

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université du 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : ANANI Roumayssa

**THEME : Effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc
sur le comportement des matériaux cimentaires**

Sous la direction de : Dr. BOUDJEDRA Fatiha

Juin 2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la foi, la force et la patience d'accomplir ce modeste travail, ainsi que la volonté et le courage, pour atteindre cette étape importante de notre vie.

J'exprime toutes mes reconnaissances et gratitude Madame BOUDJEDRA Fatima, ma promotrice de mémoire, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont grandement enrichi ma réflexion.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail.

Je tiens à remercier aussi l'ensemble du corps enseignant du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université du 8 mai 1945 de Guelma.

Enfin, j'exprime mes plus vifs et sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

DEDICACE

بسم الله الرحمن الرحيم، الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات
وبتوفيقه تنجز الغايات

*À celui qui a toujours été mon pilier, mon modèle,
mon cher père, ma fierté. Ton soutien moral et
psychologique m'a portée tout au long de mon parcours
universitaire. Qu'Allah te préserve et te comble de Sa
bénédiction.*

*À ma chère mère, source de tendresse et lumière de mon
cœur, dont les prières ont été la clé de ma réussite.
Qu'Allah te bénisse d'une longue vie, te récompense pour
tout ce que tu m'as donné, et t'accorde santé et bien-être.*

*À ma sœur bien-aimée Radja, ma complice de toujours, ma
joie et mon espoir dans les moments difficiles. Merci pour
ton soutien et tes encouragements constants.*

*À ma famille, mes proches et mes amies, et à tous ceux qui
me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*À ma chère Nada, mon amie de Master 2, qui m'a toujours
encouragée et à qui je souhaite encore plus de succès.*

À tous ceux que j'aime.

Merci !

ROUMAYSSA

RESUME

Résumé

L'utilisation massive des matériaux cimentaires fait de l'industrie de la construction le principal facteur de l'épuisement accéléré des ressources naturels. Pour atténuer l'impact environnemental, une solution prometteuse consiste à incorporer des déchets comme les pneus usagés dans ces matériaux cimentaires.

Cette approche présente un double bénéfice : elle permet de valoriser les pneus en caoutchouc, réduisant ainsi la pollution liée à leur abandon, tout en améliorant les propriétés techniques des matériaux de construction.

Le caoutchouc recyclé, sous diverses formes (poudre, granulés, copeaux, fibres), peut remplacer partiellement le ciment, le sable et le gravier. L'ajout des particules de caoutchouc rend le béton plus ductile, plus résistant aux chocs, et un meilleur isolant thermique et acoustique, tout en étant plus léger. Ces avantages sont particulièrement utiles pour les structures légères, les infrastructures exposées aux chocs (dynamiques ou sismiques), et celles qui nécessitent une bonne isolation sonore ou thermique.

Cependant, le principal défi est la faible adhérence entre le caoutchouc (hydrophobe et inerte) et la pâte de ciment. Cette mauvaise adhérence peut réduire les performances mécaniques des matériaux cimentaires. Pour résoudre ce problème, les recherches actuelles se concentrent sur la compréhension des interactions entre ces deux matériaux, et sur le développement de techniques pour améliorer leur liaison. Cela inclut le traitement de surface des granulats de caoutchouc, l'ajout d'agents d'adhérence ou l'optimisation des formulations.

C'est un domaine de recherche très dynamique et prometteur pour le développement des matériaux cimentaires plus écologiques, garantissant ainsi leur rôle durable dans la construction de demain.

Mots clés : Matériaux cimentaires, Déchets des pneus usagés, Recyclage des déchets, Valorisation des déchets, Propriétés physiques et mécaniques, Traitement des granulats de caoutchoucs.

ملخص

إن الاستخدام المكثف للمواد الأسمنتية يجعل من قطاع البناء المساهم الرئيسي في الاستنزاف المتسارع للموارد الطبيعية. للتخفيف من هذا التأثير البيئي، يبرز حل واعد يتمثل في دمج النفايات في هذه المواد الأسمنتية، مثل الإطارات المستعملة.

يقدم هذا النهج فائدة مزدوجة: فهو يسمح بإعادة تدوير إطارات المطاط، مما يقلل من التلوث المرتبط بالتخلص منها، وفي نفس الوقت يحسن الخصائص التقنية لمواد البناء.

يمكن أن يحل المطاط المعاد تدويره، بأشكاله المتنوعة (مسحوق، حبيبات، رقائق، ألياف)، محل جزء من الأسمنت والرمل والحصى. إن إضافة جزيئات المطاط يجعل الخرسانة أكثر مرونة، وأكثر مقاومة للصدمات، وأفضل عازل حراري وصوتي، مع كونها أخف وزناً. هذه المزايا مفيدة بشكل خاص للمنشآت الخفيفة، والبنى التحتية المعرضة للصدمات (الديناميكية أو الزلزالية)، وتلك التي تتطلب عزلاً صوتياً أو حرارياً جيداً.

ومع ذلك، يكمن التحدي الرئيسي في ضعف الالتصاق بين المطاط (الصاد الماء والخامل) وعجينة الأسمنت. يمكن أن يؤدي ضعف الالتصاق إلى تقليل الأداء الميكانيكي للمواد الأسمنتية.

لحل هذه المشكلة، تركز الأبحاث الحالية على فهم التفاعلات بين هاتين المادتين، وعلى تطوير تقنيات لتحسين ترابطهما. يتضمن ذلك معالجة سطح حبيبات المطاط، إضافة عوامل الالتصاق أو تحسين التركيبات.

يعد هذا المجال البحثي حيويًا وواعدًا للغاية لتطوير مواد أسمنتية صديقة للبيئة، مما يضمن دورها المستدام في بناء منشآت المستقبل.

كلمات البحث: المواد الإسمنتية، نفايات الإطارات المستعملة، إعادة التدوير النفايات، تجميع النفايات، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، معالجة حبيبات المطاط.

Abstract

The widespread use of cementitious materials makes the construction industry a major contributor to the accelerated depletion of natural resources. To mitigate this environmental impact, a promising solution involves incorporating waste materials, such as used tires, into these cementitious materials.

This approach offers a dual benefit: it allows for the valorization of rubber tires, thereby reducing pollution associated with their disposal, while simultaneously improving the technical properties of construction materials.

Recycled rubber, in various forms (powder, granules, chips, fibers), can partially replace cement, sand, and gravel. The addition of rubber particles makes concrete more ductile, more shock-resistant, and a better thermal and acoustic insulator, all while being lighter. These advantages are particularly useful for lightweight structures, infrastructures exposed to impacts (dynamic or seismic), and those requiring good sound or thermal insulation.

However, the main challenge is the poor adhesion between rubber (which is hydrophobic and inert) and cement paste. This poor adhesion can reduce the mechanical performance of cementitious materials. To address this issue, current research focuses on understanding the interactions between these two materials and on developing techniques to improve their bond. This includes surface treatment of rubber aggregates, the addition of adhesion agents, or the optimization of mix designs.

This is a very dynamic and promising research area for the development of more eco-friendly cementitious materials, thus ensuring their sustainable role in the construction of tomorrow.

