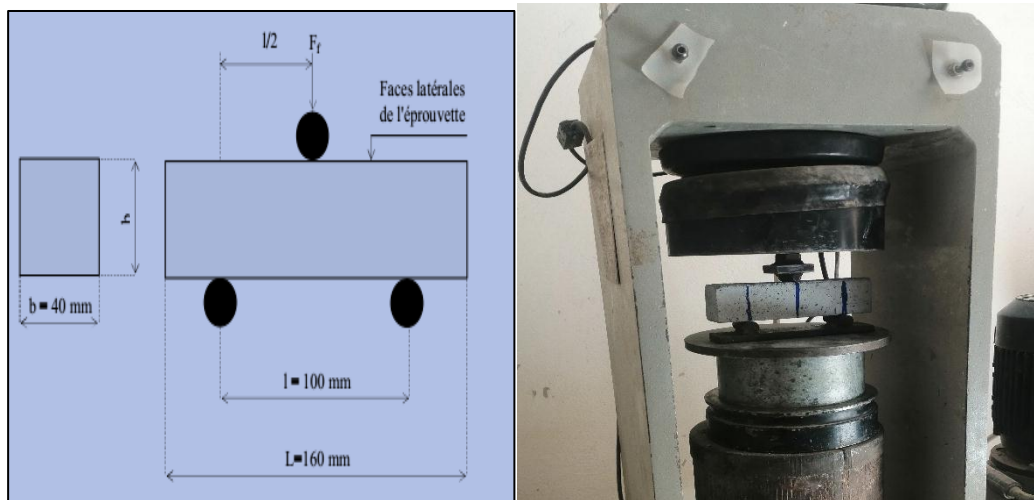


Figure II.19. Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

II.4.3.5 Essai de compression

La résistance à la flexion d'un mortier est déterminée par chargement en trois points jusqu'à la rupture d'éprouvettes moulées en mortier durci.

La résistance à la compression du mortier est déterminée sur les deux parties résultant de l'essai de résistance à la flexion.

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression.

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

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

Les résistances en compression ont été évaluées à 28 jours en utilisant une machine d'essai en compression hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 kN, pourvue d'un dispositif de compression pour les moules de mortiers (Figure II.20). La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.

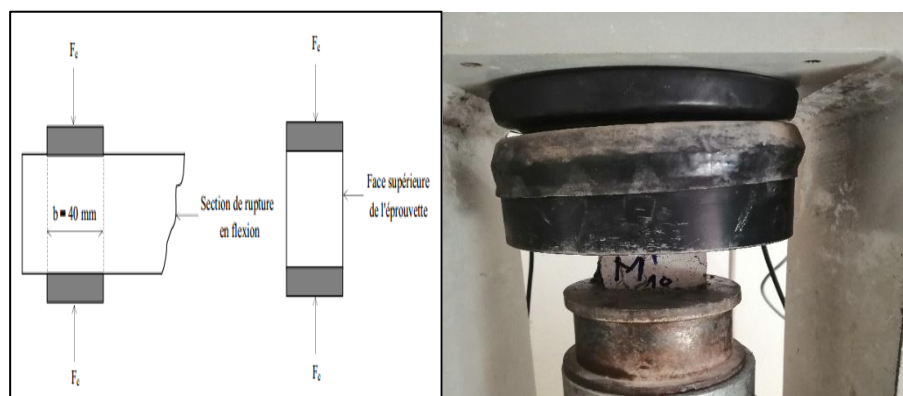


Figure II.20. : Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

II.4.3.5 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 mortier 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 mortier. Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le mortier. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme le montre la (Figure II.21).



Figure II.21. Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm³

CHAPITRE III

ANALYSE ET DISCUSSION

DES RESULTATS

III.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous exposons les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les mortiers incorporant les granulats de caoutchouc, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre II. Une analyse et une discussion des résultats, suivies d'une comparaison avec ceux reproduits dans la littérature, y seront également présentées.

