

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

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

En : Génie Civil

Spécialité : Matériau de Génie Civil

Par : BENZIANE Khireddine

Sujet

Effet de l'eau magnétisée sur la compatibilité chimique d'un mélange cimentaire incluant les déchets de caoutchouc

Soutenu publiquement, le 11/ 06 / 2025, devant le jury composé de :

M. BECHICHE Said	MCA	Univ-BBA	Président
M. DEBOUCHA Sadek	MCA	Univ-BBA	Examineur
M. ZIANI Hocine	MCA	Univ-BBA	Examineur
M. GUELMINE Layachi	MCA	Univ-BBA	Encadrant
M. MERABTI Salem	MCA	Univ-Khemis- Miliana	Co-Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

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

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

Nous remercions aussi notre Co-encadreur Mr MERABTI Salem.

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

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

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

ملخص :

تُظهر الدراسة أن استخدام الماء الممغنط في تصنيع المواد المونة التي تحتوي على جزيئات مطاط معاد تدويره يُظهر إمكانات كبيرة لتحسين خصائصها. يعزز مغنطة الماء عملية ترطيب الأسمنت بشكل أكثر فعالية، مما يؤدي إلى زيادة القوام، والمقاومات الميكانيكية (الشد، والانشاء، والضغط)، وتحسين تجانس الخليط. تعتبر هذه التحسينات مهمة بشكل خاص في المواد التي تحتوي على المطاط، حيث عادةً ما يكون الالتصاق بين المطاط والمصفوفة الأسمنتية تحدياً. على الرغم من انخفاض الأداء الميكانيكي المرتبط بإضافة المطاط، تُعد المغنطة حلاً مبتكراً لتعزيز التفاعل بين المطاط والأسمنت، مما يفتح المجال لاستخدام أوسع لهذه المواد في التطبيقات الهيكلية أو شبه الهيكلية.

الكلمات المفتاحية : نفايات مطاط الإطارات المعاد تدويرها -تكنولوجيا مغناطيسية- مواد تعتمد على الأسمنت- ماء ممغنط -التناسق- مقاومة الانضغاط

Abstract:

The study demonstrates that the use of magnetized water in the manufacture of mortars incorporating recycled rubber particles shows significant potential for improving their properties. Magnetizing the water promotes more effective cement hydration, resulting in increased consistency, mechanical strengths (tensile, flexural, compressive), and better homogeneity of the mixture. These improvements are particularly important in materials containing rubber, where adhesion between the rubber and the cement matrix is usually a challenge. Despite the reduction in mechanical performance associated with rubber incorporation, magnetization provides an innovative solution to enhance the interaction between rubber and cement, paving the way for wider use of these materials in structural or semi-structural applications.

Keys words: recycled rubber tires, Magnetic technology; Cement materials; magnetized water; consistency; compressive strength.

Résumé :

L'étude démontre que l'utilisation d'eau magnétisée dans la fabrication de mortiers incorporant des particules de caoutchouc recyclé présente un potentiel significatif pour améliorer leurs propriétés. La magnétisation de l'eau favorise une hydratation plus efficace du ciment, ce qui se traduit par une augmentation de la consistance, des résistances mécaniques (traction, flexion, compression) et une meilleure homogénéité du mélange. Ces améliorations sont particulièrement importantes dans les matériaux contenant du caoutchouc, dont l'adhérence à la matrice cimentaire est habituellement un défi. Malgré la diminution des performances mécaniques liée à l'incorporation de caoutchouc, la magnétisation constitue une solution

innovante pour renforcer l'interaction entre le caoutchouc et le ciment, ouvrant la voie à une utilisation plus large de ces matériaux dans des applications structurales ou semi-structurales.

Mots clés : déchets de caoutchouc des pneus recyclés ; traitement magnétique ; matériaux cimentaires ; l'eau magnétisée ; la consistance ; la résistance en compression.

SOMMAIRE DE MEMOIRE :

ملخص

Résumé

Abstract

Sommaire

La liste des tableaux

La liste des Figures

Introduction Générale 1

**Chapitre I: Etat de l'Art sur impact de l'eau magnétisée sur les matériaux
cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc..... 2**

I.1. Introduction 2

I.2. Les déchets pneus en Algérie..... 3

I.2.1 Estimation des déchets pneumatiques en Algérie 3

I.2.2 l'impact des déchets pneus sur la nature 4

I.2.3 Les composants d'un pneu 4

I.2.4 Valorisation des pneus usagés.....5

I.3. Mortiers de ciment et leurs constituants.....6

I.3.1 Définition et rôles d'un mortier de ciment6

I.3.2 Différents types de mortier.....7

I.3.2.1 Mortiers de maçonnerie.....7

A. Mortiers de ciment.....7

B. Mortier de chaux7

C. Mortier bâtards.....7

I.3.2.2 Mortiers spéciaux 7

I.3.2.3 Mortiers de réparation 7

I.3.3 Principaux constituants du mortier de ciment.....7

I.3.3.1 Le sable:	8
I.3.3.2 Le ciment:.....	8
I.3.3.3 L'eau de gâchage.....	9
I.3.3.4 Propriétés essentielles d'un mortier de ciment:.....	10
L'ouvrabilité et la maniabilité	10
La résistance mécanique	10
I.3.3.5 Réaction d'hydratation:	11
I.3.3.6 Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement)	11
I.4. Effet des déchets de caoutchouc des pneus sur la performance des matériaux cimentaires	12
I.4.1 Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton	12
I.4.2 Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C	15
I.4.2.1 Résistance en compression.....	15
I.4.2.2 L'absorption d'eau	16
I.4.2.3 Comportement au Feu	17
I.5 La technologie de magnétisation de l'eau.....	19
I.5.1 Définition	19
I.5.2 Les Principes de la technologie de magnétisation	20
Alignement des molécules d'eau	20
Modification du comportement des minéraux	21
Amélioration de l'activité biologique.....	21
Réduction de la dureté de l'eau	21
I.5.3 Les avantages de la magnétisation de l'eau sur les propriétés des matériaux cimentaires.....	21
Temps de prise réduit du béton	21

Amélioration de la maniabilité.....	21
Augmentation de la résistance à la compression.....	22
Réduction des fissures et du retrait	22
Durabilité environnementale	22
Économies de coûts.....	22
I.6 Effet de l'eau magnétisée sur la performance des matériaux cimentaires	23
I.6.1 Impact de l'eau magnétisée EM sur les propriétés fraîches	23
I.6.2 Impact de l'eau magnétisée EM sur la résistance mécanique.....	23
I.6.3 Temps de prise	24
I.6.4 La masse volumique apparente.....	24
I.6.5 L'attaque par l'acide sulfurique	24
Chapitre II Matériaux et Méthodes Expérimentales	26
II.1 Introduction.....	26
II.2 Caractérisation des matières premières.....	26
II.2.1 Essai sur les granulats utilisée.....	26
II.2.1.1 Analyse granulométrique : NFP.18-560[21].....	26
Module de finesse.....	27
II.2.1.2 Equivalent de sable : NFB.18-598[21]	28
II.2.1.3 Masse volumique apparente et absolue.....	29
II.2.2 Essai sur le ciment	30
II.2.2.1 Surface spécifique	30
II.2.2.2 Masse volumique apparente.....	31
II.2.3 L'eau de gâchage	32
II.2.4 Préparation de l'eau magnétisée	32
II.3. Etude du mortier frais:	33
II.3.1 Préparation des mortiers étudiés	33
II.4. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais.....	36

II.4.1. L'ouvrabilité.....	36
II.4.1.1 Mode opératoire	36
II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci.....	37
II.5.1. Propriétés physiques	37
II.5.1.1 Masse volumique apparente.....	37
II.6 Propriétés Mécaniques	38
II.6.1 Résistance à la flexion : norme EN196-[21].....	38
II.6.2 Résistance à la compression : norme EN196-[21].....	39
Chapitre III : Résultats et discussions	41
III.1. Introduction.....	41
III.2. Caractérisation des matières premières	41
III.2.1. Les granulats utilisés	41
III.2.1.1 Analyse granulométrique	43
III.2.2. Ciment	43
III.3. Etude des propriétés des mortiers étudiés :	44
III.3.1. Consistance.....	44
III.3.2. La masse volumique apparente.....	45
III.3.3. La résistance en traction par flexion.....	47
III.3.4. La résistance en compression	49
III.4 Conclusion.....	51
Conclusions et perspectives	53
Références bibliographiques :	55.59

LA LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1.1 : Répartition du parc automobile en Algérie	3
Tableau I.2: Différentes matières contenues dans le pneu [2]	5
Tableau.I.3. Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.....	8
Tableau.I.4: Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe	9
Tableau II.1 : Opération de malaxage des mortiers	34
Tableau II.2 : Composition des mortiers préparés	35
Tableau III.1 : propriétés physiques essentielles des granulats utilisés	41
Tableau III.2 : Composition chimique moyenne du sable utilisé	42
Tableau III.3 : Propriétés physicomécaniques de ciment utilisé.....	43
Tableau III.4 : Composition chimique moyenne du ciment utilisé.....	44

LA LISTE DES FIGURES :

Figure.I.1: Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés	4
Figure I.2: Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés (Antoine, 2002)	6
Figure.I.3: La structure de la pâte de ciment selon le modèle de Feldeman et Serada[7]	12
Figure I.4 : Influence de G.C. sur l'affaissement [16]	13
Figure I.5 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GCR[16].....	14
Figure I.6 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [17].....	15
Figure.I.7: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [18]	16
Figure I.8 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C[19]	17
Figure.I.9: la montée en température du four et des mortiers étudiés pour différents taux des granulats de caoutchouc recyclés [21]	18
Figure.I.10: Vue des demi-spécimens exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement à la ambiants (20°C) et à la température 400°C [21]	18
Figure.I.11. Evolution de la porosité ouverte relative des mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage [100].....	19
Figure.I.12. Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression relative de cette étude et ceux de DTU [21]	19
Figure II.1 : Analyse granulométrique	27
Figure II.2 : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés	28
Figure II.3 : Essai d'équivalent de sable	29
Figure II.4 : Masse volumique apparente	30
Figure II.5 : Procédure de magnétisation de l'eau de gâchage.....	33
Figure II.6 : malaxeur normalisé EN 196-1	34
Figure II.7 : Granulats de Caoutchouc utilisés	35
Figure II.8 : Essai d'ouvrabilité	36
Figure II.9 : table d'étalement	37
Figure II.10 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion	39
Figure II.11 : Dispositif expérimental de l'essai de flexion	39

Figure II.12 : Dispositif de l'essai de rupture en compression	36
Figure III.1 : Les granulats de GCR sable utilisés	42
Figure III.2 : Analyse granulométrique des utilisé.....	43
Figure III.3 : L'effet de l'eau magnétisée et les GCR sur l'affaissement des mortiers étudiés. 45	
Figure III.4 L'influence du l'eau magnétisée et les GCR sur la masse volumique des mortiers étudiés.....	47
Figure III.5 : L'effet de l'eau magnétisée sur la résistance en traction par flexion.....	49
Figure III.6 : L'effet de l'eau magnétisée et les GCR sur la résistance en compression	50

Introduction Générale :

Le secteur de la construction est confronté à des enjeux majeurs liés à la durabilité, à la gestion des déchets et à l'amélioration des performances des matériaux. Parmi ces défis, l'incorporation de granulats de caoutchouc issus du recyclage des pneus usagés dans les mortiers de ciment constitue une solution prometteuse pour valoriser ces déchets tout en allégeant la masse des matériaux. Cependant, cette pratique engendre souvent une diminution des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression, en raison de l'adhérence insuffisante entre le caoutchouc et la matrice cimentaire. Par ailleurs, des techniques innovantes telles que la magnétisation de l'eau ont été explorées pour améliorer l'hydratation du ciment et renforcer la cohésion des composants. L'effet de la magnétisation de l'eau sur le comportement des mortiers de ciment incorporant des granulats de caoutchouc représente ainsi une voie d'étude captivante, alliant respect de l'environnement et performance technique. Cette recherche vise à approfondir la compréhension des mécanismes par lesquels cette méthode peut optimiser la microstructure et les propriétés mécaniques de ces matériaux composites, contribuant ainsi à une construction plus durable et innovante.

L'objectif de cette étude est l'évaluation de l'effet de l'eau magnétisée sur le comportement des matériaux cimentaires incorporant les déchets de caoutchouc des pneus usagés. Le matériau qui sera préparé est un matériau à base de ciment, contenant différentes fractions de granulats issus du broyage de déchets de caoutchouc. Pour atteindre cet objectif, des matériaux de types "mortier de ciment" seront élaborés, en substituant différentes fractions minérales par des particules de caoutchouc. Il s'agira d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les propriétés du matériau aux états frais et durci, notamment les effets de la magnétisation sur le comportement physique et mécanique des mortiers de caoutchouc.

Chapitre I : Etat de l'Art sur impact de l'eau magnétisée sur les matériaux cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc

I.1. Introduction

L'essor de la prise en compte de l'impact environnemental des constructions et plus généralement des politiques de développement durable a conduit à s'interroger sur les procédés et les matériaux de construction alternatifs. Le secteur de la construction, et en particulier celui basé sur l'utilisation de matériaux cimentaires n'échappera pas à cette évolution ; Il faudra limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles, penser à la déconstruction avec l'analyse du cycle de vie, tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux conventionnels. Dans ce contexte, de nouveaux matériaux innovants "composites" vont devoir, à terme, remplacer les matériaux usuels. En accord avec les principes du développement durable, les acteurs du bâtiment manifestent un intérêt croissant pour les co-produits et les déchets issus du secteur industriel. C'est en particulier le cas pour les déchets de caoutchouc, notamment les pneus usagés, qui peuvent, à court terme, remplacer certaines additions généralement utilisés comme renfort dans le béton. L'utilisation de ces déchets dans le domaine de la construction est une alternative qui présente un double objectif : répondre à la demande sociétale d'un plus grand respect de notre environnement et apporter une valeur ajoutée à certains co-produits ou déchets tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde industriel [1,2].