Key words: Cementitious materials, Waste tires rubber, Waste recycling, Waste valorization, Physical and mechanical properties, Rubber aggregate treatment.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
 Chapitre I : Généralités sur les matériaux cimentaires	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les matériaux cimentaires.....	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Le matériau béton.....	4
I.2.2.1 Définition.....	4
I.2.2.2 Avantages.....	4
I.2.2.3 Inconvénients.....	4
I.2.2.4 Types des bétons..... ;;	4
I.2.3 Le mortier.....	7
I.2.3.1 Définition.....	7
I.2.3.2 Types des mortiers.....	8
I.3 Composants des matériaux cimentaires.....	9
I.3.1 Le ciment.....	9
I.3.1.1 Définition.....	9
I.3.1.2 Les constituants du ciment.....	9
I.3.1.3 Les types de ciments courants.....	11
I.3.1.4 Les classes de résistance des ciments courants.....	11
I.3.2 Les granulats.....	12
I.3.2.1 Définition... ;;;.....	12
I.3.2.2 Différents type de granulats.....	12
I.3.3 Eau de gâchage	13
I.3.3.1 Définition.....	13
I.3.4 Les adjuvants.....	13
I.3.4.1 Définition.....	13
I.3.4.2 Classification des adjuvants	13
I.3.5 Les additions	14
I.3.5.1 Définition.....	14

I.4	Caractéristiques des matériaux cimentaires	15
I.4.1	A l'état frais	15
I.4.1.1	Ouvrabilité.....	15
I.4.2	A l'état durci	16
I.4.2.1	Résistance mécanique	16
I.4.2.2	Porosité.....	17
I.4.2.3	Essai non destructif.....	17
I.4.2.3	Durabilité du béton.....	18
I.5	Conclusion	19

Chapitre II : Déchets des pneus usagés

II.1	Introduction	20
II.2	Les déchets.....	20
II.2.1	Définition.....	20
II.2.2	Les lois algériennes concernant les déchets.....	20
II.2.3	Différents types des déchets.....	21
II.2.3.1	Déchets inertes.....	21
II.2.3.2	Les déchets ménagers et assimilés.....	21
II.2.3.3	Déchets organiques ou déchet l'assainissement.....	21
II.2.3.4	Déchets ultime.....	22
II.2.3.5	Déchets radioactifs.....	22
II.2.3.6	Déchets industriels	22
II.2.4	L'impacts environnementaux des déchets.....	23
II.2.4.1	L'impact sur la pollution du l'air.....	23
II.2.4.2	L'impact sur la pollution du l'eau.....	23
II.2.4.3	L'impact sur la pollution du sol.....	23
II.2.5	La gestion de déchets.....	23
II.2.6	Valorisation des déchets.....	24
II.3	Différents déchets utilisés dans l'élaboration des matériaux cimentaires.....	24
II.3.1	Ciment durci	25
II.3.2	Déchets de démolition	25
II.3.3	Déchets de verre.....	26

II.3.4	Cendres volantes.....	26
II.3.5	Déchets plastiques	26
II.3.6	La boue rouge	27
II.3.7	Les briques	27
II.3.8	Laitier de haut fourneau.....	28
II.3.9	Laitier d'acier.....	28
II.3.10	Déchets de caoutchouc.....	29
II.4	Le matériau caoutchouc.....	30
II.4.1.	Définition.....	30
II.4.2	Mode de fabrication du caoutchouc naturel.....	30
II.4.3	Production de granulats en caoutchouc naturel.....	30
II.4.4	Propriétés du matériau caoutchouc.....	30
II.4.4.1	Élasticité	31
II.4.4.2	Résistance à l'abrasion	31
II.4.4.3	Résistance aux produits chimiques	31
II.4.4.4.	Isolation électrique	31
II.4.4.5	Étanchéité.....	31
II.4.4.6	Absorption des vibrations	31
II.4.5	Provenance des déchets de caoutchouc.....	31
II.4.6	Structure d'un pneu.....	32
II.4.7	Utilisations des pneus usagés en Algérie.....	33
II.4.8	Recyclages des pneus usagés.....	34
II.4.8.1	Étapes de recyclage des pneus usagées.....	35
II.4.9	Valorisation des pneus usagés.....	37
II.5	Conclusion.....	37

Chapitre III : Valorisation des déchets pneus usagés dans les matériaux cimentaires

III.1	Introduction.....	38
III.2	Définitions et formes de valorisation.....	38
III.2.1	Valorisation des pneus usagés.....	38
III.2.1.1	Valorisation énergétique.....	38

III.2.1.2	La valorisation sous forme des matières premières.....	38
a.	Rechapage.....	39
b.	Pneus entiers.....	40
c.	Poudrette de caoutchouc.....	40
d.	Granulats de caoutchouc	41
III.3	Valorisation des déchets pneus usées dans les matériaux cimentaire.....	43
III.4	Synthèse sur les travaux étudiés.....	49
III.5	Conclusion.....	51

Chapitre IV : Influence des déchets des pneus usagées sur les propriétés des matériaux cimentaire

IV.1	Introduction.....	52
IV.2	Influence de l'Incorporation des déchets des pneus usagées sur les propriétés des matériaux cimentaires.....	52
IV.2.1	La substitution des granulats naturels par les granulats de caoutchouc des pneus usagées.....	52
IV.2.1.1	Etats frais.....	52
a.	Ouvrabilité.....	52
b.	La masse volumique.....	56
c.	Teneur en air.....	57
IV.2.1.2	Etat durcis.....	59
a.	Résistance à la compression.....	59
b.	Résistance à la flexion.....	62
c.	Résistance à la traction.....	64
d.	Module d'élasticité.....	66
e.	Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV).....	67
f.	Porosité.....	69
g.	Masse volumique.....	70
h.	La conductivité thermique.....	72
i.	Pénétration aux ions de chlorure.....	72
j.	Résistance à l'abrasion.....	73
k.	Résistance à la fracture.....	74

IV.2.2	La substitution des ciments par les poudres de caoutchouc des pneus usagées.....	75
	a. Etat frais.....	75
	a. Ouvrabilité.....	75
	b. Teneur en air.....	76
	c. Poids unitaire.....	77
IV.2.2.2	Etat durcis.....	77
	a. Résistance à la compression.....	77
	b. Résistance à la flexion.....	79
	c. Résistance à la traction.....	81
	d. Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV).....	81
	e. Le module d'élasticité.....	82
	f. Poids unitaire.....	84
IV.3	Amélioration des propriétés des matériaux cimentaires à base des granulats de caoutchouc.....	85
IV.3.1	Le traitement de surface des granulats de caoutchouc.....	86
IV.3.3	Utilisation d'additifs dans la pâte de ciment	87
IV.3.3	Méthode combinée.....	90
IV.4	Conclusion.....	93
	Conclusion générale	94
	Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1.	Béton ordinaire.....	5
Figure I.2.	Béton Autoplaçant.....	5
Figure I.3.	Béton léger.....	6
Figure I.4.	Mortier.....	7
Figure I.5.	Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams.....	15
Figure I.6.	Mesure de l'étalement d'un mortier.....	15
Figure I.7.	Essai de compression.....	16
Figure I.8.	Appareil d'essai de scléromètre.....	17
Figure I.9.	Appareille d'essai ultrasonique.....	18
Figure II.1.	Hierarchie de gestion des déchets	24
Figure II.2.	Ciment durci.....	25
Figure II.3.	Déchets de démolition.....	25
Figure II.4.	Déchets de verres.....	26
Figure II.5.	Déchets de plastiques.....	27
Figure II.6.	Boues rouges.....	27
Figure II.7.	Briques en terre cuite.....	28
Figure II.8.	Laitier de haut fourneau.....	28
Figure II.9.	Laitier d'acier.....	29
Figure II.10.	Déchets de caoutchouc.....	29
Figure II.11.	Coupe transversale d'un pneu.....	32
Figure II.12.	Recyclage de pneus.....	34
Figure II.13.	Collecte et faire le tri de pneus.....	35
Figure II.14.	Machine de recyclage de pneus.....	35
Figure II.15.	Récupération de l'acier (Séparation).....	36
Figure II.16.	Les tailles différentes des déchets caoutchouc.....	36
Figure III.1.	Schéma d'une filière de valorisation matière.....	39
Figure III.2.	Bandes de roulement	38
Figure III.3.	Technique de Pneu sol.....	40
Figure III.4.	Poudrette de caoutchouc.....	41
Figure III.5.	Granulats de caoutchouc.....	41