III.2. Mortier a l'état frais

III.2.1 La maniabilité

Dans cette partie, nous avons étudié la maniabilité des mortiers d'étude à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF P18 451. Le Tableau III.1 résume les valeurs de la mesure de l'étalement et la Figure III.1 présente l'ensemble des valeurs de la maniabilité.

Tableau III.1. Maniabilité des mortier étudiées.

Formulation(%)	Affaissement (cm)	Classes d'affaissement
M 0%GC	6	Plastique
M 10%GC	6,8	Plastique
M 20%GC	7,5	Plastique
M 30%GC	8,2	Plastique

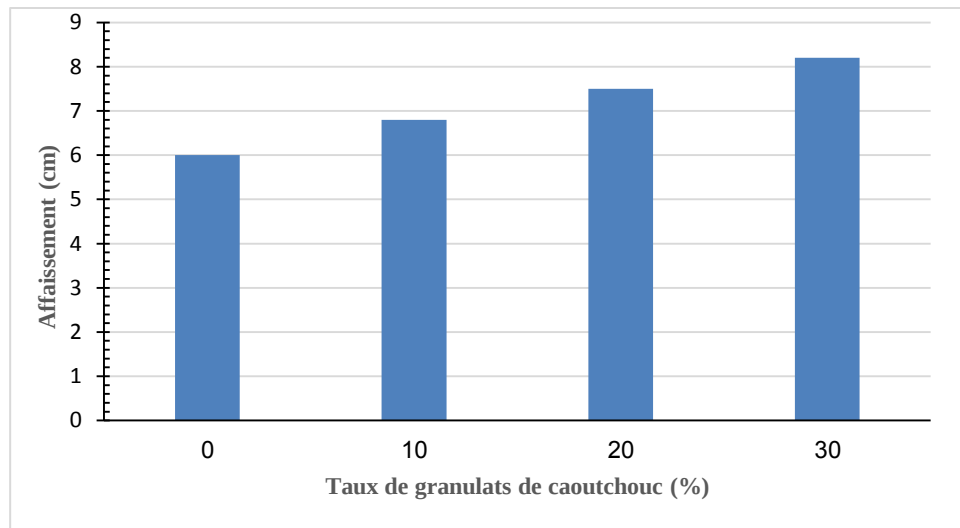


Figure III. 1. Maniabilité des mortiers étudiées.

On constate nettement que l'affaissement au cône d'Abrams augmente en augmentant le dosage des granulats de caoutchouc, un dosage de 30% de ces granulats donne la plus grande valeur de l'affaissement. L'adjonction de granulats de caoutchouc dans des mortiers 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. Cette même conclusion est tirée par de nombreux chercheurs (Gargouri et al. 2011 , Sukontasukkul et al. 2006)