En Algérie, l'accumulation des déchets de pneus, hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. En effet, l'exploitation des véhicules industriels, de différentes catégories, génère des quantités importantes de déchets de pneus qui ne bénéficient d'aucune action de valorisation. Ils sont très souvent entreposés dans des décharges non-contrôlées, polluant de l'environnement, au travers leur incinération à l'air libre ou encore, leur enfouissement [1]. En Europe, ces

modes de réduction des déchets sont totalement décriés et la réglementation actuelle impose la mise en place de filières de valorisation dans différents domaines. C'est dans ce contexte que se déroulera cette étude, qui consiste à examiner les possibilités du recyclage des déchets de pneus en Algérie, notamment leur utilisation dans le domaine des matériaux de construction [2,3].

1.2. Les déchets pneus en Algérie

1.2.1. Estimation des déchets pneumatiques en Algérie

Sur la base des statistiques de l'Office National des Statistiques (ONS) concernant la répartition du parc automobile par genre de véhicules au 31/12/2009 ainsi que les immatriculations des véhicules automobiles durant le premier semestre 2010, nous avons calculé le nombre de véhicules en circulation au premier semestre 2010 par genre. Le parc automobile national algérien compte **4 171 827 véhicules** qui se répartissent en 62,162 % de véhicules de tourisme, 8,683 % en camions et 19,694% en camionnettes. Les autocars et autobus représentent 1,679 % du parc. Les tracteurs routiers 1,520 %, les tracteurs agricoles 3,136 %, les remorques 2,779 %, les motos 0,263 % et les véhicules spéciaux 0,080% (Tableau1.1)[1,2] :

Tableau 1.1 : Répartition du parc automobile en Algérie

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

I.2.2. l'impact des déchets pneus sur la nature :

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en presque totalité ou en partie comme se le produit de l'action humaine, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Les déchets menacent non seulement les paysages, mais aussi polluent les ressources naturelles (air, sol, eau). De plus, ils exposent les humains à des nuisances et dangers, dont certains peuvent être très graves et particulièrement les déchets spéciaux qu'ils présentent des caractères de danger (inflammables, toxiques, irritantes,...)[1,2]. De plus, les combustions des déchets dans des décharges non contrôlées à l'air libre contribuent fortement à la dégradation de la quantité de l'air et participent à l'apparition des maladies respiratoires. « L'enquête nationale de santé publique (1990) révèle que les maladies respiratoires occupent la première place des causes de morbidité ressentie (35%) et des motifs de consultation (27,2%) et que parmi les maladies chroniques identifiées, elles occupent le deuxième rang ». Aujourd'hui, le nombre d'asthmatique en Algérie semble atteindre le nombre de 2 millions. La répartition des cas, selon les régions, se présente comme suit : « 38% en région centre, 31% en région est, 22% en région ouest et 9% en région sud » cette répartition est variée en fonction du taux de pollution atmosphérique qu'est en relation avec l'urbanisation et l'industrialisation des régions [4].



Figure.I.1. Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés.

I.2.3. Les composants d'un pneu

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

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

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

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

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

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

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

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

I.2.4. Valorisation des pneus usagés

Le pneu usagé, qui a complété un cycle de vie, réorienté ensuite vers l'industrie du rechapage ou de la vente de pneus d'occasions. Quant au pneu hors usage, il est inapte à reprendre la route qui doit être éliminé (figure.I.2). Toutefois, dans la littérature, les pneus usagés désignent les pneus usagés réutilisables et les pneus hors usage sont les pneus usagés non réutilisables. Dans notre vocabulaire, les pneus usagés sont les pneus usagés non réutilisables ou encore les pneus hors usage. Les pneus usagés sont utilisés sous

différentes formes dans les applications industrielles telles que les infrastructures routières, le remplissage d'aire de jeux, le domaine du génie civil et de nombreux autres produits. La solution économique le plus fiable, qui permet d'éliminer complètement ces déchets, la valorisation. Il existe plusieurs voies de valorisation des pneus usagés qui sont pratiquées parmi lesquels: la valorisation énergétique et la valorisation matière [2,5].

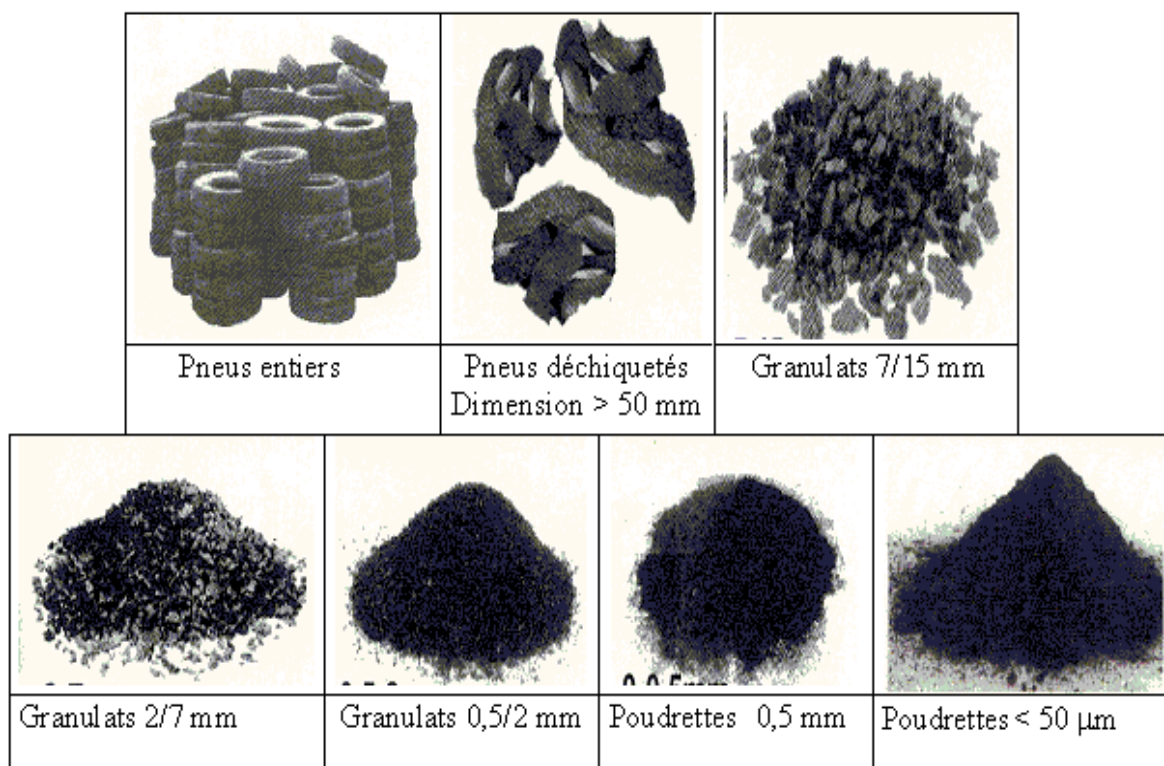


Figure I.2 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés (Antoine, 2002).

I.3. Mortiers de ciment et leurs constituants :

I.3.1 Définition et rôles d'un mortier de ciment :

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

I.3.2 Différents types de mortier :

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

I.3.2.1 Mortiers de maçonnerie :

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

A. Mortiers de ciment :

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

B. Mortier de chaux :

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

C. Mortier bâtards :

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

I.3.2.2 Mortiers spéciaux :

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

I.3.2.3 Mortiers de réparation :

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

I.3.3 Principaux constituants du mortier de ciment:

I.3.3.1 Le sable:

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

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

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

- Les sables naturels : Ils sont utilisés en construction des différents projets de construction et prélevés soit dans les alluvions des rivières ou des fleuves (sable roulé), soit sur les plages ou les dunes naturelles.
- Les sables artificiels : Sont soit du sable de concassage ou du sable roulés provenant de la production des matériaux concassés.

I.3.3.2 Le ciment:

C'est un liant hydraulique artificiel fabriqué essentiellement à partir d'un mélange de calcaires(environ 75%), d'alumine et de silice qui se trouvent dans l'argile (environ 25%).Le procédé de fabrication du ciment consiste essentiellement à broyer des matières premières, a les mélanger dans certaines proportions puis à les cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C, température à laquelle le matériau fond partiellement jusqu'à former des nodules connus sous le nom de clinker. Le clinker refroidi puis broyé en poudre fine, opération de laquelle on ajoute un pourcentage de gypse (de 3 à 5% de masse de clinker) et un pourcentage d'ajouts inertes ou actifs (laitier, pouzzolane, cendre, calcaire,...) pour obtenir le ciment désiré selon le type d'ouvrage réalisé [1, 4].Les ciments sont alors classés en fonction de leur composition en cinq types principaux selon la norme NFP15-301 (voir tableau I.3). Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [9].

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

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

En fonction de la résistance normale à 28 jours, trois classes principales de ciment sont définies et des sous-classes "R" associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées [9]. Ces classes sont notées 32.5, 42.5 et 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau (I.4).

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

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

I.3.3.3 L'eau de gâchage :

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

I.3.3.4. Propriétés essentielles d'un mortier de ciment:

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

➤ **L'ouvrabilité et la maniabilité:**

Une pâte de mortier peut avoir, suivant les composants, des consistances différentes, depuis l'état sec jusqu'à l'état fluide. Les mortiers de maçonnerie, des travaux de finissage des bâtiments et autres doivent être suffisamment maniable.

L'ouvrabilité de la pâte de mortier détermine la maniabilité, c'est-à-dire le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie, sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérente à la surface de base [7].

➤ **La résistance mécanique :**

La résistance d'un mortier au cours du durcissement dépend de l'activité du liant et du rapport E/C. Elle dépend aussi de la quantité de ciment et du sable employé.

D'autre part, la résistance du mortier est fonction de la résistance des produits de gel (silice de calcium hydraté S-C-H). Cependant, la source réelle de la résistance du mortier n'est pas entièrement maîtrisée [7, 8, 9,10] , mais dépend probablement de deux types de liaisons homogènes:

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

I.3.3.5. Réaction d'hydratation:

On entend par hydratation du ciment toutes les réactions qui se développent entre le ciment et l'eau. En d'autres termes, les silicates et aluminates en présence d'eau forment des produits d'hydratations (gel) qui donnent avec le temps une masse ferme et dure (la pâte de ciment hydratée). Le Chatelier était le premier qui a remarqué que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement les mêmes que les produits d'hydratation des composés seuls, dans des conditions similaires. Cela a été confirmé plus tard par H.H. Steneinour [10, 11]. Dû au fait que les produits d'hydratation du ciment ont une très faible solubilité dans l'eau; quel que soit le mode de précipitation des produits d'hydratation, la vitesse de cette hydratation décroît continuellement, si bien que, même longtemps après, il reste une quantité appréciable de ciment non hydraté. Par exemple, après 28 jours de contact avec l'eau, T.C. Powers [12] a constaté que les grains de ciment se sont hydratés jusqu'à une profondeur de $4\mu\text{m}$ seulement et de $8\mu\text{m}$ après une année. Il a montré que l'hydratation totale dans des conditions normales n'est possible que pour les particules de ciment inférieur à $50\mu\text{m}$, par contre, l'hydratation complète a été obtenue par broyage continu du ciment dans l'eau pendant cinq jours.

I.3.3.6. Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement):

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue ; pour les ciments à durcissement rapide, on obtient après quelques jours la quasi-totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois [7,9]. La plupart des propriétés mécaniques de la pâte de ciment durcie semblent dépendre non pas de la composition chimique du ciment hydraté mais aussi de la structure poreuse des produits d'hydratation (gel) vus au niveau des dimensions colloïdales. Il est donc important d'avoir une bonne illustration des propriétés physiques de la structure du gel de ciment. La pâte de ciment fraîche est un réseau plastique de particules de ciment dans l'eau, mais, une fois que la pâte a fait prise, son volume apparent ou brut demeure approximativement constant.

A n'importe quel stade de l'hydratation, la pâte durcie est constituée d'hydrates très mal cristallisés des différents composés considérés collectivement comme un gel, de cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de quelques composants mineurs, de ciment non hydraté et le reste d'espaces vides remplis d'eau dans la pâte fraîche. Ces vides sont appelés pores capillaires, mais, à l'intérieur même du gel, il existe des vides interstitiels, appelés pores de gel. La structure

de la pâte du ciment a été représentée schématiquement sur la figure (I.3) par Powers T.C [12]. La surface de la phase solide augmente considérablement pendant l'hydratation et une grande quantité d'eau libre se trouve adsorbée sur cette surface. Si aucun mouvement d'eau vers ou à partir de la pâte de ciment ne peut se faire, les réactions d'hydratation consomment presque la totalité de l'eau n'en laissant qu'une trop petite quantité pour saturer les surfaces solides, provoquant ainsi la diminution de l'humidité relative à l'intérieur de la pâte, ce que l'on appelle l'auto dessiccation. Etant donné que le gel ne peut se former que dans un espace rempli d'eau cette opération continue jusqu'à la fin du processus de durcissement [7, 13-15].