Figure III.6.	Enrobés routiers.....	42
Figure III.7.	Gazons synthétiques.....	42
Figure III.8.	Aire de jeux.....	42
Figure III.9.	Sol équestre.....	42
Figure III.10.	Quelques formes des déchets des pneus usagés utilisé dans les matériaux cimentaires	50
Figure IV.1.	Influence des GC sur l'affaissement des bétons.	53
Figure IV.2.	Influence des GC sur l'affaissement des bétons.	53
Figure IV.3.	Effet du taux de remplacement des GC sur l'affaissement des bétons.....	54
Figure IV.4.	Influence des GC sur l'étalement des BAP.....	55
Figure IV.5.	Influence des GC sur l'affaissement des mortiers.	55
Figure IV.6.	Influence des GC sur la masse volumique des bétons à l'état frais.....	56
Figure IV.7.	Influence des GC sur la masse volumique des bétons à l'état frais.....	57
Figure IV.8.	Influence du GC sur la teneur en air.....	57
Figure IV.9.	Effet du taux d'incorporation des GC sur la teneur en air des BAP	58
Figure IV.10.	Influence des GC sur la teneur en air du mortier.....	59
Figure IV.11.	Influence des GC sur la résistance à la compression des bétons.	60
Figure IV.12.	Influence des GC sur la résistance à la compression des bétons.....	60
Figure IV.13.	Zone de transition interfaciale entre la « pâte de ciment et GC et GN »....	61
Figure IV.14.	Influence des GC sur la résistance en compression des mortiers.....	61
Figure IV.15.	Influence des GC sur la résistance en compression des mortiers.	62
Figure IV.16.	Influence des GC sur la résistance à la flexion des bétons	63
Figure IV.17.	Influence des GC sur la résistance à la flexion des bétons autoplaçants.. ..	63
Figure IV.18.	Influence des GC sur la résistance à la flexion des mortiers	64
Figure IV.19.	Influence des GC sur la résistance à la traction des bétons	65
Figure IV.20.	Influence des GC sur la résistance à la traction des mortiers.....	65
Figure IV.21.	Influence du GC sur le module d'élasticité.....	66
Figure IV.22.	Influence du GC sur le module d'élasticité dynamique.....	67
Figure IV.23.	Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des bétons.....	67
Figure IV.24.	Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des bétons.....	68
Figure IV.25.	Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des BAP.....	68
Figure IV.26.	Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des mortiers...	69

Figure IV.27.	Influence du GC sur la porosité des bétons.....	70
Figure IV.28.	Influence du GC sur le poids unitaire des bétons.....	71
Figure IV.29.	Influence du GC sur le poids unitaire des mortiers.....	71
Figure IV.30.	Influence du GC sur la conductivité thermique des bétons.....	72
Figure IV.31.	Influence du GC sur la profondeur de pénétration des chlorures.....	73
Figure IV.32.	Influence du GC sur la perte de poids après attaque d'acide.....	73
Figure IV.33.	Influence du GC sur le type de rupture.....	74
Figure IV.34.	Détails d'une section fissurée pour une poutre caoutchoutée.....	75
Figure IV.35.	Influence de l'entraînement d'air sur l'affaissement du composite contenant des PC.....	76
Figure IV.36.	Influence du PC sur la résistance à la compression des BAP	77
Figure IV.37.	Influence du PC sur la résistance à la compression.....	78
Figure IV.38.	Influence du PC sur la résistance à la compression, à chaque âge d'essai...	78
Figure IV.39.	Influence du PC sur la résistance à la compression des pâtes de ciment. ..	79
Figure IV.40.	Influence du PC sur la résistance à la flexion des pâtes de ciment	80
Figure IV.41.	Influence du PC sur la résistance à la flexion des pâtes de ciment.....	80
Figure IV.42.	Influence du PC sur la résistance à la traction des pâtes de ciment	81
Figure IV.43.	Influence du PC sur UPV des BAP.....	82
Figure IV.44.	Influence du PC sur le module d'élasticité.....	82
Figure IV.45.	Influence du PC sur le module d'élasticité.....	83
Figure IV.46.	Influence du PC sur le module d'élasticité dynamique	83
Figure IV.47.	Influence du PC sur le poids unitaire des pâtes de ciments.....	84
Figure IV.48.	Image optique de la distribution discontinue des vides d'air dans les composites.....	85
Figure IV.49.	Microstructure du béton avec caoutchouc.....	91
Figure IV.50.	Microstructure du béton avec caoutchouc modifié (a) matrice de ciment avec particule de caoutchouc modifié.....	92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1.	Classes de résistance des ciments à la compression	11
Tableau III.1.	Résumé des différentes recherches dans le domaine de l'utilisation des déchets des pneus usagés dans les matériaux cimentaires.....	44

INTRODUCTION

GENERALE

Les matériaux cimentaires sont omniprésents à l'échelle mondiale. Bien plus qu'une simple combinaison d'éléments, ils représentent une famille de matériaux essentiels qui évoluent sans cesse, jouant un rôle crucial dans la construction et l'aménagement de notre environnement. Leur succès s'explique par une combinaison de facteurs : des performances mécaniques initiales élevées, un coût abordable et un procédé de fabrication simple, les rendant ainsi incontournables dans le secteur du bâtiment.

Cependant, face à l'épuisement des gisements naturels de granulats et aux difficultés d'ouvrir de nouvelles carrières, il est impératif de trouver de nouvelles sources d'approvisionnement. C'est pourquoi le secteur de la construction intègre de plus en plus de déchets et de sous-produits comme matières premières secondaires. Cette démarche vise à créer des matériaux innovants dotés de propriétés spécifiques ou améliorées par rapport aux matériaux traditionnels. L'objectif est double : préserver les ressources naturelles (notamment les granulats) et répondre aux enjeux économiques et environnementaux grâce au réemploi et au recyclage des déchets.

Les pneus usagés représentent une ressource potentielle significative pour le génie civil. Ces déchets de caoutchouc posent actuellement des problèmes environnementaux et économiques majeurs. Toutefois, l'évolution des législations sur leur stockage a stimulé de nombreuses initiatives de valorisation, notamment dans le domaine des matériaux de construction.