III.2.2 La masse volumique

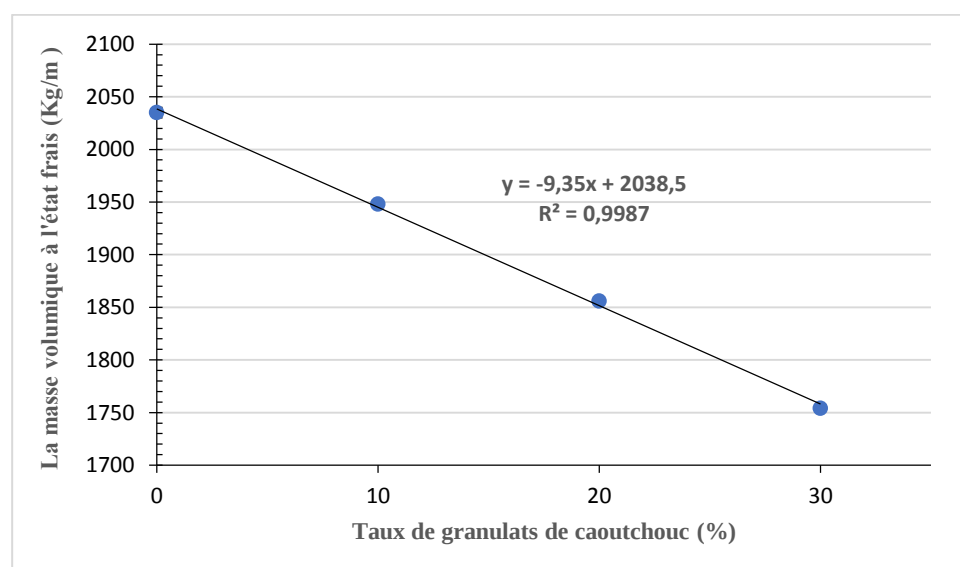


Figure III. 2. Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à l'état frais de Mortier.

La courbe de la Figure.III.2 tend à prouver que les granulats de caoutchouc apportent un allègement aux mortiers étudiés. La masse volumique varie en effet de 2037 à 1754 kg/m³. Cet allègement peut s'expliquer par la faible masse volumique des granulats de caoutchouc utilisés ($M_v=940 \text{ kg/m}^3$) par rapport à celle du sable remplacé ($M_v=2640 \text{ kg/m}^3$). Ces résultats sont crédibles et concordent bien avec les données bibliographiques (Fadiel et al., 2014., Eiras et al., 2014).

III.3. Mortier a l'état sec

III.3.1 La masse volumique

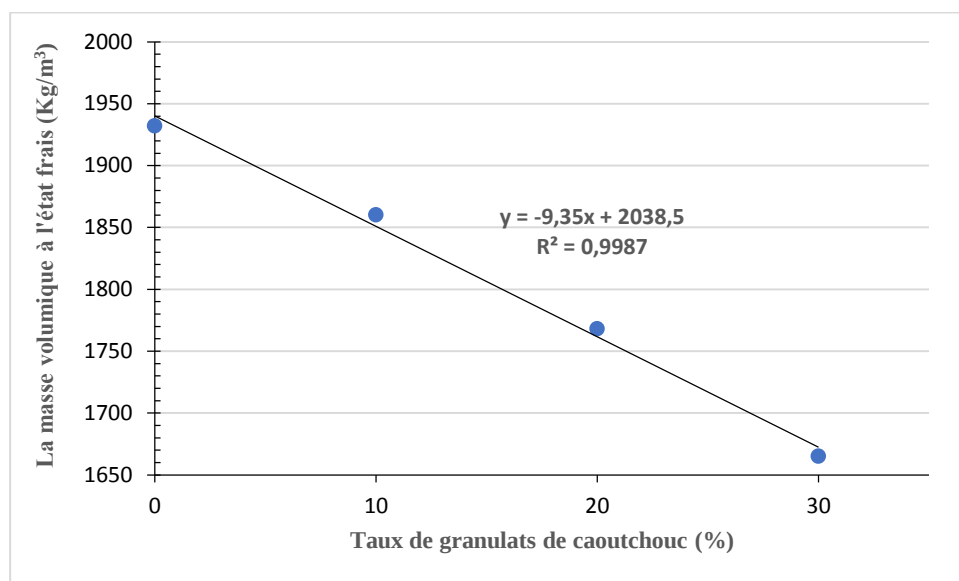


Figure III. 3. Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à sec de Mortier

D'après la Figure.III.3, la masse volumique sèche diminue considérablement de 1932 kg/m³ (mortier témoin) à 1665 kg/m³ avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc de 0 à 30%. Cette réduction est de l'ordre de 3.72 % pour M 10% GC, 8.48 % pour M 20 % GC et 13.82 % pour M 30 % GC respectivement par rapport au mortier de référence M 0% GC.

La faible masse volumique des granulats de caoutchouc (940 kg/m³) 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 (Hernandez-Olivares et al., 2004, Siddique et al., 2004).

Il est à noter que les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs (Fadiel et al., 2014, Eiras et al., 2014).