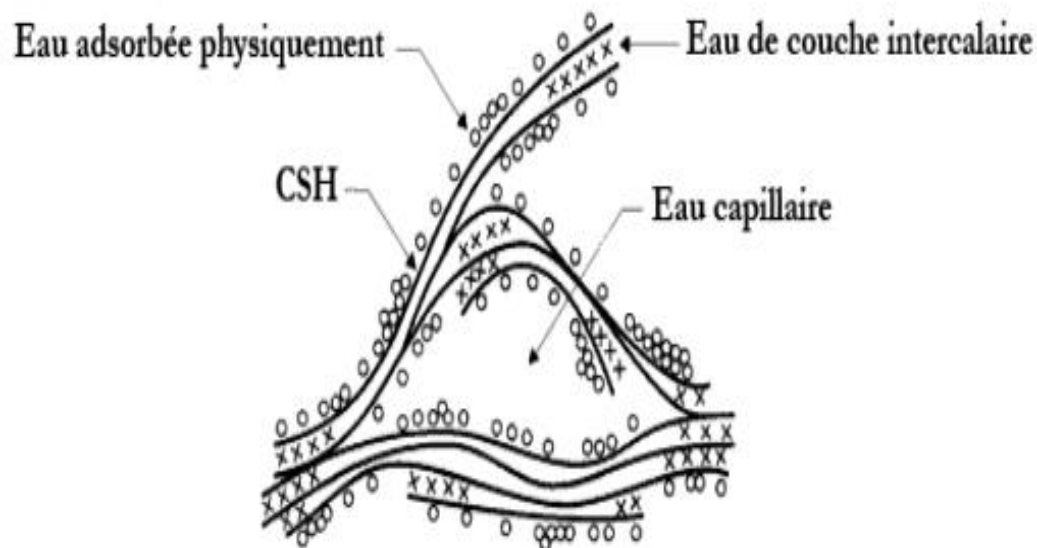


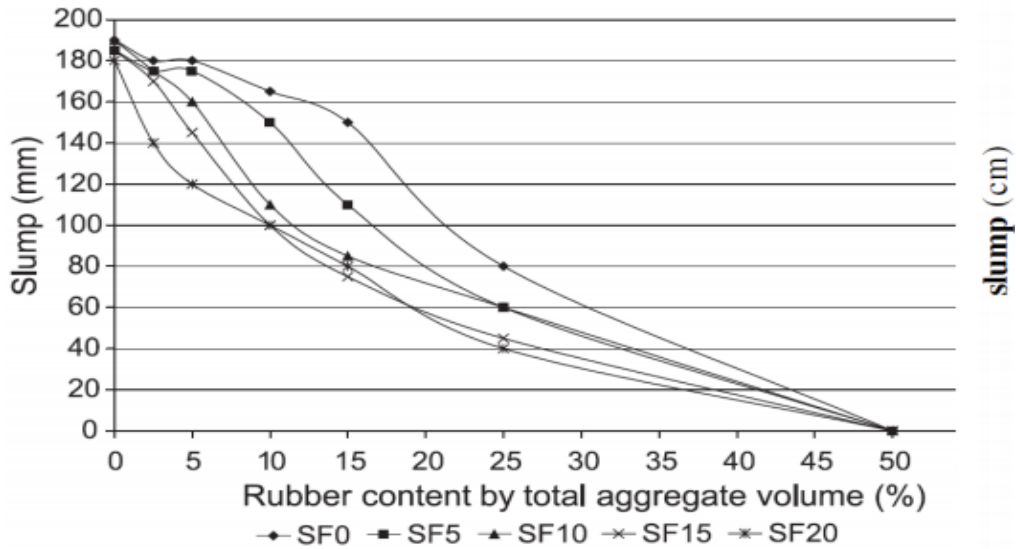
Figure.I.3 : La structure de la pâte de ciment selon le modèle de Feldeman et Serada[7].

I.4. Effet des déchets de caoutchouc des pneus sur la performance des matériaux cimentaires :

I.4.1. Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant. Güneyisi et al. [16] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont de 0% à 20% de la masse du ciment est remplacée par la

masse de fumée de silice (SF). La Figure I.4 illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en G.C. et du dosage X% de la fumée de silice SF. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.



(a)

Figure I.4 : Influence de G.C. sur l'affaissement [16].

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Comme le montre la Figure I.5, Güneyisi et al. [16] ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence (la légende étant celle utilisée précédemment à la Figure I.5

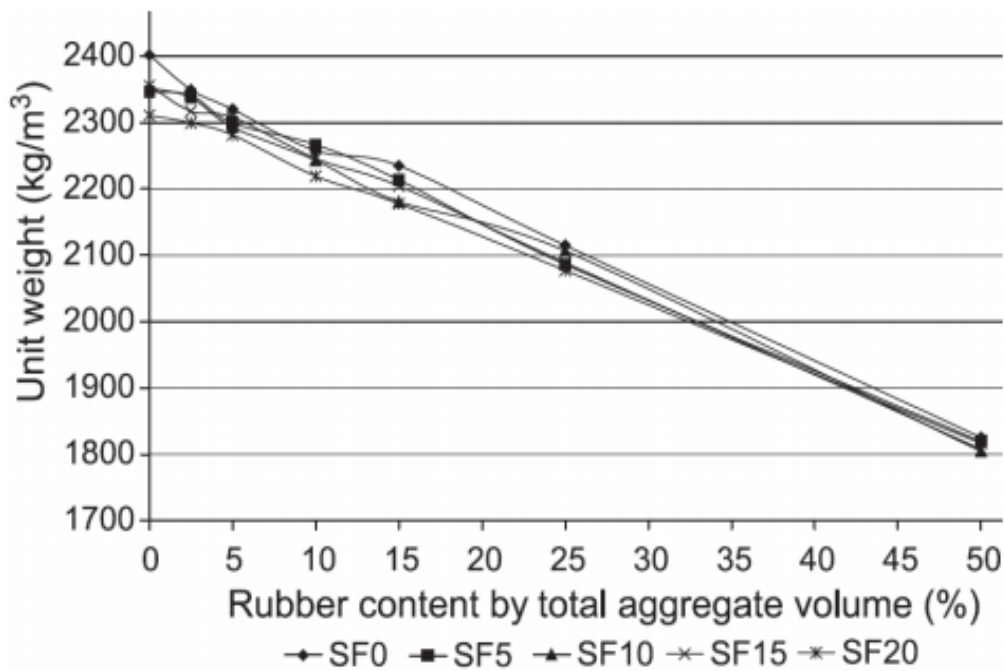


Figure I.5 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GCR

Concernant la teneur en air occlus, beaucoup des chercheurs [17-20] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure I.6 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des G.C. fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C. Ces chercheurs pensent que la surface rugueuse des particules de caoutchouc sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des G.C.

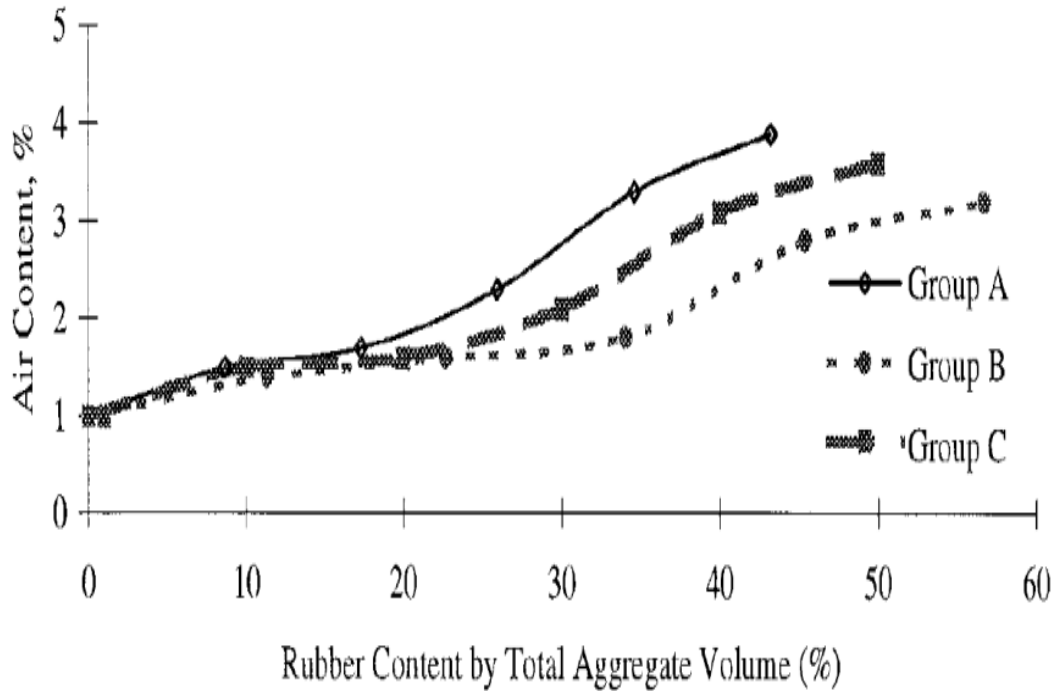


Figure I.6 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [17].

I.4.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C.

I.4.2.1. Résistance en compression

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

L'examen des résultats obtenus par Garros [18] lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des G.C. sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la Figure I.7 ont confirmé que la présence de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les

composites les plus dosés en G.C. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

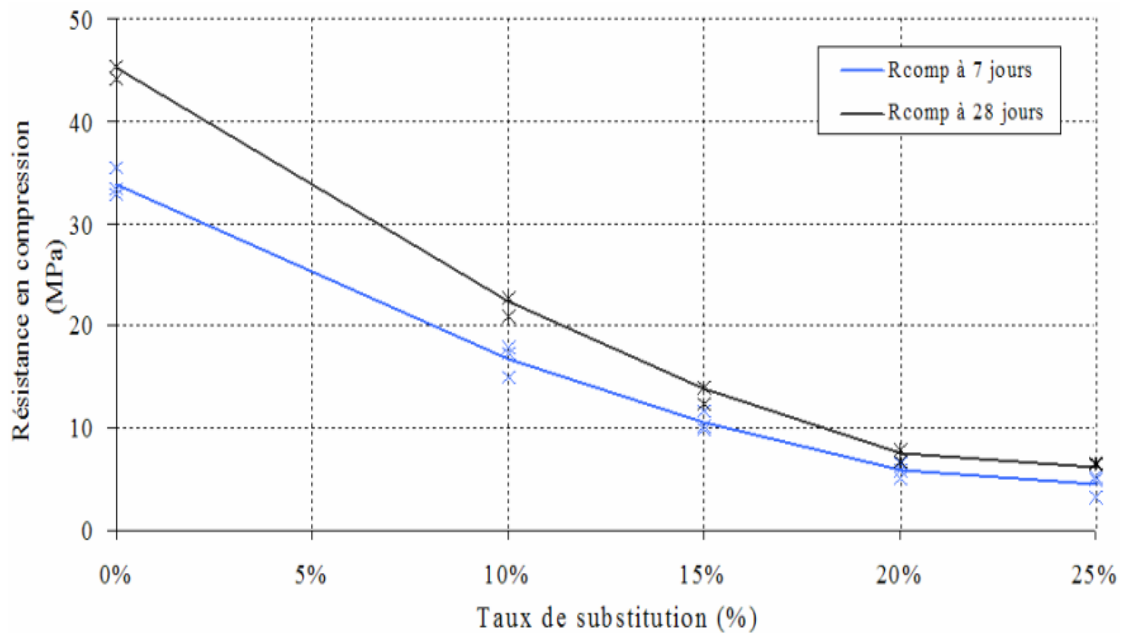


Figure.I.7: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [18].

I.4.2.2. L'absorption d'eau

S'agissant de l'absorption d'eau, les résultats de Benazzouk et al. [20] ont montré que la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C., ce comportement est expliqué par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire.

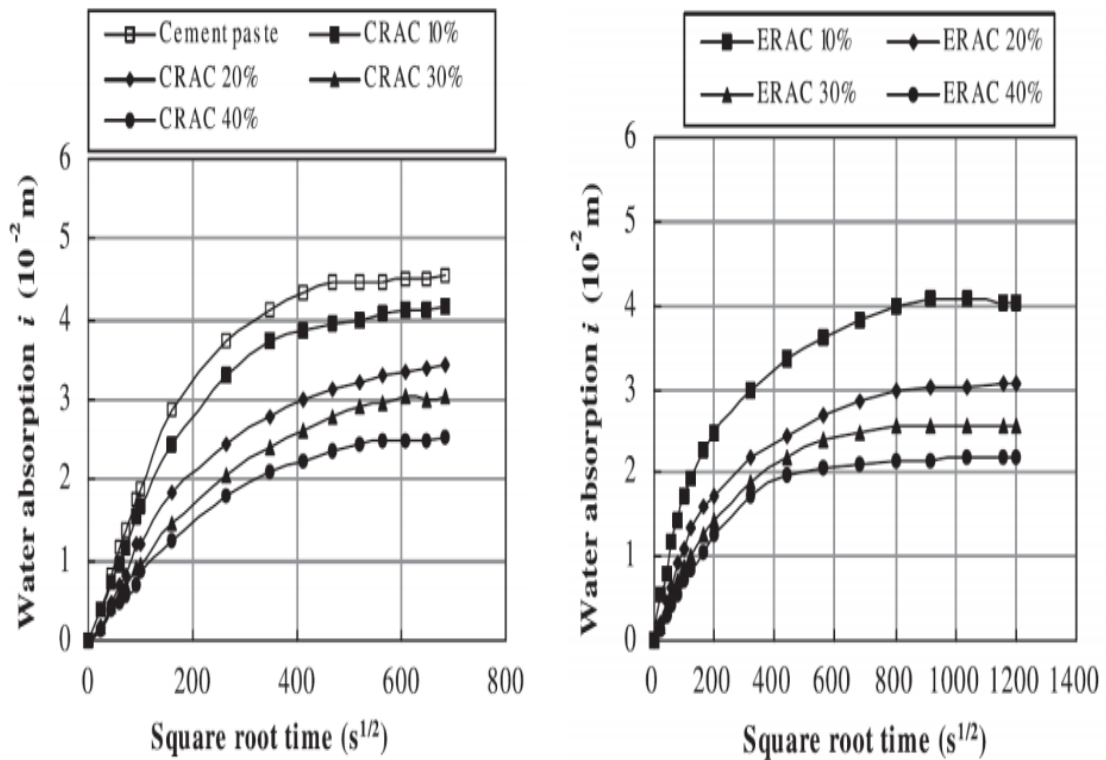


Figure I.8 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C [20].

I.4.3. Comportement au Feu

Les récentes études, conduit par Guelmine [19] sur le comportement des mortiers de caoutchouc aux températures élevées, incorporant un taux de granulats de caoutchouc allant de 0 à 9%, montre que les composites de caoutchouc exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement, ont des réponses thermiques similaires comparativement au mortier de référence (figure.I.9).