Ce travail vise à mieux comprendre les déchets de pneus usagés et à examiner l'impact de l'intégration de particules de caoutchouc sur le comportement des matériaux cimentaires. Nous soulignerons les bénéfices environnementaux ainsi que les effets sur les propriétés mécaniques et physiques des matériaux cimentaires.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres, suivis d'une conclusion :

Le premier chapitre pose les bases en présentant les matériaux cimentaires dans leur globalité comme les bétons et les mortiers. On y détaillera leur composition, leurs propriétés et les divers types existants.

Le deuxième chapitre explore les différents types de déchets employés en génie civil, avec un accent particulier sur les déchets de pneus usagés. Il décrira leur nature, leur structure, leur impact environnemental (avantages et inconvénients), ainsi que les méthodes de recyclage actuelles.

Le troisième chapitre s'articule autour de la valorisation des déchets de pneus dans les matériaux cimentaires. Il abordera les différentes méthodes de valorisation et les diverses formes d'utilisation de ces déchets. Une synthèse des travaux antérieurs dans ce domaine sera ensuite proposée.

Le quatrième chapitre sera dédié à l'influence de l'incorporation de ces déchets sur les propriétés des matériaux cimentaires, en s'appuyant sur les études antérieures. Ce chapitre se clôturera par une présentation des différentes méthodes visant à améliorer les propriétés des matériaux cimentaires à base des particules de caoutchouc.

Enfin, une conclusion générale tirée de ce travail sera présentée en fin de mémoire. Elle fera la synthèse de cette revue bibliographique, mettant en lumière la faisabilité d'utiliser les déchets de pneus dans les matériaux cimentaires.

CHAPITRE I

Généralité sur les matériaux cimentaires

I.1. Introduction

Les matériaux cimentaires figurent parmi les matériaux les plus utilisés au monde. Loin d'être une simple combinaison d'éléments, ils représentent une famille de matériaux essentiels, en constante évolution, qui jouent un rôle fondamental dans la construction et l'aménagement de notre monde. Cependant, leur production et leur utilisation intensive par l'industrie de la construction, premier consommateur de ressources naturelles telles que le gravier et l'eau, entraînent un épuisement rapide de ces dernières. Il est donc impératif de trouver des solutions pour atténuer cette problématique environnementale majeure.

I.2. Les matériaux cimentaires

I.2.1. Définition

Les matériaux cimentaires (bétons et mortiers) sont les matériaux les plus utilisés mondialement dans le secteur de la construction, englobant les bâtiments, les ouvrages d'art et les travaux publics, etc. Ce sont eux qui façonnent en grande partie notre environnement. [1]

Comme leur nom l'indique, le ciment est le composant essentiel des matériaux cimentaires. C'est un liant hydraulique qui, mélangé à de l'eau, subit une réaction chimique appelée hydratation, le transformant en une pâte dure et résistante. Il assure une fonction mécanique en liant le squelette granulaire, mais il est également largement responsable de la durabilité à long terme du matériau cimentaire. [2]

Ils sont caractérisés par des propriétés principales peuvent être divisées en :

- **Propriétés physiques** : la densité ; la masse volumique, la porosité, l'absorption, la perméabilité, le retrait (le gonflement) ...etc ;
- **Propriétés chimiques** : qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif (Corrosion chimique, l'attaque de l'acide, ...etc.) ;
- **Propriétés mécaniques** : qui reflètent le comportement des matériaux déformés par les forces (Résistance en compression, en traction, en flexion, torsion ...etc.) ;
- **Propriétés thermiques** : la dilatation, la résistance et comportement au feu, ...etc. [3]

I.2.2. Le matériau béton

I.2.2.1. Définition

Grâce à ses nombreux avantages techniques et économiques, le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde du génie civil. Il s'agit d'un matériau hétérogène composé de ciment, de l'eau et des granulats (sables et graviers). D'autres éléments - adjuvants et additions - peuvent être ajoutés pour permettre modifier les propriétés physiques et mécaniques du mélange. Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants.

C'est un matériau clé dans la construction. Il est largement utilisé dans le bâtiment (logements, bureaux, hôpitaux) et les travaux publics (ponts, tunnels, barrages, routes). Sa robustesse et sa durabilité le rendent indispensable pour des ouvrages spécifiques tels que les structures offshore et les centrales nucléaires.... [4]

I.2.2.2. Avantages

Le béton est un matériau polyvalent qui peut être moulé dans une grande variété de formes, qu'elles soient imposantes ou délicates. Il est économique, simple à produire et nécessite peu d'entretien. Une fois durci, il devient extrêmement résistant, comparable à la pierre. Il offre une excellente tenue face au feu et aux contraintes mécaniques habituelles. Son association avec l'acier ouvre la voie à des structures solides et diversifiées, convenant à une large gamme de constructions.

I.2.2.3. Inconvénients

Malgré ses nombreux atouts, le béton présente quelques inconvénients, tels que sa faible résistance à la traction, ce qui nécessite souvent son association avec du ferrailage. Son isolation thermique est peu performante, ce qui peut entraîner des pertes énergétiques. Sa mise en œuvre exige l'utilisation de coffrages, augmentant ainsi la complexité et le coût du chantier. Enfin, il a un impact environnemental notable en raison de la difficulté et du coût de sa démolition et de son recyclage limité. [5]

I.2.2.4. Types des bétons

➤ Béton ordinaire :

Le béton ordinaire est un ensemble obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants, dans des proportions spécifiques.

C'est un matériau de construction fondamental, économique et polyvalent pour de nombreuses applications où une résistance élevée à la traction n'est pas primordiale. C'est la base à partir de laquelle des bétons plus spécialisés, comme le béton armé ou le béton haute performance, sont développés pour répondre à des besoins structurels plus complexes. [6]



Figure I.1 : le béton ordinaire

La résistance à la compression du béton ordinaire à 28 jours est généralement entre 20 MPa à 40 MPa, voire plus rarement 50 MPa, selon la classe spécifiée. [7]

➤ **Béton autoplaçant (BAP)**

Les BAP se caractérisent par leur hyperfluidité qui permet une mise en place sous le seul effet de la gravité sans recours à la vibration même dans des coffrages très ferrailés. Ils ont des compositions granulométriques fortement chargées en éléments fins. Des adjuvants de type superplastifiants ou plastifiants réducteur d'eau sont utilisés systématiquement.[8]



Figure I.2 : Béton Autoplaçant

➤ **Béton à Haute Performance**

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP) grâce à l'emploi de ultra-fines (essentiellement fumées de silice) et de superplastifiants.[8]

Leur forte compacité leur assure une durabilité exceptionnelle et, combinée à leur haute résistance, les rend idéaux pour les ouvrages fortement sollicités (à court et long terme) ou exposés à des environnements agressifs.[4]

➤ **Béton léger :**

L'avantage principal des bétons légers réside dans la réduction significative du poids propre de la structure. Les bétons légers présentent des masses volumiques allant de 800 à 2000 kg/m³, contre 2000 à 2600 kg/m³ pour un béton classique. Ils sont obtenus en modifiant la composition (bétons caverneux) ou en utilisant des matériaux allégés (tels que l'argile expansée, le polystyrène expansé ou le liège). On peut également créer des vides par une réaction chimique provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire. [4]

Il se révèle efficace pour l'ensemble des travaux de rénovation, tout en offrant une bonne résistance aux chocs et une isolation thermique performante. [9]



Figure I.3: le béton léger

➤ **Béton de recyclage**

Un enjeu majeur du génie civil est de diminuer la surconsommation de granulats naturels non renouvelables et de gérer l'élimination croissante des déchets.