III.3.2 L'absorption d'eau par immersion totale

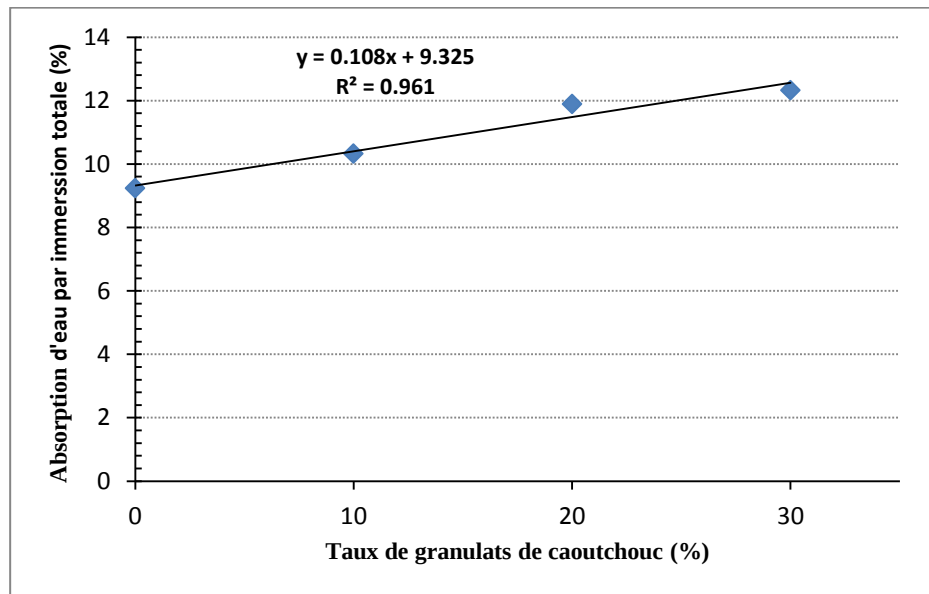


Figure III. 4. Absorption d'eau par immersion totale des Mortiers.

On peut observer que l'absorption d'eau par immersion totale augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Les valeurs de l'absorption sont 10.33, 11.89 et 12.32% pour des taux qui varient aussi de 10, 20 et 30%. Ce résultat pourrait être lié aux pores générés par les granulats de caoutchouc en raison de leurs natures non polaires et de leur tendance à piéger l'air en surface. L'air piégé dans le mortier contenant des GC rend le mortier plus poreux, devenant ainsi plus perméable et permettant une absorption accrue d'eau (Adamu et al., 2014).

III.3.3 L'absorption d'eau par capillarité

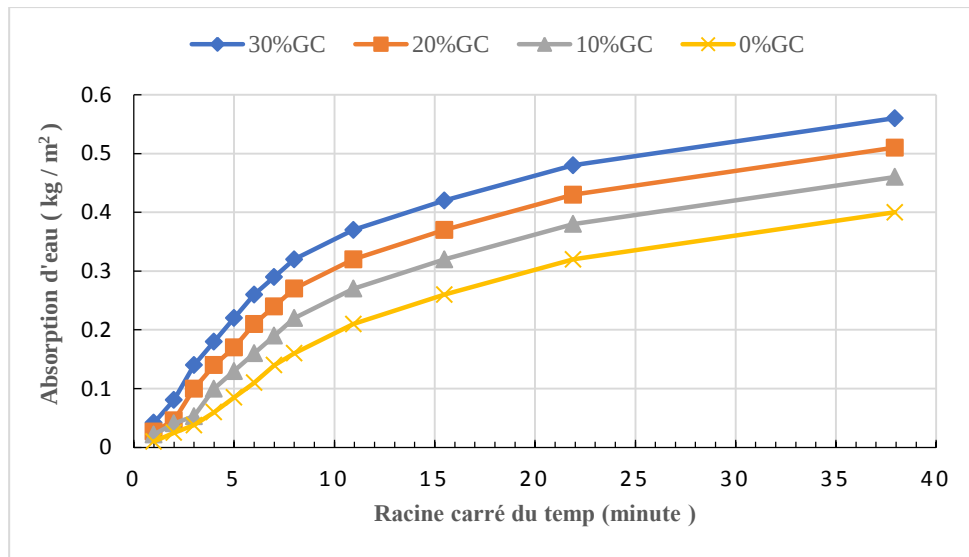


Figure III. 5. Valeurs de l'absorption d'eau par capillaire en fonction du temps de Mortier