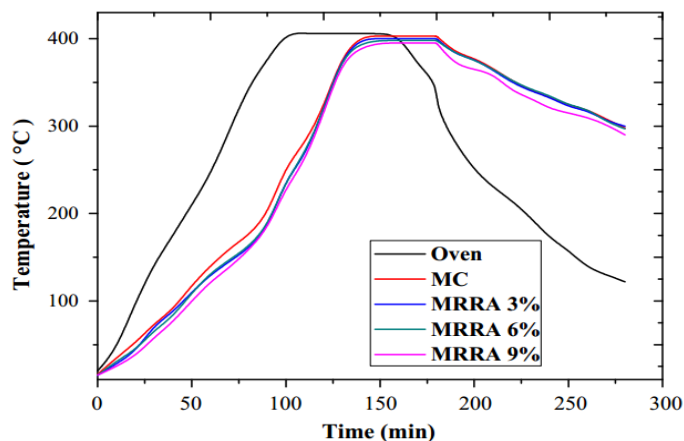


Figure.I.9. la montée en température du four et des mortiers étudiés pour différents taux des granulats de caoutchouc recyclés [19].

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



Figure.I.10. Vue des demi-spécimens exposés aux quatre cycles de chauffage-refroidissement à la température ambiante (20°C) et à la température 400°C [19].

Les mêmes composites cités ci-dessus, les propriétés physico-mécaniques (la perte en masse, la vitesse d'impulsion ultrasonique, la porosité ouverte, la résistance à la compression et la résistance à la traction) des composites étudiés sont stables pour les températures jusqu'à 200°C. Au-delà de ce seuil, les propriétés physiques des composites étudiés sont menacées par la décomposition des granulats de caoutchouc, notamment pour les mortiers incorporant les dosages supérieurs à 3% (figure.I.11 et I.12). Donc, pour maintenir la stabilité physico-mécanique des composites cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc sous l'effet de température, le dosage de ces derniers ne doit pas dépasser 3%. Dans cette limite, on peut utiliser les granulats de caoutchouc avec les matériaux cimentaires en toute sécurité.

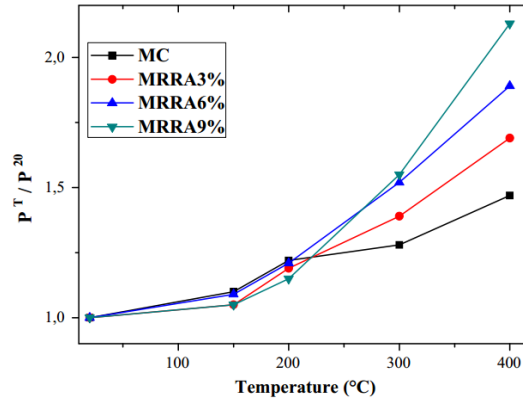


Figure.I.11. Evolution de la porosité ouverte relative des mortiers étudiés en fonction de la température de chauffage [19]

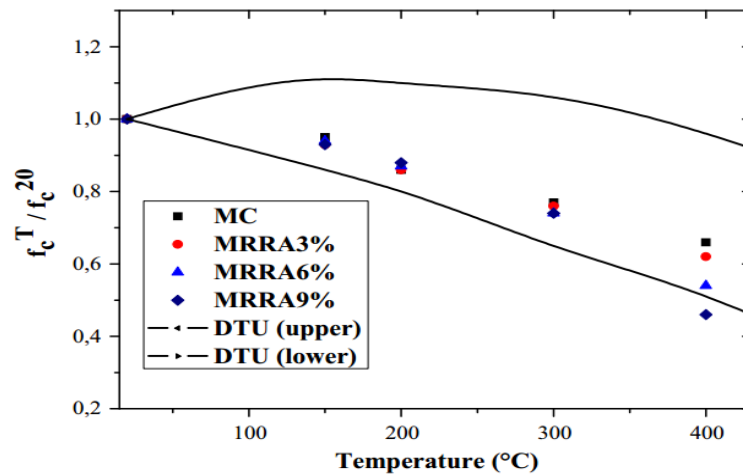


Figure.I.12. Comparaison entre les résultats de la résistance à la compression relative de cette étude et ceux de DTU [19].

I.5. La technologie de magnétisation de l'eau

I.5.1. Définition

La "technologie de magnétisation de l'eau" fait généralement référence à l'application de champs magnétiques aux systèmes d'eau à diverses fins, prétendant souvent améliorer la qualité de l'eau, favoriser la croissance des plantes ou procurer des bienfaits pour la santé. Cependant, il est important de noter que le consensus scientifique sur l'efficacité d'une telle

technologie est mitigé, de nombreuses revendications manquant de preuves empiriques solides [21-23].

Le principe de base derrière la technologie de magnétisation de l'eau est que l'exposition de l'eau à des champs magnétiques peut modifier ses propriétés physiques, telles que la réduction de la tension de surface ou le changement du comportement des minéraux dissous. Les partisans de cette technologie affirment souvent que l'eau magnétisée peut améliorer l'absorption des nutriments par les plantes, améliorer la qualité du sol, réduire le tartre dans les tuyaux et équipements, voire procurer des bienfaits pour la santé en cas de consommation humaine. [23-28]

Cependant, bien qu'il y ait eu quelques études examinant les effets de l'eau magnétisée, les résultats sont mitigés et de nombreuses affirmations restent non vérifiées ou même réfutées par l'examen scientifique. Les critiques soutiennent que les effets observés pourraient être dus à des effets placebo ou à d'autres facteurs confondants plutôt qu'à un traitement magnétique proprement dit [26-30].

En résumé, la "technologie de magnétisation de l'eau" désigne l'application de champs magnétiques à l'eau à diverses fins, mais son efficacité et sa base scientifique restent sujets à débat et nécessitent davantage de recherches.

I.5.2. Les Principes de la technologie de magnétisation:

Les principes sur lesquels repose la technologie de l'aimantation de l'eau sont souvent basés sur plusieurs hypothèses et revendications faites par les partisans de cette approche. Alors que la validité scientifique de ces principes est débattue, voici quelques idées communes associées à la technologie de l'aimantation de l'eau [21-34] :

- **Alignement des molécules d'eau:** Les partisans affirment que l'exposition de l'eau à un champ magnétique peut aligner les molécules d'eau dans une orientation spécifique, entraînant des changements dans les propriétés physiques de l'eau. Cet alignement est censé réduire la tension superficielle de l'eau, la rendant plus facilement absorbée par les plantes et améliorant l'absorption des nutriments.

- **Modification du comportement des minéraux:** Il est suggéré que les champs magnétiques peuvent influencer le comportement des minéraux dissous dans l'eau, tels que le carbonate de calcium, les empêchant de former des dépôts calcaires dans les tuyaux et les équipements. Cela est censé réduire la nécessité d'additifs chimiques ou d'agents de nettoyage pour gérer les problèmes d'entartrage.
- **Amélioration de l'activité biologique:** Certains partisans affirment que l'eau aimantée peut stimuler l'activité biologique dans le sol et favoriser une croissance végétale plus saine. Cela est souvent attribué à une meilleure disponibilité des nutriments, une activité microbienne renforcée et une meilleure rétention d'eau dans le sol.
- **Réduction de la dureté de l'eau:** La technologie de l'aimantation de l'eau est parfois commercialisée comme un moyen d'adoucir l'eau en modifiant la structure des minéraux responsables de la dureté de l'eau, tels que les ions calcium et magnésium. Cela est censé réduire les effets néfastes de l'eau dure sur les systèmes de plomberie et les appareils.

I.5. 3. Les avantages de la magnétisation de l'eau sur les propriétés des matériaux cimentaires:

La technologie de l'eau magnétisée dans le domaine des matériaux de construction est parfois censée offrir divers avantages potentiels, bien que les preuves scientifiques soutenant ces allégations soient souvent limitées et non concluantes. Néanmoins, les partisans suggèrent les avantages potentiels suivants [21-27] :

- **Temps de prise réduit du béton :**

L'eau magnétisée est censée accélérer le processus d'hydratation dans les matériaux à base de ciment, tels que le béton et le mortier. Cela peut potentiellement raccourcir le temps de prise de ces matériaux, entraînant des calendriers de construction plus rapides et des délais de projet réduits.

- **Amélioration de la maniabilité :**

L'eau magnétisée est censée améliorer la maniabilité et la fluidité des mélanges de béton et de mortier en réduisant la tension superficielle de l'eau. Cela peut résulter en un placement,

une compaction et une finition plus faciles des matériaux de construction, ce qui entraîne une meilleure qualité et productivité de construction.

➤ **Augmentation de la résistance à la compression :**

Certains partisans affirment que l'eau magnétisée peut améliorer la résistance à la compression et la durabilité du béton en favorisant une hydratation plus efficace et en réduisant les vides et imperfections du matériau. Cela peut résulter en des structures plus fortes et plus résistantes qui nécessitent moins d'entretien et de réparations au fil du temps.

➤ **Réduction des fissures et du retrait :**

La technologie de l'eau magnétisée est parfois censée atténuer le risque de fissures et de retrait dans le béton et le mortier en améliorant l'uniformité et l'homogénéité du matériau. Cela peut aider à prévenir les défauts structurels et améliorer les performances à long terme des éléments de construction.

➤ **Durabilité environnementale :**

En réduisant le besoin d'additifs chimiques et en minimisant les déchets liés aux matériaux de construction, la technologie de l'eau magnétisée est parfois promue comme une approche respectueuse de l'environnement pour la construction. Cela peut contribuer à des pratiques de construction durables et aider à minimiser l'impact environnemental des projets de construction.

➤ **Économies de coûts :**

Les avantages potentiels de la technologie de l'eau magnétisée en termes d'accélération des calendriers de construction, d'amélioration des performances des matériaux et de réduction des besoins en entretien peuvent conduire à des économies de coûts pour les entreprises de construction et les propriétaires de projets. Cela inclut des économies sur la main-d'œuvre, les matériaux et les dépenses opérationnelles sur le cycle de vie d'un bâtiment ou projet d'infrastructure.

I.6. Effet de l'eau magnétisée sur la performance des matériaux cimentaires :

I.6.1. Impact de l'eau magnétisée EM sur les propriétés fraîches :

De nombreux chercheurs ont rapporté que l'incorporation de EM dans la production de béton augmente la maniabilité du béton sans augmenter le rapport Eau/Ciment (w/c) ni utiliser de plastifiants [25,26]. Par exemple, Gholhaki et al. [35] ont rapporté que l'utilisation d'EM au lieu de l'eau potable peut améliorer la fluidité et la viscosité du béton auto-compactant. De plus, Bharath et al. [36] ont démontré que l'utilisation de MW améliorerait la maniabilité des mélanges de béton contenant des scories de cuivre en tant que remplacement partiel du ciment d'environ 50 %.

I.6.2. Impact de l'eau magnétisée EM sur la résistance mécanique :

Un nombre considérable de publications a été réalisé sur l'effet de l'eau magnétisée (EM) sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, ont confirmé que EM pouvaient augmenter la résistance à la compression du béton, ce qui conduit, normalement, à une augmentation de la résistance à la flexion et à la traction. Certaines recherches ont confirmé que EM pouvaient augmenter la résistance à la compression du béton d'une petite fraction de 8 % à 10 % de plus que le béton préparé avec de l'eau potable (EP) [37, 39]. Néanmoins, la grande majorité des recherches a affirmé EM pouvaient augmenter considérablement la résistance du béton d'environ 8 % à 25 % de plus que celles mélangées avec EP. En outre, Ghorbani et al. [38] ont constaté que les résultats d'un mélange de béton réalisé avec des micro-ondes (passant 10 fois à travers un champ magnétique de 0,65 T) affichent la plus forte augmentation de la résistance à la compression dans le temps par rapport au mélange témoin : environ 38 %, 21 % et 19 % après 7, 14 et 28 jours, respectivement. Ce résultat révèle que les EM augmente la résistance à un jeune âge dans une proportion plus élevée que celle des âges ultérieurs, ce qui a également été confirmé par Ghods [38] qui a conclu que l'utilisation des EM peut améliorer les résistances à la compression en début d'âge des mélanges de béton auto-compactant incorporant de la nano-silice.

I.6.3. Temps de prise :

Une étude de Hassan (32) a examiné l'effet des EM sur le temps de prise initial et final des mortiers de ciment à un âge précoce. Les résultats ont montré que l'utilisation de MW réduisait le temps de prise initial du mortier de ciment de 60 % et de 21,8 % pour $w/c = 0,4$ et $0,6$, respectivement, par rapport à l'utilisation de l'eau de robinet. De plus, les pourcentages correspondants de réduction du temps de prise final du mortier de ciment étaient de 19,2 % et 19,6 % pour $w/c = 0,4$ et $0,6$, respectivement, par rapport à l'utilisation de RW. De plus, Soto-Bernal et al. (40) ont trouvé que le temps de prise initial de la pâte de ciment diminuait d'environ 15 à 25 % en utilisant une intensité de champ magnétique de 19,1 et 25,4 Gauss, respectivement. Il a également été conclu qu'il existe une forte corrélation entre la puissance du champ magnétique et le temps de prise de la pâte de ciment ; une puissance plus élevée du champ magnétique diminue le temps de prise. L'utilisation de MW réduit l'accumulation de particules de ciment, aidant les molécules d'eau à pénétrer plus facilement dans les particules de ciment. Par conséquent, le processus d'hydratation se fait de manière efficace et rapide, ce qui réduit à son tour le temps de prise.

I.6.4. La masse volumique apparente :

Les données relatives à l'effet de l'eau magnétisée (EM) sur le poids unitaire et le contenu en air du béton sont très rares, donc ce point nécessite des recherches supplémentaires. Abdel-Raouf et Abou-Zeid (41) ont conclu que l'eau-mère, qu'elle soit incorporée immédiatement dans le béton ou après 3 jours de stockage, ne semblait pas introduire de changement notable dans le poids unitaire ou le contenu en air des mélanges de béton. Les valeurs du contenu en air varient de 1,5 % à 3,7 %, ce qui peut être légèrement supérieur à celles d'un béton non entraîné à l'air.