La solution passe par un remplacement même partiel des granulats naturels par des granulats recyclés issus des déchets. [10]

Différents types de déchets sont utilisés pour la production du béton de recyclage à des fins différentes telles que le remplacement des granulats, le remplacement partiel du ciment, ... etc. les déchets sont divisés en matériaux réactifs (Cendres volantes, Fumée de silice, pouzzolane d'argile calcinée, Laitier de haut fourneau) et inertes (déchets de construction et de démolition, déchets de marbre, déchets plastiques, déchets des pneus usagés ...etc.). [11]

I.2.3. Le mortier

I.2.3.1. Définition

Le mortier est un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux), d'eau et parfois d'adjuvants, dont les proportions varient selon l'application. [12]



Figure I.4 : Mortier.

C'est un matériau de construction que l'on utilise pour :

- Assurer la liaison et la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, garantissant ainsi la solidité monolithique de l'ouvrage.
- Protéger les constructions contre l'humidité provenant des intempéries ou remontant du sol.
- Constituer des chapes d'usure, notamment pour les dallages en béton.
- Être le constituant essentiel du béton.
- Consolider certains sols de fondation sous forme d'injection.[13]

I.2.3.2. Types des mortiers

Il est essentiel de comprendre qu'il existe divers types de mortiers, chacun étant plus ou moins adapté selon l'usage prévu.

➤ Selon leurs matériaux primaires

a. Mortier ciment

Il est constitué d'un mélange de ciment, sable et eau. Il est utilisé pour bâtir des murs, lier des pierres et des briques entre elles...etc. Grâce à sa résistance et son séchage rapide, ce mortier est idéal pour obtenir une surface rugueuse et corriger les défauts.

b. Mortier de chaux

Obtenu à partir d'un mélange de sable et de chaux. Il permet aux murs et matériaux de construction naturels de respirer. Il dispose de capacités hydrofuges idéales pour les pièces d'eau et se révèle plus flexible et onctueux. En revanche, il est moins résistant que le ciment et plus difficile à doser.

c. Mortier bâtard

Il est fabriqué avec un mélange chaux et ciment. L'ajout de chaux à un mortier ciment améliore sa maniabilité et réduit le risque de fissures, tandis que le ciment renforce sa résistance et accélère le durcissement du mortier de chaux.

➤ Selon la fonction et l'utilité des mortiers

a. Mortier colle

C'est un mortier adhésif qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol. Il est produit avec du ciment et des polymères particuliers qui lui confèrent ses propriétés d'adhérence.

b. Mortier de jointoiement

Il est utilisé pour réaliser des joints de pavés entre différents types de revêtement sol extérieur et intérieur (pavés, brique, pierre...). Il est constitué d'un mélange de sable et de ciment.

c. Mortier hydrofuge

Il s'agit d'un mortier résistant à l'eau ce qui en fait l'allié idéal des espaces humides (salle de bain ou en extérieur pour réaliser des joints de piscine). C'est un mortier courant à base de ciment ou de chaux, enrichi d'adjuvants chimiques et de résine.

d. Mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux hautes températures. Il est conçu spécifiquement pour les ouvrages soumis à des chaleurs extrêmes, comme les cheminées et les barbecues en maçonnerie.

e. Mortier de scellement

C'est un mortier constitué de ciment et résine qui se destine au calage et scellement à haute résistance. Il sert souvent à la fixation d'éléments dans le béton, ainsi qu'au calage de machines industrielles et de gros équipements. [14]

I.3. Les composants des matériaux cimentaires**I.3.1. Le ciment****I.3.1.1. Définition**

Le ciment, un liant hydraulique, est une fine matière inorganique qui, additionnée d'eau, subit une réaction d'hydratation pour former une pâte qui prend et durcit, conservant sa solidité et sa stabilité même en milieu aquatique. Les ciments sont donc des liants hydrauliques formés de constituants anhydres cristallisés ou vitreux, renfermant pour l'essentiel de la silice (SiO_2), de la chaux (CaO) ainsi que de l'alumine (Al_2O_3). En se combinant avec l'eau, ces constituants forment des silicates et des aluminates de calcium hydratés solides et stables.[15]

I.3.1.2. Les constituants du ciment**➤ Clinker (K)**

Le Clinker est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile fixé avec précision (de 80 % de calcaire et 20% d'argile) et contenant des proportions visées de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et F_2O_3 . Le clinker entre dans la composition de tous les ciments courants.

➤ **Laitier granulé de haut fourneau (S)**

Le laitier granulé de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau, obtenu par refroidissement rapide de la scorie en fusion. Sa capacité à être utilisé comme constituant du ciment dépend de la présence de propriétés hydrauliques latentes.

➤ **Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q)**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques.

➤ **Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)**

Ce sont des particules pulvérulentes récupérées par dépoussiérage (électrostatique ou mécanique) des fumées des chaudières brûlant du charbon pulvérisé.

➤ **Schistes calcinés (T)**

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzalaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières.

➤ **Calcaires (L)**

Les calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium – CaCO_3 – supérieure à 75 %.

➤ **Fumées de silice (D)**

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ $1\ \mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Ces fumées proviennent du processus de réduction du quartz de haute pureté par le charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour fabriquer du silicium et des alliages de ferrosilicium.

➤ **Sulfate de calcium**

L'ajout d'une faible quantité de sulfate de calcium, souvent du gypse, est nécessaire pendant la production du ciment pour réguler le temps de prise.

➤ **Constituants secondaires**

Ce sont des matériaux minéraux naturels ou artificiels, dont la proportion dans le ciment ne doit pas dépasser 5 % du poids total du ciment.

➤ Additifs

Utilisés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment, les additifs (hors pigments) sont limités à 1 % de la masse totale du ciment.

La proportion des additifs organiques, sous forme d'extrait sec, doit être inférieure ou égale à 0,5 % en masse de ciment. [16]

I.3.1.3. Les types des ciments courants

Il existe cinq types de ciments courants qui sont :

- **CPA - CEM I** : pour le Ciment Portland,
- **CPJ - CEM II/A ou B** : pour le Ciment Portland Composé,
- **CHF - CEM III/A ou B et CLK - CEM III/C** : pour le Ciment de Haut Fourneau,
- **CPZ - CEM IV/A ou B** : pour le Ciment Pouzzolanique,
- **CLC - CEM V/A ou B** : pour le Ciment au Laitier et aux Cendres. [16]

I.3.1.4. Les classes de résistance des ciments courants

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa. Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau suivant.