D'après la Figure III.5, on remarque une augmentation de l'eau absorbée est observée lorsque le taux de substitution des granulats de caoutchouc est augmenté, Les valeurs de l'absorption d'eau i (après 24 heures d'exposition dans l'eau) pour les mortier M 0% GC, M 10% GC, M 20% GC, M 30% GC sont : $0.4 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$, $0.46 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$, $0.51 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$, $0.56 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2$ respectivement .

On peut expliquer cette augmentation par :

- la faible adhérence entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment, l'apparition des fissures et l'augmentation de l'air occlus dans le mélange, favorisent l'absorption d'eau et rendent le mélange caoutchouté plus sensible aux infiltrations d'eau comparativement avec les mélanges témoins sans caoutchouc (Dodoo-Arhin, D et al., 2015).

III.3.4 Résistance à la compression

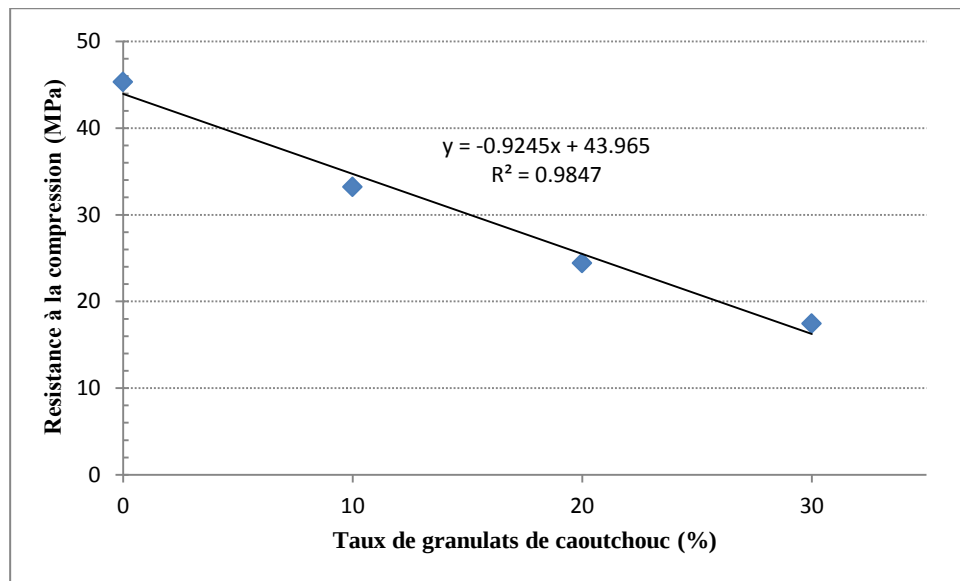


Figure III. 6. Relation entre le taux de granulats de caoutchouc et la résistance à la compression à 28 jours.

D'après la Figure.III.6, on peut conclure que les granulats de caoutchouc font chuter la résistance à la compression (R_{c28}) des mortiers étudiés. Cette chute est de l'ordre de 26.72 % pour M 10% GC, 46.08 % pour M 20 % GC et 61.54 % pour M 30 %PC respectivement par rapport au mortier de référence M 0% GC.

On peut expliquer cette chute par :

- Le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire (Li, G et al., 2004., Silvestravičiūtė, I et al., 2002).
- la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels. (Li,Z et al.,1998).
- l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc (Benazzouk, A et al.,2007).