I.6.5. L'attaque par l'acide sulfurique:

L'acide sulfurique est particulièrement agressif, car il attaque non seulement la phase des aluminates, mais il attaque également l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou (CH) et l'hydrate de silicate de calcium (C-S-H), ce qui entraîne finalement une perte de résistance à la compression et un éclatement séquentiel de la surface du béton ont confirmé que l'attaque de l'acide sulfurique entraîne une formation extensive de gypse dans les régions

proches des surfaces du béton et tend à provoquer des contraintes mécaniques élevées qui conduisent finalement à l'éclatement et à l'exposition de la surface fraîche suivante.

Dans une étude sur des pavés en béton, Ghorbani et al. (35) ont conclu que les blocs fabriqués avec des déchets de construction ont moins de résistance à l'attaque de l'acide sulfurique par rapport aux blocs de béton en MW et ont subi une perte de masse de 10 % après 120 jours d'exposition à une solution de H_2SO_4 à 5 % avec un pH de 1,0, tandis que les échantillons passant 10 fois à travers un champ magnétique de 0,65 T ont subi une perte de masse de seulement 5 %. La perte de masse des échantillons de béton a été accompagnée d'une réduction de la résistance à la compression d'environ 34 % dans le béton normal et de près de 23 % dans le béton en EM. Cette figure a également confirmé qu'il existe un temps optimal pour faire passer l'eau à travers le champ magnétique afin de compléter parfaitement le processus de magnétisation.

Un test de durabilité chimique a été réalisé par Abdel-Raouf et Abou-Zeid (41) en exposant des cubes de béton de 50 mm à une solution saturée de sulfate de magnésium et à de l'acide sulfurique à 10 %. Après une durée relativement courte (8 semaines) d'exposition à des cycles hebdomadaires de mouillage et de séchage, les résultats ont indiqué que le mélange à base de déchets de construction a présenté une perte de masse de 8 %, tandis que le mélange à base de 0,1 T EM a montré une perte de masse de 1,2 %. Les résultats des échantillons exposés aux sulfates de magnésium démontrent une perte de masse similaire, quelle que soit l'intensité de leur champ de magnétisation.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales

II.1. Introduction :

L'objectif principal de cette étude, est l'évaluation expérimentale de l'impact de l'eau magnétisée, sur quelques propriétés de mortier de ciment incorporant les granulats de caoutchouc recyclés GCR. La première partie de ce chapitre concerne la caractérisation des matières premières, utilisées pour la fabrication des mortiers étudiés. La seconde partie sera consacrée à la formulation, la préparation des mortiers étudiés. Par la suite, on décrit les méthodes expérimentales utilisés pour évaluer les propriétés frais et durcis des mélanges préparés.

II.2. Caractérisation des matières premières :

II.2.1. Essai sur les granulats utilisé :

II.2.1.1. Analyse granulométrique : NFP.18-560[21]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. On utilise une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par tamis est. La courbe qui relie le pourcentage des passants aux diamètres des tamis est appelée courbe granulométrique. Les courbes granulométriques du sable et des granulats de caoutchouc recyclés utilisés sont présentées dans la figures II.1 ci-dessous:



Figure II.1 : Analyse granulométrique

❖ **Module de finesse :**

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

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

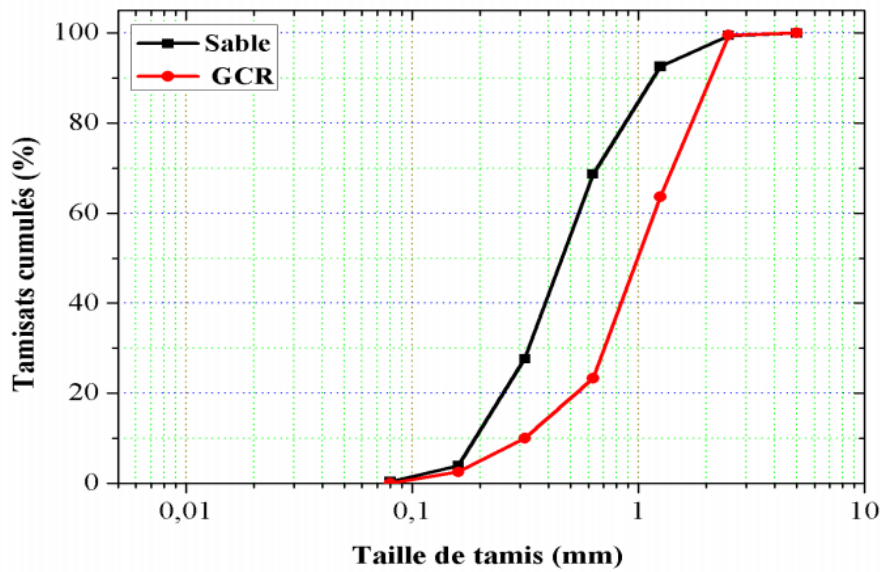


Figure II.2 : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés.

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

II.2.1.2 Equivalent de sable : NFB.18-598[21]

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable, il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, a la hauteur totale du flocculat. Ce coefficient est déterminé conformément à la norme **NFP.18-598**. **ON** détermine la qualité des sables par les coefficients suivants :



Figure II.3 : Essai d'équivalent de sable.

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

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

Avec :

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

II.2.1.3 Masse volumique apparente et absolue :

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

- **Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente est le rapport de la masse d'échantillon sec M au volume total apparent Vt . Il s'agit de remplir un volume de 1 dm^3 et déterminer sa masse M par peser, soit :



Figure II.4 : Masse volumique apparente

- **La masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Pour déterminer celle-ci, on utilise la méthode de l'éprouvette graduée. Pour opérer dans de bonnes conditions, on utilise une éprouvette graduée en verre de 500cm³. Le volume du liquide déplacé détermine le volume absolu V_s des grains solides.

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

II.2.2. Essai sur le ciment :

II.2.2.1 Surface spécifique :

La surface spécifique de Blaine est la surface totale en cm² développée par 1g de, elle est mesurée conventionnellement selon la norme **NFP 15-476[21]**. La surface spécifique d'un liant est calculée en déterminant le temps que met un volume

d'air constant, sous une pression déterminée et à la température connue, pour traverser une couche du liant tassé. La surface spécifique de Blaine est calculée en utilisant l'expression suivante :

$$SSB = k \frac{\sqrt{e} \sqrt{t}}{\rho_s (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (\text{cm}^2 / \text{g}) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

t ; le temps de passage de l'air entre les deux trais en seconde ; k : la constante de l'appareil (ici égale à 43) ; e : la porosité de la couche tassée (égal à 0.5) ; ρ_s : la masse spécifique du ciment (g/cm^3) et η : la viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai.

II.2.2.2. Masse volumique apparente :

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

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

➤ L'essai consiste à :

- 1-Tarer le récipient M_1 ;
- 2-Remplir le récipient posé au- dessous de l'axe de l'entonnoir avec la poudre de ciment ;
- 3- Faire l'opération sans vibration. Raser avec la réglette appuyée sur les bords de récipient ;
- 4-nettoyer l'extérieur du récipient ;
- 5-Peser de nouveau le récipient rempli, soit M_2 , sa masse

La masse volumique apparente est calculer par :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (II.8)$$

Essai	Masse volumique apparente du sable (kg/m ³)	Masse volumique apparente des GCR (kg/m ³)
1	1500	366

II.2.3. L'eau de gâchage :

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

II.2.4. Préparation de l'eau magnétisée :

En mettant l'eau de robinet en contact avec un champ magnétique statique durant certaine temps comme le montre la figure II.5. Le champ magnétique statique est obtenu dans étude par les aiment d'intensité de 0.5 tesla. En mettant un vase l'eau en contact avec un champ magnétique statique bipolaire (N-S) durant 24 heures. Le choix de la durée d'exposition de l'eau au champ magnétique a été déterminé après la révision approfondie des études récentes sur le même sujet [21-30]. L'exposition de l'eau au champ magnétique statique bipolaire améliore leur qualité selon les recommandations de plusieurs études antérieures [22-26]. Le traitement physique de l'eau par un champ magnétique améliore leurs propriétés comme la viscosité, la solubilité, et la tension superficiel de la goutte d'eau. La

bonne qualité de l'eau magnétique peut activer la réaction d'hydratation de l'eau améliore le performance physico-mécanique des matériaux cimentaires [25-28].



Figure II.5. Procédure de magnétisation de l'eau de gâchage.

II.3. Etude du mortier frais :

II.3.1 Préparation des mortiers étudiés :

Le but de cette étude est l'investigation de l'impact de l'eau magnétisée sur quelques propriétés fraîches et durcies des mortiers de ciment incluant les granulats de caoutchouc recyclés GCR. Les granulats de caoutchouc recyclés sont obtenus par déchiquetage mécanique des pneus. Le ciment utilisé est de type 32.5. Huit composites sont préparés dans cette étude. Quatre avec de l'eau de robinet et les autres avec de l'eau magnétisée. Les mortiers de caoutchouc sont obtenus par substitution volumique entre les granulats de sable et les granulats de caoutchouc pour des dosages suivants : 3%, 13%, et 27%.

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

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

Aussitôt après mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30s de malaxage on introduit régulièrement et de manière rapide le sable (le sable et mélanger à sac avec les granulats de caoutchouc) et continuer La malaxage 1min30s pendant les première 15 secondes, enlever au moyen d'une raclette en métal tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en repoussant vers le milieu de celui-ci. On reprendra ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s. Le mortier ainsi préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4*4*16cm³, ceux -ci subiront par la suite des chocs (2*60 coups) à l'aide d'une table à choc afin de dégager toutes les bulles d'air occluses lors de la mise en moule et d'homogénéiser la structure des éprouvettes préparées, après la fin de l'opération, on araser la partie du mortier en excès. Le démoulage se fait 24 heures après le coulage des composites étudiés. La conservation des éprouvettes s'effectuera dans l'ambiance du laboratoire à 20±2°C et HR=55±5%.



Figure II.6 : malaxeur normalisé EN 196-1.

Tableau II.1 : Opération de malaxage des mortiers

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable, faire le malaxage		Raclage de la cuve	Reprendre le malaxage	
			30 s	30 s		1mn	Durée
					15 s	15s	
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide

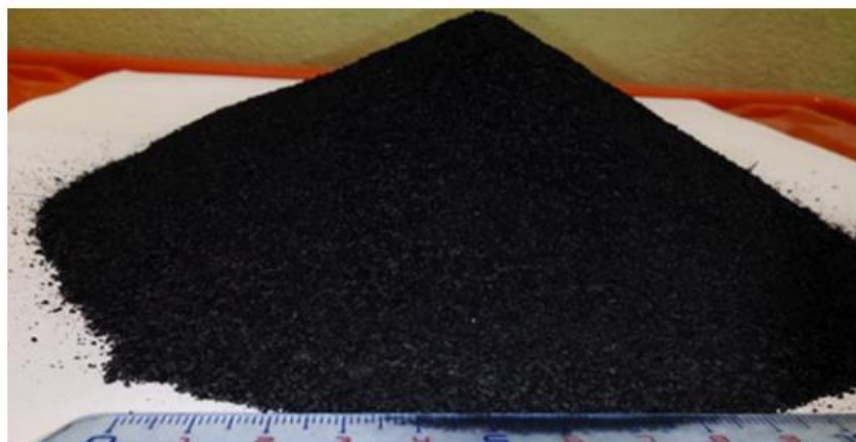


Figure II.7 :Granulats de Caoutchouc utilisés.

Tableau II.2 : Composition des mortiers préparés

Mélange	Rapporte E/C	Ciment Ciment (g)	Eau de robinet (g)	Eau magnétisée (g)	Sable (g)	GCR (g)
MT	0.6	450	248	0	1350	0
MGCR3	0.6	450	248	0	1230	30
MGCR11	0.6	450	248	0	1070	70
MGCR27	0.6	450	248	0	870	120
MTM	0.6	450	0	248	1350	0
MGCR3	0.6	450	0	248	1230	30
MGCR11	0.6	450	0	248	1070	70
MGCR27	0.6	450	0	248	870	120

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

II.4.1.Ouvrabilité :

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



Figure II.8 : Essai d'ouvrabilité

II.4.2.1.Mode opératoire :

Préparer le mortier conformément à la norme **EN 196-1**. Si la table d'écoulement n'a pas fonctionné pendant l'heure précédant l'essai, la faire fonctionner à vide plusieurs fois. Nettoyer et sécher avec beaucoup d'attention le plateau de la table. Placer le moule tronconique au centre de la table à chocs (centrage à l'aide du cercle gravé sur le plateau). Remplir le moule en 2 couches. Chaque couche doit être étalée en la compactant légèrement 10 fois à l'aide de la tige de compactage (pilon en bois). Araser puis lisser. Nettoyer la table d'écoulement et essuyer toute trace d'eau à proximité du moule. Programmer le tableau de commandes : tapes 1 fois sur la touche de sélection (des 0 apparaissent à l'écran) puis plusieurs fois pour atteindre la décimale des dizaines (celle-ci doit clignoter). Incréments pour rentrer le nombre 1 pour la dizaine. Taper 1 fois sur la touche de sélection pour atteindre la décimale des unités (celle-ci doit clignoter). Incréments pour rentrer le nombre 5 pour l'unité. Taper 1 dernière fois sur la touche de sélection pour valider le nombre 15 seul le nombre 15 s'affiche à l'écran. Retirer

le moule verticalement. Soumettre le mortier à 15 chocs à raison d'1 choc par seconde en appuyant sur la touche START. Evaluer la valeur de l'étalement dans 2 directions perpendiculaires, la moyenne de ces mesures donnée à 1mm près représente l'écoulement.