Pour chaque classe de résistance courante, deux classes de résistance à court terme sont définies, une classe avec résistance à court terme ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec résistance à court terme élevée (indiquée par la lettre R). [16]

Tableau I.1: Classes de résistance des ciments à la compression (NF EN 196-1) [16]

Résistance à la compression (en MPa)				
Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme a		Résistance courante à 28 jours	
	2jours	7jours		
32.5 N	-	≥16	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥10	-		
42.5 N	≥10	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≥20	-		
52.5 N	≥20	-	≥52.5	-
52.5 R	≥30	-		

I.3.2. Les granulats

I.3.2.1. Définition

Les granulats sont des matériaux granulaires issus de roches dures ou meubles qui une fois agglomérés par le ciment constituent le squelette du béton. Ils sont constitués par un ensemble de grains minéraux appelés fines, sables et gravillons suivant leurs dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Ils sont caractérisés par leur granulométrie qui consiste à déterminer la distribution des différents diamètres des grains qui composent le granulat. Ils sont classés en fonction de la dimension des grains : 0/5, 3/8, 5/15, 15/25. Ils doivent être de bonne qualité et exempts d'impuretés. [17]

Les granulats de bonne qualité offrent les avantages suivants :

- Résistance mécanique plus élevée ;
- Meilleure durabilité ;
- Stabilité volumique en présence d'humidité, d'où un effet favorable sur le retrait du béton (réduction) ;
- Absorption d'une partie de la chaleur d'hydratation, d'où un effet régulateur sur le processus de prise. [18]

I.3.2.2. Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

- **Naturel** : D'origine minérale, ils proviennent de roches meubles (alluvions) ou massives (éruptives, calcaires, métamorphiques) et n'ont subi que des transformations mécaniques (concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : Ces granulats minéraux sont issus de processus industriels avec transformations thermiques, comme les sous-produits industriels et les granulats réfractaires.
- **Recyclé** : Ils sont obtenus par le traitement de matériaux inorganiques issus de la construction, comme les bétons de démolition ou les structures de chaussées. [19]

I.3.3. Eau de gâchage

I.3.3.1. Définition

L'eau est l'un des ingrédients des bétons, on pourrait même dire qu'il est le plus important avec le ciment. En effet, l'eau de gâchage accomplit deux fonctions :

- **Une fonction physique** qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide pour assurer l'ouvrabilité et la mise en place correcte du béton frais ;
- **Une fonction chimique** qu'elle contribue au développement de réaction dite hydratation [20].

La qualité de l'eau de gâchage impacte la prise, la résistance du béton et la corrosion des armatures. Elle doit être exempte de matières en suspension, de débris végétaux, etc. Elle doit être incolore et inodore. L'eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai. [17]

I.3.4. Les adjuvants

I.3.4.1. Définition

Les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons (de 0.2 à 2% de la masse de ciment). Ces composés organiques, spécialement conçus pour le béton et disponibles en solutions aqueuses, sont utilisés pour améliorer certaines caractéristiques du matériau. C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement.[21]

I.3.4.2. Classification des adjuvants

Ils sont classés suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories :

➤ **Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité :**

Ils agissent sur le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et modifient la viscosité. (plastifiants-réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants);

➤ **Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement :**

Ces adjuvants chimiques modifient la solubilité et surtout la vitesse de dissolution des composants des ciments. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution du seuil de

cisaillement dans le temps, en fonction de l'adjuvant utilisé (accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise).

➤ **Les adjuvants modifiant certaines propriétés particulières :**

Entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse. [16]

I.3.5. Les additions

I.3.5.1. Définition

Ces ajouts minéraux sous forme de poudre fine permettent d'améliorer l'ouvrabilité du béton frais et d'optimiser les caractéristiques mécaniques et la compacité du béton durci. Certaines additions permettent de réduire la chaleur d'hydratation lors de la prise et du durcissement du béton. Contrairement aux adjuvants, les additions sont toujours incorporées au béton en quantités suffisamment importantes. [18]

Parmi les principales additions on peut citer :

➤ **Additions inertes**

- **Farines de calcaire et de quartz** : Elles complètent et améliorent le mélange granulaire du béton grâce à la finesse et à la forme de leurs grains, ainsi qu'à leur granularité.
- **Fibres** : sont généralement classées en trois groupes : les fibres d'acier, les fibres synthétiques et les fibres de verre.
- **Pigments minéraux** : sont utilisés pour colorer le béton et le mortier.

➤ **Additions pouzzolaniques :**

Le principe d'action des additions pouzzolaniques est d'accroître la résistance du béton et réduisent sa porosité, ce qui améliore la durabilité (Cendre volante de houille, Fumée de silice, Pouzzolane naturelle).

➤ **Additions hydrauliques latentes :**

Certaines additions sont dites hydrauliques latentes car, elles réagissent et durcissent lentement en formant des composés analogues aux hydrates du ciment, mais de manière beaucoup moins rapide (Laitier granulé de haut-fourneau).

➤ **Additions pouzzolaniques et hydrauliques :**

Composé de différents éléments anorganiques, lesquels présentent à la fois des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques (Schiste calciné). [16]

I.4. Caractéristiques des matériaux cimentaires

Deux aspects fondamentaux doivent être pris en compte concernant les matériaux cimentaires:

I.4.1. L'état frais

Il se caractérise par un état foisonné lors du malaxage (mélange de solides en suspension dans l'eau) et un état compacté une fois mis en œuvre dans son coffrage. [22]

I.4.1.1. Ouvrabilité

C'est la propriété la plus importante d'un matériau cimentaire. On peut définir cette caractéristique comme l'effort nécessaire pour manipuler une quantité de matériau frais avec un minimum de perte d'homogénéité. L'ouvrabilité ou la maniabilité englobe plusieurs propriétés interdépendantes, comme la consistance, la viscosité (cohésion interne), la tendance à la ségrégation et la plasticité. Elle résulte du frottement interne de l'ensemble des particules solides suspendues dans l'eau de gâchage.

Bien que la classe des granulats et la proportion des matériaux jouent un rôle important, c'est la teneur en eau qui détermine les valeurs finales de l'ouvrabilité. [18]

Les essais utilisés pour déterminer l'ouvrabilité sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2) pour le béton courant et l'essai de la table à secousses (essai d'étalement) pour le mortier, selon la norme EN 1015-3.



Figure I.5 : Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams. [18]



Figure I.6 : Mesure de l'étalement d'un mortier

I.4.2. L'état durci

Même si sa forme est figée après le durcissement, les propriétés du matériau cimentaire restent en évolution pendant une période prolongée, pouvant s'étendre sur plusieurs mois ou années. [23]

I.4.2.1. Résistances mécaniques

Les matériaux cimentaires sont souvent caractérisés par leur résistance à la compression, habituellement évaluée après 28 jours de cure. Des essais de compression du béton peuvent être effectués sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, sont mesurés par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale. Pour le mortier, cet essai sera sur des demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion.