III.3.5 Résistance à la traction par flexion

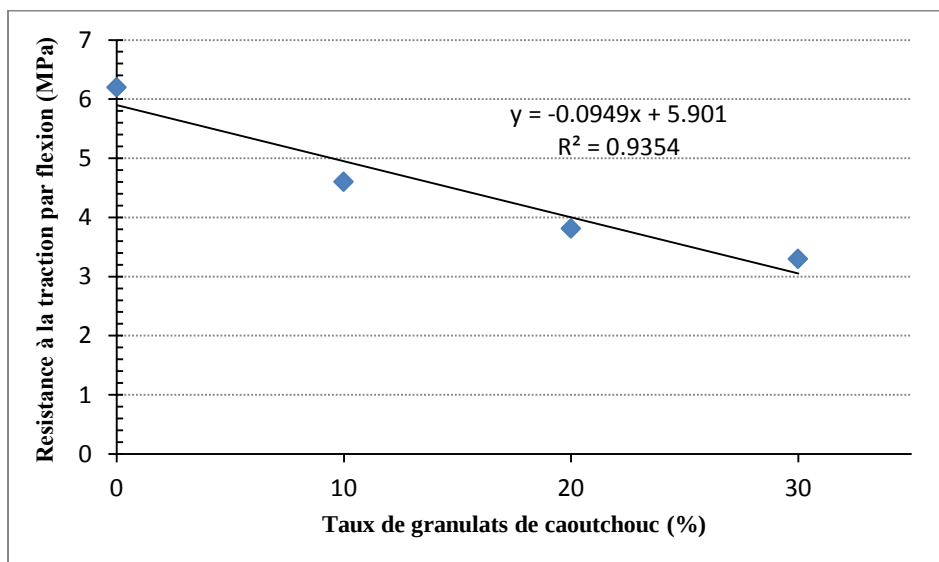


Figure III. 7 Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la résistance à la traction par flexion à 28 jours.

On remarque que la résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du dosage de granulats de caoutchouc (Figure III.7). Ce même comportement est observé dans la compression et qui est justifié par le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire (Li, G et al., 2004).

Tableau III.2. Le rapport R_{C28}/R_{t28}

Formulation(%)	R_{C28}	R_{t28}	R_{C28}/R_{t28}
M 0%GC	45,31	6,21	7,29
M 10%GC	35,12	4,68	7,50
M 20%GC	24,43	3,98	6,14
M 30%GC	17,43	3,51	4,96

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

En moyenne le rapport $R_{c28}/R_{t28} = 6,47$

On rappelle que le rapport R_{c28}/R_{t28} pour les mortiers et les bétons est de l'ordre de 10.

D'où le résultat obtenue (6,47) est bonne.