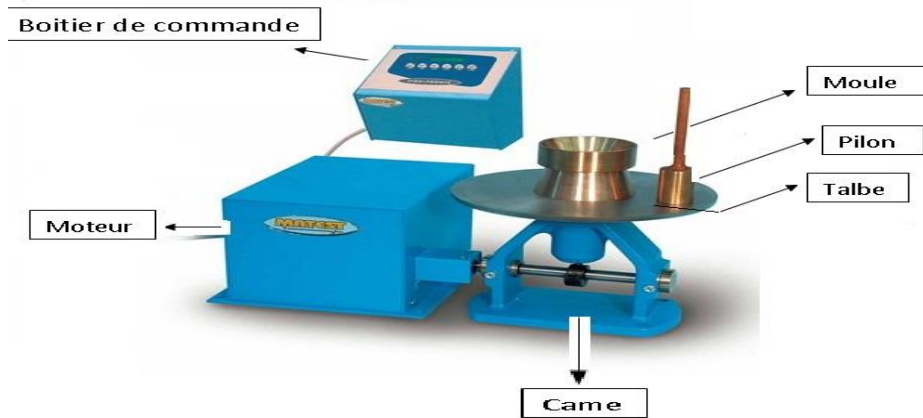


Figure II.9 : table d'étalement.

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

II.5.1. Propriétés physiques :

II.5.1.1 Masse volumique apparente :

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

II.6. Propriétés Mécaniques :

II.6.1. Résistance à la flexion : norme EN196-[21]

L'essai consiste à estimer les résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortiers élaborés. Le dispositif de flexion (Figure II.11) comporte deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique, un troisième appui de même diamètre, équidistant des deux premiers permet de transmettre la charge de rupture F (Figure II.10). Afin d'avoir une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, les deux appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leur centres, dans le plan vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. La résistance à la flexion est calculée selon la formule :

$$R_f = \frac{3F_r L}{2b^3} [\text{Pa}] \dots\dots\dots (\text{II.11})$$

Avec :

F : charge de rupture en (N) ;

B : largeur de l'éprouvette ;

L : distance entre les appuie en m ;

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (II.11) et dans la photo (II.10).

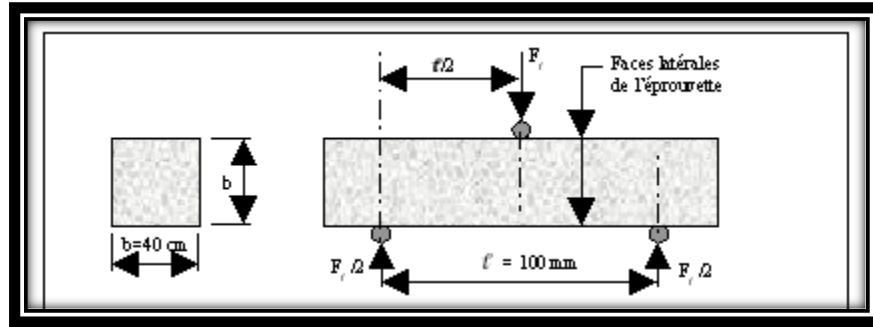


Figure II.10 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion

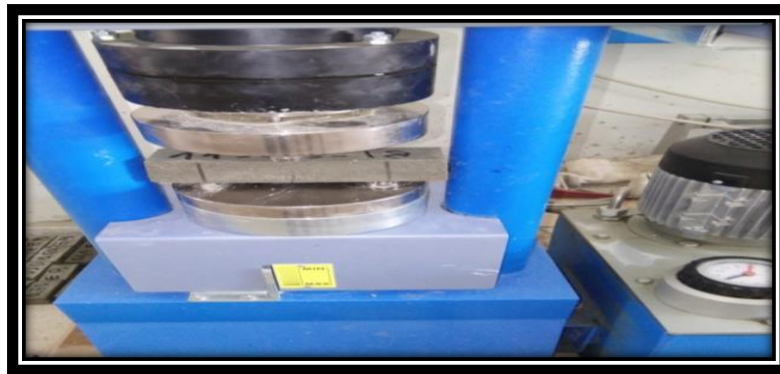


Figure II.11 : Dispositif expérimental de l'essai de flexion

II.6.2. Résistance à la compression : norme EN196-[21]

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

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots (II.12)$$

Avec :

F_c ; force de rupture ; S ; section latérale de l'éprouvette, égale à 16 cm².

L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150KN avec vitesse de 2400N/s. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression tel que schématisé sur la Figure II.12 .

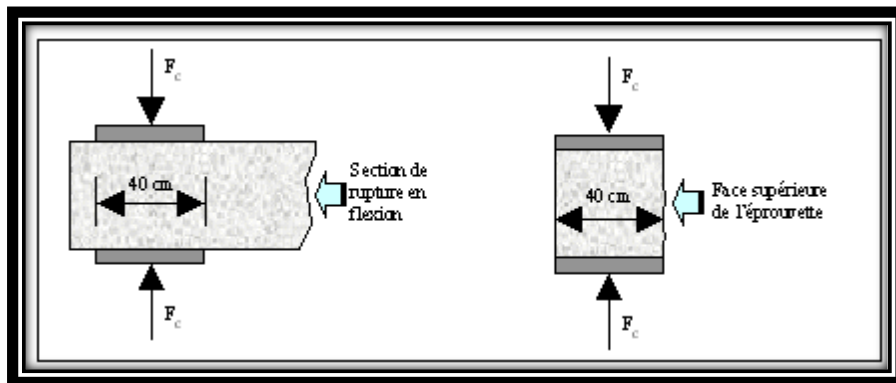


Figure II.12 : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

Chapitre III : Résultats et discussion

III .I. Introduction

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'effet de l'eau magnétisée sur le comportement des mortiers de ciment incorporant des granulats de caoutchouc recyclé. Dans ce chapitre, nous commencerons par analyser la consistance des mortiers étudiés, préparés avec de l'eau de robinet et de l'eau magnétisée, en fonction du dosage en particules de caoutchouc incorporées dans la matrice cimentaire par substitution volumique. Ensuite, nous présenterons les propriétés de ces mortiers, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Enfin, nous exposerons les résultats concernant l'influence des granulats de caoutchouc et l'effet de l'eau magnétisée sur la masse volumique apparente, la résistance à la flexion par essai en trois points, ainsi que la résistance en compression.

III.2. Caractérisation des matières premières:

III.2.1. Les granulats utilisés :

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types granulats qui sont les suivant:

- Des granulats naturels siliceux de Sable provenant de la région de d'oued Souf située au Sud-Est de la capitale d'Algérie.
- Des granulats de caoutchouc recyclés, obtenus par déchiquetage mécaniques des pneus usés. Ils ont des propriétés similaires de caoutchouc vierge (Figure.III.1).

Les propriétés des granulats ont été déterminées conformément aux normes [Afnor, 81-2000], puis récapitulés et présentés dans la tableau ci-dessous.

Tableau.III.1. propriétés physiques essentielles des granulats utilisés.

Propriétés	Sable	GCR
Densité apparente (kg/m ³)	1500	366
Equivalent de sable (%)	90.53	-
L'absorption d'eau (%)	1.30	0.30
Fineness Modulus	2.10	3.01

Les caractéristiques physiques du sable employé sont données dans tableau (III.1). L'analyse chimique qualitative réalisée par le diffractomètre aux rayons X sur un échantillon de sable tableau (III.2) montre la prépondérance de l'espèce siliceuse (SiO₂) dans la composition chimique.

Tableau.III.2. Composition chimique moyenne du sable utilisé.

Composition chimique Moyenne en (%)								
Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
	93.25	2.15	0.60	0.35	0.10	0.26	1.30	0.10

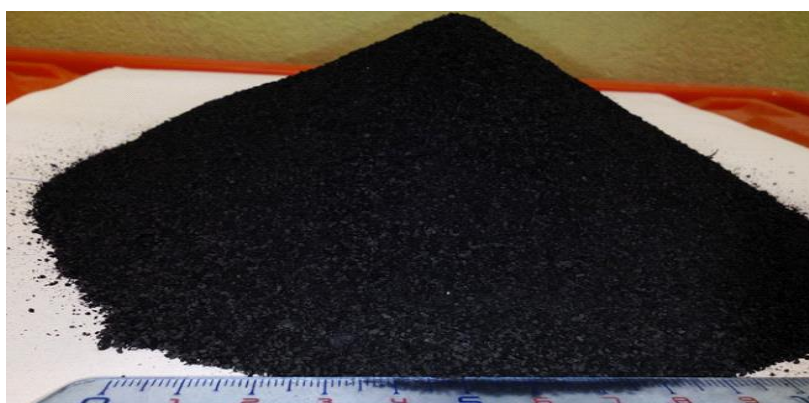


Figure.III.1. Les granulats de GCR sable utilisés.

III.2.1.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique des granulats utilisés est réalisée conformément au procédé expérimental décrit au chapitre II. Les résultats de cette analyse sont représentés dans la figure (III.2).

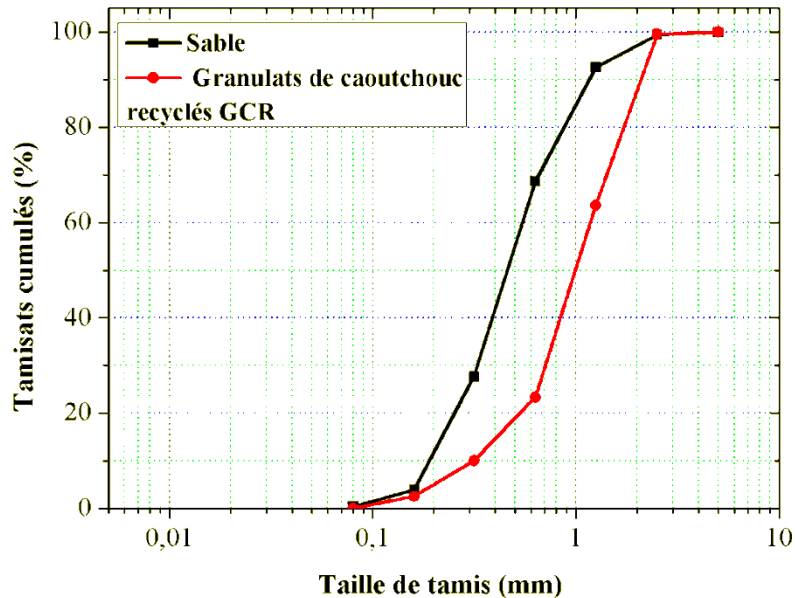


Figure.III.2. Analyse granulométrique des utilisés.

Les granulats de caoutchouc sont plus fins que les granulats de sable.

III.2.2. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland normal de type **32.5** provenant de la cimenterie de M'sila. Les propriétés physiques et la composition chimique du ciment utilisé sont données respectivement dans les tableaux (III.3), (III.4).

Tableau.III.3. Propriétés physicomécaniques de ciment utilisé.

Densité	Densité absolue	Finesse de Blaine	Début	Résistance en compression à

apparent e (kg/m ³)	(kg/m ³)	(cm ² /g)	de prise (min)	2 et à 28 jours en (MPa)	
1007	3010	3850	180	25.5	35.30

Tableau.III.4. Composition chimique moyenne du ciment utilisé.

La composition chimique Moyenne en (%)								
Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	So ₃	K ₂ O	Na ₂ O
	17.16	4.46	3.02	63.01	2.02	2.43	0.64	0.10

Ces résultats montrent qu'il s'agit d'un ciment assez fin à forte teneur en silicates tricalciques (C₃S).

III.3. Etude des propriétés des mortiers étudiés :

III.3.1. Consistance :

Le graphique III.3 illustre l'effet de l'eau magnétisée et des particules de caoutchouc réutilisé, issus du déchetage mécanique de pneus usés, sur la consistance des mortiers étudiés. La consistance, ou ouvrabilité, a été évaluée à l'aide de l'eau d'étalement sur table.

Ce graphique montre que l'incorporation de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire entraîne une diminution significative de la consistance des mortiers. Ce comportement s'explique par la nature rigide et peu compatible des particules de caoutchouc avec les matériaux cimentaires. En effet, la légèreté du caoutchouc génère une incompatibilité physique avec le ciment et le sable, qui sont plus lourds.

En revanche, l'utilisation d'eau magnétisée permet d'augmenter l'ouvrabilité des mortiers de 10 % à 14 % par rapport au béton préparé avec de l'eau de robinet. Cette approche

innovante contribue à améliorer la consistance du mélange et facilite le processus de coulage, notamment dans des coffrages fortement armés par le ferrailage.

De plus, cette technique permet de réduire le coût total du béton en diminuant la nécessité d'ajouter des superplastifiants. Le phénomène s'explique par les propriétés spécifiques de l'eau magnétisée, telles qu'une faible viscosité, une tension superficielle réduite et une haute solubilité. Ces caractéristiques favorisent une meilleure pénétration de l'eau dans les grains de ciment, ce qui améliore le taux d'hydratation.

Enfin, cette amélioration de la pénétration de l'eau contribue à une meilleure homogénéité du mélange, tout en limitant le phénomène de ségrégation lors du coulage et du placement du béton.