La résistance à la traction, qui reflète la capacité du matériau à ne pas se fissurer, est généralement mesurée par l'essai de fendage sur des éprouvettes cylindriques ou par des essais de flexion sur des éprouvettes prismatiques.[24]



Figure I.7 : Essai de compression

Les résistances mécaniques est influencée par les facteurs suivants :

- La qualité du ciment caractérisée par sa classe de résistance : plus celle-ci est élevée, plus la résistance est importante ;
- Les dosages en ciment et en eau représentés par leur rapport E/C (Eau/Ciment) : la résistance croît quand E/C décroît ;
- La qualité et la quantité des granulats par la proportion relative sable/gravier mais aussi la forme et la taille des granulats ;
- La température et l'humidité : surtout lors de la phase de durcissement. [25]

I.4.2.2. Porosité

Une caractéristique physique essentielle du matériau cimentaire durci est sa porosité, définie comme le rapport entre le volume des vides – incluant pores, fissures et microfissures – et le volume total du matériau. Elle conditionne plusieurs propriétés du matériau cimentaire telles que sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité. Une faible porosité entraîne une forte compacité, une faible perméabilité et des propriétés mécaniques accrues. La porosité est directement liée à la formulation et aux réactions chimiques de formation du matériau.[26]

I.4.2.3. Essais non destructifs

Les Essais Non Destructifs sont un ensemble de méthodes permettant d'estimer les propriétés du matériau cimentaire in situ et apporte une aide au diagnostic de l'état d'un ouvrage sans atteinte à leur intégrité quel que soit son âge et son état de dégradation. Opter pour une stratégie de suivi dans le temps, d'entretien et de maintenance des ouvrages, par rapport à la reconstruction, souligne l'intérêt primordial du suivi non destructif en termes d'efficacité opérationnelle et de réduction des coûts.[27]

➤ Essai par scléromètre

L'essai au marteau est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométrique.

Le marteau de Schmidt est le seul instrument connu qui utilise le principe du rebondissement pour les essais sur le béton en laboratoire comme aux essais sur le chantier.



Figure I.8 : Appareil d'essai de scléromètre.

Il s'agit de l'instrument le plus utilisé dans le diagnostic des ouvrages déjà bâtis. L'essai au marteau est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton, et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométrique. Le marteau de Schmidt est utilisé pour les essais sur le béton en laboratoire comme pour les essais sur le chantier.[28]

➤ **La méthode ultrasonique**

L'essai par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif utilisée pour obtenir les propriétés des matériaux en mesurant le temps de déplacement des ondes de contrainte à travers un milieu solide, afin de déterminer la vitesse acoustique. Cette vitesse acoustique permet de porter des jugements sur l'intégrité d'une structure. L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoire, ainsi que sur des ouvrages en béton terminés.[29]



Figure I.9 : Appareille d'essai ultrasonique.

I.4.2.4. Durabilité du béton

Un béton durable est caractérisé par sa capacité à résister de manière adéquate aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration, conservant ainsi sa forme et sa qualité lorsqu'il est exposé à son environnement. La durabilité du béton dépend de la condition de mise en œuvre, les compositions des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

La durabilité du béton est influencée par des facteurs internes (porosité, perméabilité, diffusivité, fissuration, ions chlore, réaction alcalis-granulats, ions sulfates) et externes (cycles gel-dégel, sels de déverglaçage, ambiances chimiquement agressives).[26]

I.5. Conclusion

Comptant parmi les matériaux les plus répandus à l'échelle mondiale, les matériaux cimentaires placent l'industrie de la construction en tête des consommateurs de ressources naturelles, entraînant un épuisement accéléré de ces dernières. Cette situation critique risque de s'aggraver avec l'expansion continue du secteur.

La préoccupation de l'homme pour la protection de ces ressources a poussé les chercheurs dans le domaine du Génie Civil à lancer plusieurs travaux de recherche visant à proposer de nouvelles technologies de réalisations. L'objectif est de trouver des solutions pour minimiser l'impact environnemental du secteur tout en répondant aux besoins croissants en infrastructures.

L'utilisation des déchets dans le domaine du génie civil est l'une de ces solutions qui s'est fortement développée ces dernières années. Ces matériaux issus de déchets se substituent de manière croissante aux matériaux de construction habituels, participant ainsi à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles et à la protection de notre environnement.

CHAPITRE II

Déchets des pneus usagés

II.1. Introduction

Chaque activité humaine génère des produits, et tout produit finit par devenir un déchet ou une source de déchets. L'émergence de nouvelles sociétés de consommation et la mondialisation des activités et des idées repositionnent la gestion des déchets comme une question centrale.

La gestion des déchets a pour but d'encadrer la phase finale du cycle de vie des produits jetés. Son principal enjeu est de limiter les impacts négatifs sur la santé et l'environnement causés par leurs propriétés dangereuses, putrescibles ou leur volume important. Progressivement, la mise à l'écart ou l'élimination des déchets a cédé la place à leur valorisation : valorisation de la matière (recyclage), valorisation organique (compostage, méthanisation) et valorisation énergétique (incinération). Ces approches permettent d'amoindrir l'impact de leur abandon.

Bien que souvent considérés comme non dangereux, les pneus usagés constituent une menace environnementale et sanitaire significative en cas d'incendie (dégagement de fumées toxiques) ou d'abandon (prolifération de moustiques vecteurs de maladies...). C'est pourquoi leur mise en décharge, leur rejet dans la nature et leur incinération sont interdits.

Cette étude portera sur l'intégration de ce type de déchets dans les matériaux cimentaires.

II.2. Les déchets

II.2.1. Définition

Un déchet est tout ce qui reste après une production, une transformation ou un usage, qu'il s'agisse d'une substance, d'une matière, d'un produit ou de tout autre bien meuble qui est soit abandonné, soit que son propriétaire a l'intention de jeter.

D'autres variantes existent, le concept selon lequel les déchets peuvent être traités de manière économique, sociale en fonction de leurs propriétés chimiques, etc.

Au-delà de la dégradation esthétique du paysage, les déchets laissés dans la nature représentent un risque environnemental majeur. Leur décomposition naturelle est souvent très lente et peut entraîner la libération de substances nocives dans les sols et l'eau, affectant ainsi la santé humaine et les écosystèmes. [30]

II.2.2. Les lois algériennes concernant les déchets

- **Loi n°01-19 du 12/12/2001** : relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets ;

- **Loi n°03-10 de la 19/07/2003** : relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;

- **Loi n°04-20 du 25 décembre 2004** : relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. [31]

II.2.3. Différents types des déchets

Les déchets sont généralement répartis en plusieurs catégories, telles que :

II.2.3.1. Déchets inertes

Les déchets inertes sont essentiellement composés de matériaux minéraux comme la pierre, le béton et les gravats. Leur nature fait qu'ils ne représentent pas de danger pour l'environnement et peuvent être valorisés dans le secteur de la construction ou utilisés pour le remblayage de carrières. [32]

II.2.3.2. Les déchets ménagers et assimilés

On entend par déchets ménagers les résidus des activités domestiques et les déchets assimilés qui, compte tenu de leur nature, peuvent être pris en charge par les services de collecte et de traitement des collectivités locales. Ordures ménagères, encombrants, déblais et gravats, déchets ménagers spéciaux. Autres déchets municipaux (déchets assimilés et déchets produits par les services publics : déchets de voirie et de marché, boues de station d'épuration, déchets verts des espaces publics...).[33]

II.2.3.3. Les déchets organiques ou déchets de l'assainissement

Ce sont ces boues, issues du traitement des eaux usées dans les stations d'épuration, contiennent à la fois des matières organiques (la matière organique de départ agglomérée par floculation et les produits employés pour cela) et des éléments minéraux. Suivant les traitements physiques ultérieurs qu'on leur fait subir, les boues se présentent de la manière suivante :

- **Les boues liquides** : avec une teneur en matière sèche allant jusqu'à 10%
- **Les boues pâteuses** : avec une teneur en matière sèche comprise entre 10 et 20%
- **Les boues solides** : avec une teneur en matière sèche supérieure à 20%. [33]

II.2.3.4. Les déchets ultimes

Ce sont des déchets, Qu'ils soient issus ou non de l'élimination des déchets, les déchets ne sont plus susceptibles d'être éliminés conditions techniques et économiques actuelles, notamment en extrayant Pièces recyclables ou par extraction de leurs propriétés polluantes ou dangereuses. [34]

II.2.3.5. Les déchets radioactifs

Un déchet radioactif est défini comme toute matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse, qui renferme une substance nucléaire radioactive et qui n'a plus d'application identifiable.