III.3.6 Vitesse de propagation des ultrasons

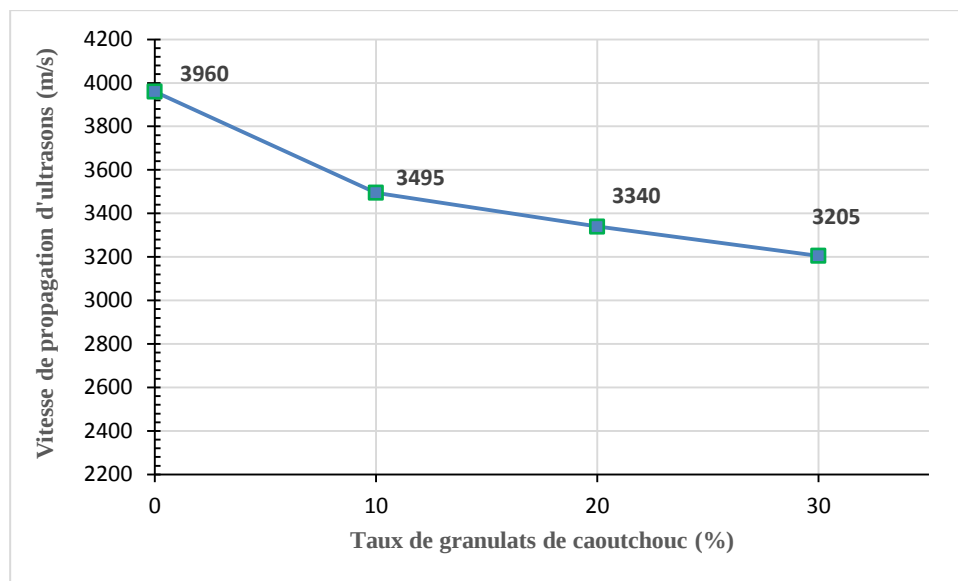


Figure III. 8. Vitesse de propagation d'ultrasons des mortiers.

La vitesse moyenne de 3 mesures des ultrasons sur les éprouvettes à base de granulats de caoutchouc est en nette diminution (Figure 3.8). Elle est de l'ordre de 3495 m/s pour le taux de GC de 10%, de l'ordre de 3340 m/s pour le taux de GC de 20% et 3205 m/s pour le taux de 30%. Cette diminution est due aux difficultés de compactage des mélanges contenant un volume plus élevé de granulats de caoutchouc qui engendre une porosité plus élevée, ce phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice (Topçu et al. 2010). Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc présente des capacités d'atténuation d'ondes ultrasonores (Naceri et al. 2009, Pedro et al. 2013).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail expérimental sur les mortiers cimentaires avec les granulats de caoutchouc, nous a permis de trier les enseignements suivants :

- L'adjonction de granulats de caoutchouc dans des mortiers 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. Cette même conclusion est tirée par de nombreux chercheurs (Gargouri et al. 2011 , Sukontasukkul et al. 2006).
- Une diminution de la masse volumique à l'état frais est observé avec l'augmentation de taux de granulats de caoutchouc. Cette réduction peut s'expliquer par la faible masse volumique des poudrettes de caoutchouc utilisés ($M_v=940 \text{ kg/m}^3$) par rapport à celle du sable remplacé ($M_v=2640 \text{ kg/m}^3$).
- La masse volumique sèche diminue avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc. Cette réduction est due La nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, responsable du piégeage des bulles d'air, participe à l'allègement des composites des granulats de caoutchouc (Hernandez-Olivares et al.,2004 , Siddique et al .,2004).
- On peut observer que l'absorption d'eau par immersion totale augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Ce résultat pourrait être lié aux pores générés par les granulats de caoutchouc en raison de leurs natures non polaires et de leur tendance à piéger l'air en surface. L'air piégé dans le mortier contenant des GC rend le mortier plus poreux, devenant ainsi plus perméable et permettant une absorption accrue d'eau (Adamu et al., 2014).
- On remarque une augmentation de l'eau absorbée est observée lorsque le taux de substitution des granulats de caoutchouc est augmenté. On peut expliquer cette augmentation par : la faible adhérence entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment, l'apparition des fissures et l'augmentation de l'air occlus dans le mélange, favorisent l'absorption d'eau et rendent le mélange caoutchouté plus sensible aux infiltrations d'eau comparativement avec les mélanges témoins sans caoutchouc (Doodoo-Arhin, D et al., 2015).

- On peut conclure que les granulats de caoutchouc font chuter la résistance à la compression (R_{c28}) des mortiers étudiés. On peut expliquer cette chute par : Le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire (Li, G et al., 2004., Silvestravičiūtė, I et al., 2002). L'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc (Benazzouk, A et al., 2007).
- On remarque que la résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du dosage de granulats de caoutchouc. Ce même comportement est observé dans la compression et qui est justifié par le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire (Li, G et al., 2004).
- La vitesse moyenne de 3 mesures des ultrasons sur les éprouvettes à base de granulats de caoutchouc est en nette diminution. Cette diminution est due aux difficultés de compactage des mélanges contenant un volume plus élevé de granulats de caoutchouc qui engendre une porosité plus élevée, ce phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice (Topçu et al. 2010).