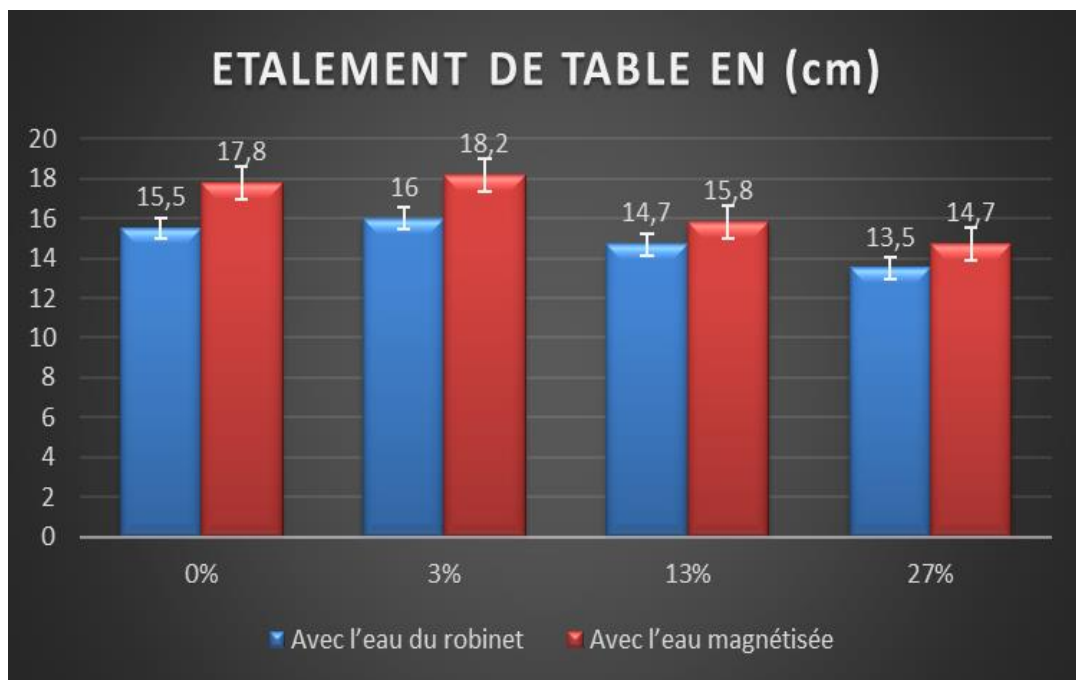


Figure.III.3. L'effet de l'eau magnétisée et les GCR sur l'affaissement des mortiers étudiés.

III.3.2. La masse volumique apparente :

Dans cette section, nous analysons l'influence de l'eau magnétisée et des particules de caoutchouc sur la masse volumique apparente des mortiers légers. Plus précisément, nous avons déterminé la masse volumique apparente de mortiers à base de caoutchouc léger sur trois éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, à l'âge de 30 jours.

Les résultats, présentés dans le graphique ci-dessous (Graphe III.4), illustrent la variation de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage de particules de caoutchouc réutilisées. On observe que cette masse diminue à mesure que le taux de caoutchouc réutilisé augmente. Cette tendance est cohérente, puisque les particules de caoutchouc ont une densité volumique faible (environ 366 kg/m^3). En quantifiant cette baisse, on note une diminution de l'ordre de 6 %, 8 % et 26 % respectivement pour des taux d'incorporation de caoutchouc de 3 %, 11 % et 27 %.

Cette relation innovante ouvre des perspectives intéressantes dans le domaine des matériaux de construction, notamment pour concevoir des structures plus légères, ce qui pourrait contribuer à réduire le poids global des ouvrages tout en conservant leurs performances.

Concernant l'effet de l'eau magnétisée, nos observations indiquent que son influence sur la masse volumique apparente est très limitée. En effet, l'impact de l'eau magnétisée se traduit par une réduction de seulement 0,9 % à 1,8 %. Cette faible variation est peu documentée dans la littérature, ce qui souligne la nouveauté de nos résultats dans ce domaine.

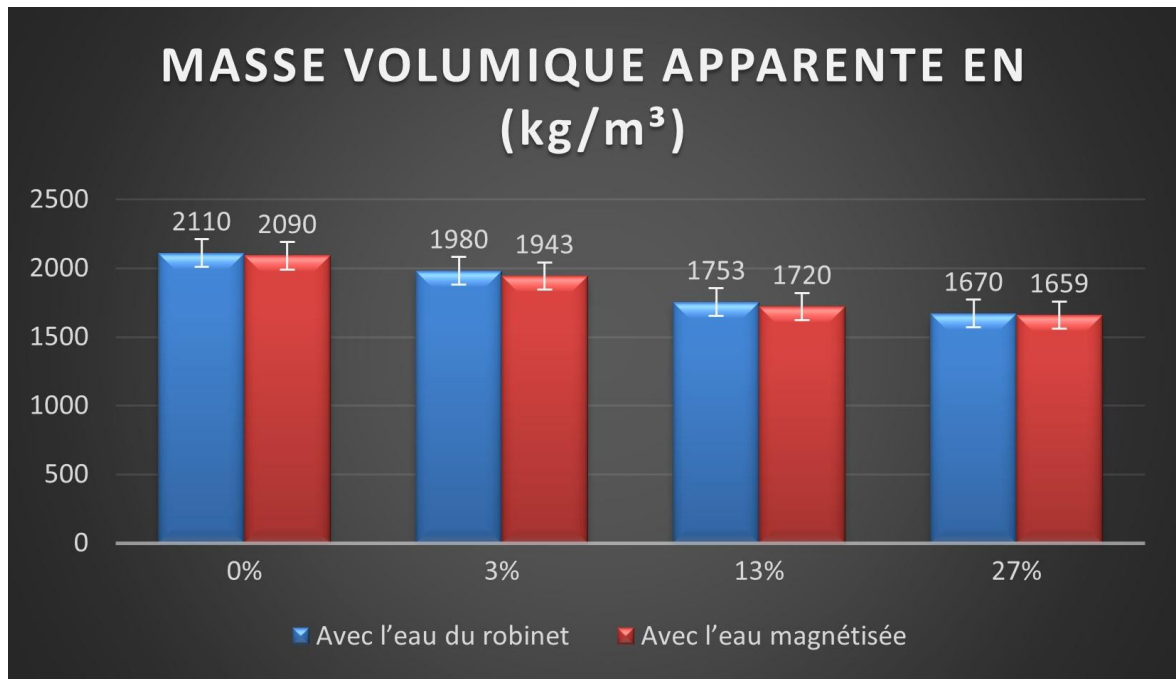


Figure.III.4. L'influence de l'eau magnétisée et les GCR sur la masse volumique des mortiers étudiés

III.3.3. La résistance en traction par flexion :

La figure III.5 illustre l'impact de l'eau magnétisée et du dosage en granulats de caoutchouc recyclé sur la résistance en traction par flexion des mortiers évalués à l'âge de 28 jours. Les résultats montrent que l'utilisation d'eau magnétisée augmente la résistance en traction de respectivement 12,72 %, 7,14 %, 13,88 % et 10,71 % pour les dosages en granulats de caoutchouc recyclé (GCR) de 0 %, 3 %, 11 % et 27 %. Cette amélioration des performances mécaniques peut être attribuée à une hydratation plus efficace du ciment, facilitée par l'eau magnétisée. En effet, le champ magnétique modifie la structure moléculaire de l'eau, favorisant une meilleure pénétration et dispersion des gouttelettes dans les grains de ciment. Cela contribue à une homogénéité accrue du mélange et limite les phénomènes de ségrégation, renforçant ainsi la cohésion interne du mortier.

Cet effet positif de l'eau magnétisée sur la résistance en traction par flexion souligne que l'adhérence et la cohésion entre les granulats de caoutchouc, issus des pneus usagés, et la matrice cimentaire s'améliorent. Par conséquent, la résistance mécanique du mortier en bénéficie. Ce potentiel indique que le traitement par magnétisation pourrait constituer une solution pour atténuer les problèmes d'adhérence souvent rencontrés entre les granulats de caoutchouc polymère et la matrice minérale du ciment.

Cependant, l'introduction de granulats de caoutchouc dans le mortier entraîne une diminution significative de la résistance mécanique en traction par flexion. Ce comportement est principalement dû à la nature souple du caoutchouc, qui présente une mauvaise adhérence avec les composants du mortier à base de ciment. La cohésion entre caoutchouc et ciment diminue à mesure que le dosage en GCR augmente, ce qui se traduit par une baisse progressive de la résistance, aussi bien en traction qu'en compression. Cette chute de performance mécanique résulte donc d'une adhérence insuffisante entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire.

En conclusion, la technologie de magnétisation apparaît comme une approche prometteuse pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc recyclé. En renforçant l'interaction entre ces granulats et la matrice cimentaire, cette méthode pourrait contribuer à surmonter les limitations liées à la mauvaise adhérence et à optimiser l'utilisation des déchets de caoutchouc dans le domaine des matériaux de construction.

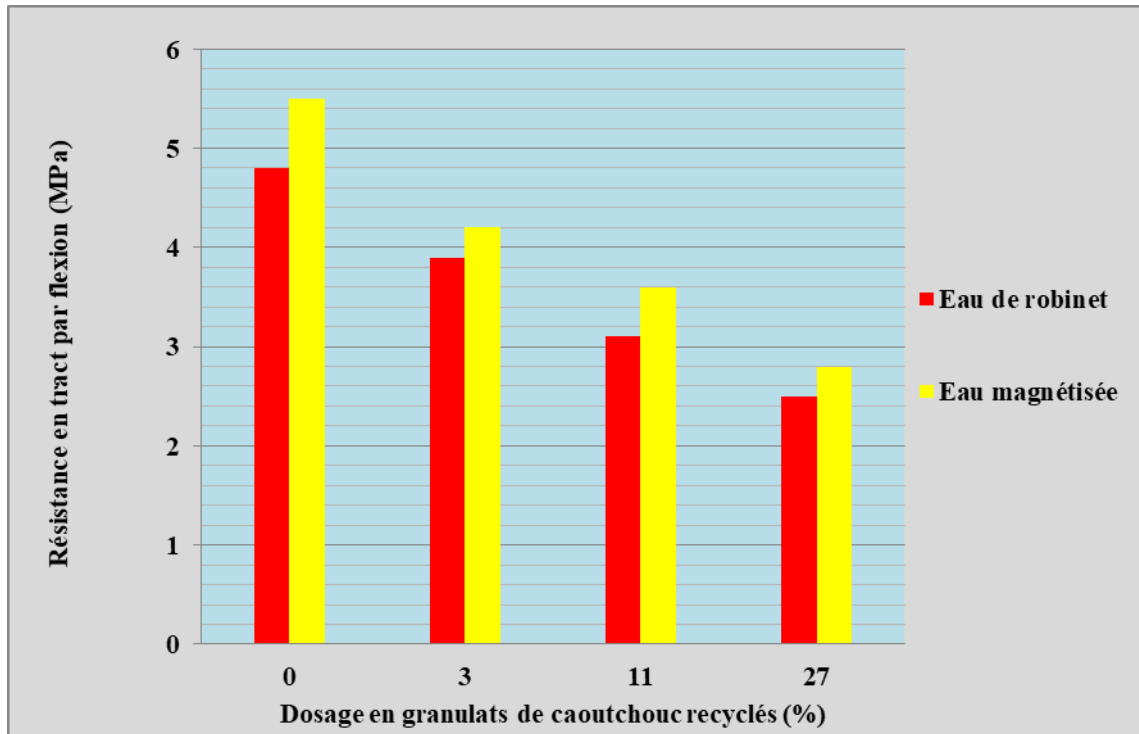


Figure.III.5. L'effet de l'eau magnétisée sur la résistance en traction par flexion

III.3.4.La résistance en compression :

La figure III.6 illustre l'impact de l'eau magnétisée et du dosage en granulats de caoutchouc recyclé (GCR) sur l'évolution de la résistance à la compression du mortier de ciment à l'âge de 28 jours. L'incorporation de granulats de caoutchouc recyclé jusqu'à 27 % entraîne une réduction de la résistance en compression d'environ 45 % lorsque le mortier est préparé avec de l'eau du robinet, et de 42 % avec de l'eau magnétisée, par rapport à un mortier sans particules de caoutchouc. Cet effet négatif est principalement attribuable à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire, un phénomène largement reconnu dans la littérature comme une cause majeure de la diminution de la résistance mécanique des composites cimentaires incorporant ces granulats [4,19,20].

Cependant, l'utilisation de l'eau magnétisée permet d'améliorer la résistance en compression jusqu'à 12,6 %. Cette augmentation des performances mécaniques peut être

expliquée par une meilleure hydratation des grains de ciment, facilitée par l'eau magnétisée. En effet, le champ magnétique modifie la structure moléculaire de l'eau, favorisant une meilleure pénétration et dispersion des gouttelettes d'eau dans les grains de ciment. Cela contribue à une homogénéité accrue du mélange et limite les phénomènes de ségrégation, renforçant ainsi la cohésion entre les composants du mortier.

Cette propriété innovante de l'eau magnétisée offre un potentiel pour améliorer l'adhérence et la cohésion entre les granulats de caoutchouc recyclé et la matrice cimentaire. La technologie magnétique apparaît donc comme une solution prometteuse pour optimiser le comportement physique et mécanique des composites cimentaires, qui souffrent souvent d'une faible consistance à l'état frais et d'une résistance mécanique réduite par rapport aux matériaux sans granulats de caoutchouc.

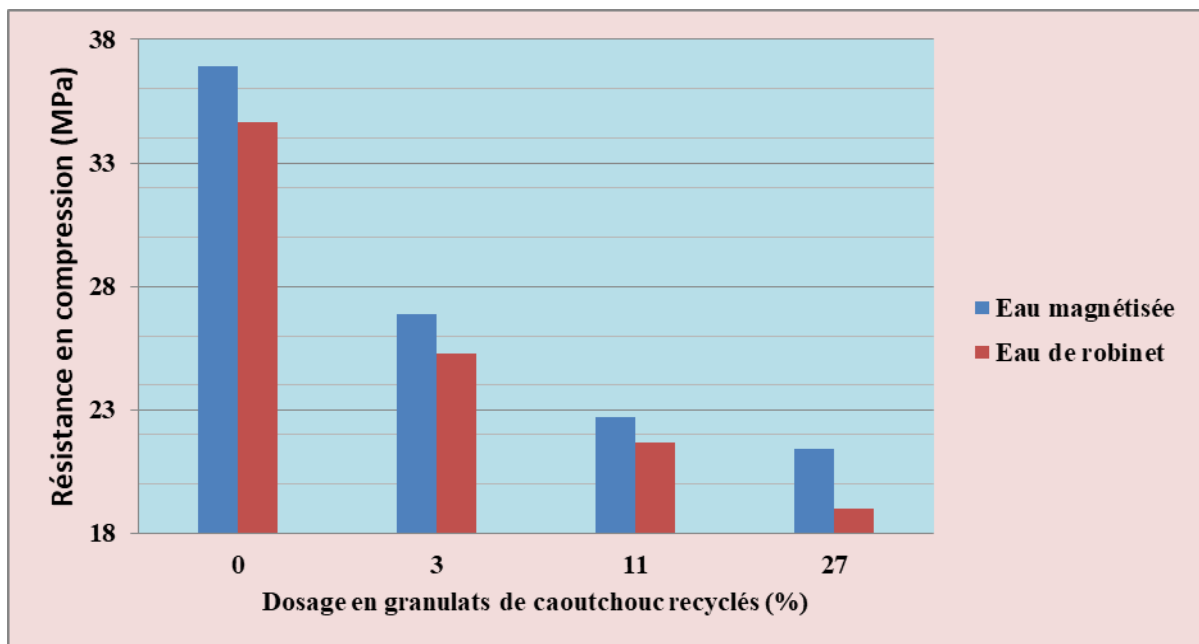


Figure.III.6. L'effet de l'eau magnétisée et les GCR sur la résistance en compression

III.4.Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de notre étude, mettant en lumière l'effet de l'eau magnétisée sur la consistance et la résistance mécanique. Nos observations ont révélé une amélioration significative de l'ouvrabilité des mortiers étudiés, avec une augmentation par rapport au mortier ordinaire préparé avec de l'eau de robinet. Cette amélioration s'est traduite par une facilité accrue de mise en place, notamment dans des conditions où la compaction est plus difficile. La présente étude, intégrée dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude, s'inscrit dans une démarche novatrice visant à évaluer l'impact de l'eau magnétisée sur l'ouvrabilité et la résistance en compression du béton ordinaire. En exposant l'eau de robinet à un champ magnétique statique, nous avons pu obtenir de l'eau magnétisée, dont l'utilisation dans le béton s'est avérée prometteuse tant à l'état frais qu'à l'état durci, avec des implications potentielles sur sa durabilité à long terme.

De plus, l'utilisation d'eau magnétisée a permis de réduire la nécessité d'utiliser des superplastifiants, contribuant ainsi à une optimisation des coûts de production. Cette augmentation de performance mécanique peut être attribuée à une meilleure hydratation des grains de ciment facilitée par l'eau magnétisée. En effet, le champ magnétique altère la structure moléculaire de l'eau, favorisant ainsi une meilleure pénétration et dispersion des gouttes d'eau dans les grains de ciment, ce qui améliore l'homogénéité du mélange et réduit les phénomènes de ségrégation.

En conclusion, nos résultats suggèrent que l'utilisation d'eau magnétisée présente un potentiel significatif pour améliorer à la fois l'ouvrabilité et la performance mécanique. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement les mécanismes sous-jacents de cet effet et pour évaluer ses implications à plus grande

échelle. En explorant davantage cette voie, nous pourrions ouvrir la porte à des avancées importantes dans le domaine de la construction durable et de la technologie des matériaux.

Conclusions et perspectives :

Les résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence le potentiel de l'utilisation de l'eau magnétisée pour améliorer les propriétés des mortiers incorporant des particules de caoutchouc recyclé. La magnétisation de l'eau semble favoriser une hydratation plus efficace du ciment, ce qui se traduit par une augmentation de la consistance, des résistances mécaniques (traction, flexion et compression) et une meilleure homogénéité du mélange. Ces effets sont particulièrement significatifs dans le contexte de matériaux contenant des granulats de caoutchouc, où l'adhérence entre ces derniers et la matrice cimentaire constitue un défi majeur.

L'intégration de particules de caoutchouc, tout en permettant de réduire le poids des matériaux et de valoriser les déchets issus du recyclage, entraîne néanmoins une diminution des performances mécaniques, notamment en résistance. Cependant, la technologie de magnétisation apparaît comme une solution innovante pour atténuer ces effets négatifs, en améliorant l'interaction entre le caoutchouc et la ciment, ce qui pourrait élargir l'usage de ces matériaux dans des applications structurales ou semi-structurales.

Perspectives :

1. Optimisation des formulations : Il serait pertinent d'étudier différents dosages de caoutchouc et de concentration d'eau magnétisée afin d'identifier la combinaison optimale permettant de maximiser les performances mécaniques tout en garantissant une durabilité accrue.
2. Études à long terme : Des investigations sur la durabilité, la résistance aux agressions chimiques et aux cycles de gel-dégel des matériaux traités à l'eau magnétisée sont nécessaires pour valider leur utilisation dans des environnements variés.
3. Analyse microstructurale : Des analyses approfondies (microscopie électronique, diffraction, etc.) pourraient permettre de mieux comprendre les mécanismes d'amélioration de l'adhérence et de l'hydratation induits par l'eau magnétisée.
4. Mise en œuvre pratique : La transition vers des applications industrielles exige de développer des équipements de magnétisation adaptés à grande échelle, ainsi que des protocoles standardisés pour garantir la reproductibilité des effets.

5. Valorisation des déchets : La combinaison de ces techniques ouvre la voie à une utilisation plus large des granulats de caoutchouc recyclé dans le bâtiment, contribuant à une construction plus durable et écologique.

En résumé, cette étude ouvre de nouvelles avenues pour le développement de matériaux cimentaires innovants, davantage respectueux de l'environnement, tout en améliorant leurs performances techniques grâce à l'utilisation de l'eau magnétisée. La poursuite des recherches dans ce domaine pourrait aboutir à des solutions concrètes pour répondre aux enjeux de durabilité, de légèreté et de performance dans le secteur de la construction.

Références Bibliographiques :

1. Trouzine H, A. Asrom N, Asrom N, Belabdelouhab F, Long T. Problématique des Pneumatiques usagés en Algérie. *Revue Nature et Technologie*. 2011;5:28-35.
2. Conférence des Parties à la Convention de Bâle. Directives Techniques Révisées pour une Gestion Écologiquement Rationnelle des Pneus Usés. P52. Avril 2008.
3. Scrap Tire Recycling in Canada: From Scrap to Value/Recyclage des pneus hors d'usage au Canada: La transformation des pneus hors d'usage en produits à valeurs ajoutée. Available from: www.catraoline.ca/pdf/Recyc_2006_pneus.pdf
4. Guelmine L. Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures [thèse]. Alger: Université de Alger; 2017. p. 159.
5. ETRMA. European Tyre & Rubber Manufacturers' Association. Used Tyres Recovery 2010 [table] – UT/Part Worn Tyres/ELT's Europe – Volumes. 2010b.
6. Nguyen Thanh L. Le Pneusol : Recherches Réalisations – Perspectives [thèse]. Lyon: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon; 1993.
7. Adam MN. Propriétés des bétons. Paris: Eyrolles; 1998. p. 754.
8. Dreux G, Festa J. Nouveau guide de béton et de ses constituants. Paris: Eyrolles; 1998. p. 317.
9. Guelmine L. L'influence du rapport E/C et du mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques et de transfert d'humidité des mortiers de ciment durcis. Mémoire de Magister. Université de Laghouat; 2006. p. 86.
10. Baron J, Ollivier JP. Les Bétons: bases et données pour leur formulation. Paris: Eyrolles; 1998. p. 345.
11. Steneinour HH. The system CaO-SiO₂ –H₂O and the hydration of the calcium silicates. *Chem Rev*. 1947;40.
12. Powers TC. The physical structure and engineering properties of concrete. Portland Cement Association; 1958. p. 39.

13. Université de Sherbrooke. Cours de Durabilité et réparations du béton [Internet]. Disponible sur: www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/84
14. Olson RA, Jennings HM. Estimation of C-S-H in a blended cement paste using water adsorption. *Cement Concr Res.* 2000;31:351-356.
15. Provine A, Divet L-A, Fenouillet S, Randazzo V, Davy J-P. Impact de conditions de cycle de séchage et d'humidification sur la formulation différée d'étringite dans les bétons. *Mater Struct.* 2012;36:189-196.
16. Güneyisi E, Gesoğlu M, Özturan T. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement Concr Res.* 2004;34:2309–2317.
17. Khatib ZK, Bayomy FM. Rubberized portland cement concrete. *J Mater Civ Eng.* 2000;206-213.
18. Garros M. Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation [thèse]. Toulouse: Université Paul Sabatier; 2007.
19. Guelmine L. Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. *Constr Build Mater.* 2016;26(9):77-85.
20. Benazzouk A, Douzane O, Quéneudec T, Kint M. Transport of fluids in cement–rubber composites. *Cement Concr Compos.* 2004;26:21-29.
21. Guelmine L. Effect of magnetic treatment of mixing water on the behavior of cement-based materials: A review. *Mater Sci Poland.* 2023;41(2):1-17. doi:10.2478/msp-2023-001
22. Su N, Wu C-F. Effect of Magnetic Field Treated Water on Mortar and Concrete containing Fly Ash. *Cem Concr Compos.* 2003;25:681-688. doi:10.1016/S0958-9465(02)00098-7
23. Al-Safy RA. Employment of magnetic water treatment in construction. *J Eng Sustain Dev.* 2021;25:1-13. doi:10.31272/jeasd.25.4.1
24. Mohammadnezhad A, Azizi S, Farahani HS, Tashan J, Habibnejad Korayem AH. Understanding the magnetizing process of water and its effects on cementitious

- materials: A critical review. *Constr Build Mater.* 2022;356:129076. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129076
25. Malathy R, Narayanan K, Masilamani A, et al. Influence of magnetic water on concrete properties with different magnetic field exposure times. *Materials.* 2022;15:4291. doi:10.3390/ma15124291
26. Karthik DE, Mrudunayani P, Konda Babu SVV. Influence of magnetic water on self-compacting concrete using sulphate resisting cement. *Ann Chim Sci Mater.* 2019;43:347-352. doi:10.18280/acsm.430511
27. Esmailnezhad E, Choi HJ, Schaffie M, et al. Characteristics and applications of magnetized water. *J Clean Prod.* 2017;161:908-921. doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.166
28. Jouzdani BE, Reisi M. Effect of magnetized water characteristics on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Constr Build Mater.* 2020;242:118196. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118196
29. Yousry OMM, Metwally A, Abdallah. A study for improving compressive strength of cementitious mortar utilizing magnetic water. *Mater.* 2020;13:1971. doi:10.3390/ma13081971
30. Al-Safy R, Al-Mosawe A, Al-Mahaidi R. Utilization of magnetic water in cementitious adhesive for near-surface mounted CFRP strengthening system. *Constr Build Mater.* 2019;197:474-488. doi:10.1016/j.conbuild
31. Sevim O, Alakara EH, Demir I, et al. Effect of magnetic water on properties of slag-based geopolymer composites incorporating ceramic tile waste from construction and demolition waste. *Arch Civ Mech Eng.* 2023;23:107. doi:10.1007/s43452-023-00649-z
32. Ahmed HI. Behavior of magnetic concrete incorporated with Egyptian nano-alumina. *Constr Build Mater.* 2017;150:404-408. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.022
33. Youssf O, Swilam A, Tahwia AM. Performance of crumb rubber concrete made with high contents of heat pre-treated rubber and magnetized water. *J Mater Res Technol.* 2023;23:2160-2176. doi:10.1016/j.jmrt.2023.01.146

34. Ahmed AS, Elshikh MMY, Elemam WE, et al. Influence of mixing-water magnetization method on the performance of silica fume concrete. *Build.* 2023;13:44. doi:10.3390/buildings13010044
35. Ghorbani S, Gholizadeh M, Jorge de Brito. Effect of magnetized water on the mechanical and durability properties of concrete block pavers. *Materials.* 2018;11(9):1647.
36. Bharath S, Subraja S, Kumar A. Influence of magnetized water on concrete by replacing cement partially with copper slag. *J Chem Pharm Sci.* 2016;9(4):2791-2795.
37. Taghried IMA, Rabab MH, Abeer ABA, Mohammed EAO, Najla MRAA. Effect of magnetized water on workability and compressive strength of concrete. *Procedia Eng.* 2017;193:494-500.
38. Ghods A. A survey on the mechanical properties of magnetic self-compacting concrete containing nanosilica. *IRJABS.* 2014;8:413-418.
39. Hassan AF. Effect of magnetized water on the properties of cement mortars at the earlier ages. *Al-Qadisiya J Eng Sci.* 2008;1(1):95-108.
40. Soto-Bernal JJ, Gonzalez-Mota R, Rosales-Candelas I, Ortiz-Lozano JA. Effects of static magnetic fields on the physical, mechanical, and microstructural properties of cement pastes. *Adv Mater Sci.* 2015.
41. Abdel-Raouf M, Abou-Zeid MN. Properties of concrete incorporating magnetized water. *Transp Res Rec J Transp Res Board.* 2009;2113:62-71.
42. Normes Afnor : Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers. (1981-1997) :
 - o NF P 18-303 : Essais sur l'eau de gâchage.
 - o NF P 15-560 : Analyse granulométrique par tamisage. Octobre 1997.
 - o NF P 18-598 : Equivalent de sable. Octobre 1991.
 - o NF P 18-451 : Essai d'affaissement. Décembre 1981.
 - o XP P 18-540 : Granulats : définitions, conformité, spécification. Octobre 1997.
 - o NF P 18-555: Mesure de la masse volumique, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux. Décembre 1980.

- o NFP 18-400 : Moule pour éprouvettes cylindriques et prismatiques. Décembre 1981.
- o NFP 15-476 : Détermination de la finesse de ciment. Août 1990.
- o NFP 15-474 : Détermination quantitative des constituants de ciment. Février 1994.
- o NF P 15-573 : Détermination du temps de prise et de stabilité. Août 1995.
- o NF P 15-532 : Détermination de l'expansion de ciment. Août 1995.
- o NF P 15-471 : Détermination des résistances mécaniques. Août 1995.
- o NF P 18-558: Détermination de la masse volumique absolue des fines.
Décembre1990.
- o NF P 15-301 : Ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité. Juin1994.