Perspective

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier l'effet de l'optimisation du pourcentage de caoutchouc, du dosage du ciment, de l'utilisation d'adjuvants, des méthodes de prétraitement des particules de caoutchouc sur les caractéristiques mécaniques du mortier.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Fadiel, A., Al Rifaie, F., Abu-Lebdeh, T., Fini, E. Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014, 7(1): 1 -11.
- Eiras, J.N., Segovia, F., Borrachero, M.V., Monzó, J., Bonilla, M., Payá, J. Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires. *Materials and Design*. 2014, 59: 550-557.
- Bharani Raj, J., Ganesan, N., Shashikala, A.P. Engineering properties of self-compacting rubberized concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011, 30(23): 1923-1930.
- Garros, M. Composites cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Thèse de doctorat. Université Paul Sabathier-Toulouse. France. 12 juin 2007.
- Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A.P. Strength and durability studies of self-compacting rubberized concrete . *The Indian Concrete Journal*. 2012, 15-24.
- Aziz, F.N.A.A., Bida, S.M., Nasir, N.A.M., Jaafar, M.S. Mechanical properties of lightweight mortar modified with oil palm fruit fibre and tire crumb. *Construction and Building Materials*. 2014, 73: 544-550.
- Kaloush, K., Way, G., Zhu, H. Properties of crumb rubber concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005, 1914: 8-14.
- Siddique, R., Naik, T.R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview. *Waste Management*. 2004, 24(6): 563-569.
- Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(1): 109-117.
- Bendjillali, K., Makhoulfi, Z. Etude de l'effet de la nature des granulats sur le comportement mécanique du béton en zones chaudes et arides « Contribution de la cure ». 2ème Séminaire International d'innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, Rabat, 23 et 24 Mai 2011, 06 pages.
- NF EN 12390-7. Essai pour béton durci, Partie 7: masse Volumique du béton. Avril 2012.
- NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: détermination des résistances

- mécaniques Indice de classement. Avril 2006.
- NF EN 480-5. Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis - Méthodes d'Essai -Partie5: détermination de l'Absorption Capillaire. Janvier 2006.
- NF EN 12390-3. Essai pour béton durci, Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes. Avril 2012.
- Benabed, B., Azzouz, L. et Damene, Z. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de sable de dune. Colloque CMEDIMAT, Oran, 06 et 07 Décembre 2005, 08 pages.
- Brian, J.O., Mutuku, R.N., Kabubo, C.K. Mechanical characteristics of normal concrete partially replaced with crushed clay bricks. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*. 2015, 6(1):62-75.
- Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B. Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(12): 2283-2289.
- Li, Z., Li, F., Li, J. Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. *Magazine of Concrete Research*. 1998, 50(4): 297-304.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezzeb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M. Physicmechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites*. 2007, 29(10): 732-740.
- Kumutha, R., Vijai, K. Strength of concrete incorporating aggregates recycled from demolition waste. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010, 5(5): 64-71.
- Cabrera, F., Gomez, J., Almaral, J., Arredondo, S., Corral, R. Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement. *Journal of construction*. 2015, 14(3): 22-29.
- Rana, J., Rughooputh, R. Partial replacement of fine aggregates by rubber in concrete. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*. 2014,5(5):312-317.
- Pedro, D., De Brito, J., Veiga, R. Mortars made with fine granulate from shredded tires. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*. 2013, 25(4): 519-529.
- Sukontasukkul, P., Tiamlom, K. Expansion under water and drying shrinkage of rubberized

- concrete mixed with crumb rubber with different size. *Construction and Building Materials*. 2012, 29: 520-526.
- Cao, W. Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*. 2007, 21: 1011-1015.
- Topçu, I.B. The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995, 25(2): 304-310.
- Naceri, A., Hamina, M.C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*. 2009, 29(8): 2378-2384.