Les catégories de déchets radioactifs sont structurées en fonction du confinement et de l'isolement requis pour en assurer la sûreté à court et à long terme, et elles prennent aussi en compte le risque pour la santé et la sécurité des humains et de l'environnement.[35]

II.2.3.6.Les déchets industriels

Les déchets industriels peuvent être classés en deux grandes catégories : les déchets dangereux et les déchets non dangereux.

➤ Les déchets non dangereux

Les déchets non dangereux sont les résidus issus des activités industrielles, commerciales ou domestiques qui ne constituent pas une menace directe pour la santé humaine ou l'environnement. Ces déchets incluent des matières telles que le papier, le carton, le verre, le plastique, le bois et certains métaux. Ces matériaux ont souvent la particularité d'être recyclables et, grâce à un tri adéquat, peuvent être réintroduits dans les processus de fabrication.

➤ Les déchets dangereux

En raison de leur potentiel polluant (contamination des sols et des eaux) et des risques d'incendies ou d'explosions liés à une gestion inadéquate, les déchets dangereux issus de diverses activités (industrielles, agricoles, domestiques) représentent un danger majeur pour la santé et l'environnement. Ces déchets contiennent des substances toxiques, inflammables, corrosives ou réactives (chimiques, biologiques, radiologiques), incluant des solvants, des huiles usagées, des produits chimiques industriels, des corrosifs, des peintures, des pesticides et des résidus électroniques (contenant des métaux lourds).

Il est essentiel de disposer de centres de traitement et d'élimination des matières dangereuses pour assurer leur stockage, leur traitement et leur élimination en toute sécurité, en suivant les normes de gestion appropriées. [36]

II.2.4. Les impacts des déchets sur l'environnement

Les déchets peuvent avoir des conséquences très néfastes pour l'environnement s'ils sont mal gérés :

II.2.4.1. L'impact sur la pollution de l'air

Les Décharges contiennent une large variété de déchets leur mélange (surtout entre déchets organiques et de l'eau) provoque l'apparition de méthane, un gaz à effet de serre.

II.2.4.2. L'impact sur la pollution de l'eau

Plus de six millions de tonnes de déchets divers sont déversées annuellement dans les océans, entraînant une contamination des espèces aquatiques qui peut s'avérer dangereuse pour les chaînes alimentaires. Les déchets biodégradables réagissent avec la pluie, provoquant ensuite des pluies acides qui polluent les rivières et les océans. Il est évident que le rejet de déchets industriels dans les cours d'eau (fleuves, rivières) ou les mers constitue une voie de contamination de l'eau plus immédiate.

II.2.4.3. L'impact sur la pollution du sol

Bien que moins préoccupante que la pollution de l'eau et de l'air, elle n'en demeure pas moins un problème majeur. Aujourd'hui on estime que 70% des déchets sont enfouis, notamment les déchets nucléaires. Cela provoque l'érosion et la contamination des sols.[37]

II.2.5. La gestion des déchets

Le but premier de la gestion des déchets est d'organiser la mise au rebut des biens et de limiter ainsi leurs conséquences dommageables sur la santé humaine, l'environnement et le cadre de vie. C'est une branche qui regroupe la collecte, le négoce et le courtage, le transport, le traitement (y compris le traitement des rebuts), la réutilisation et l'élimination des déchets. L'objectif de cette gestion est de minimiser les conséquences des déchets sur la santé, l'environnement et le cadre de vie. Récemment, l'accent a été mis sur la réduction de leur impact sur la nature et leur valorisation dans une logique d'économie circulaire.

Tous les types de déchets sont concernés (solides, liquides ou gazeux, toxiques, dangereux, etc.), chacun suivant une filière spécifique. [38]

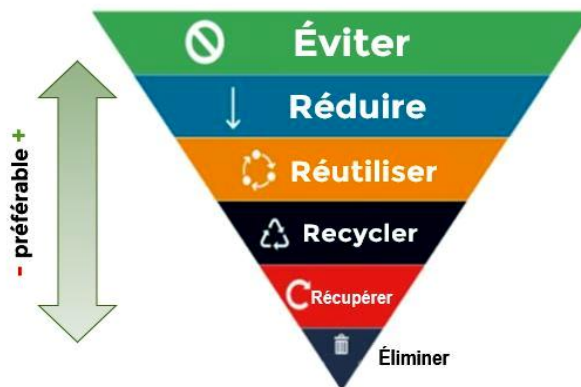


Figure II.1: Hiérarchie de gestion des déchets. [38]

II.2.6. Valorisation des déchets

Valoriser un déchet consiste à lui donner une nouvelle valeur, que ce soit en extrayant de l'énergie, en réutilisant sa matière première, en la transformant en une ressource secondaire pour la production, ou en lui trouvant une autre application utile. La caractéristique essentielle de la valorisation consiste à conférer aux déchets une fonction utile. Ils se substituent ainsi à l'utilisation d'autres matériaux qui auraient été nécessaires pour remplir cette même fonction, contribuant à la préservation des ressources naturelles. On distingue trois principaux types de valorisation des déchets : la valorisation de la matière, ou recyclage, qui réintroduit les composants des déchets dans le cycle économique ; la valorisation organique, comme le compostage et la méthanisation, qui génère des engrais et du compost ; et la valorisation énergétique, via l'incinération, qui produit chaleur et électricité, contribuant à limiter les conséquences de l'abandon des déchets. [39]

II.3. Différents déchets utilisés dans l'élaboration des matériaux cimentaires

Bien que les déchets inertes soient principalement utilisés en génie civil, certains déchets ménagers et sous-produits industriels peuvent également l'être sous des conditions spécifiques.

II.3.1. Ciment durci

Lorsqu'un sac de ciment entre en contact avec l'eau, la poudre subit une cristallisation rapide, suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux processus combinés entraînent le durcissement du ciment, le rendant inutilisable comme liant sur le chantier et le transformant automatiquement en déchet. Ce ciment durci peut cependant être concassé et valorisé comme granulats de béton. Sa production, souvent accidentelle ou due à la négligence, nécessite donc une élimination appropriée et des mesures préventives pour en éviter la formation.[40]



Figure II.2: Ciment durci.

II.3.2. Déchets de démolition

Les déchets de démolition comprennent l'ensemble des matériaux banals, inertes et dangereux issus de la destruction de structures existantes.

- **les déchets dangereux** : bois et laine de roche, bois et plastique ou produit de synthèse, fibre et colle synthétique.
- **les déchets banals** : base d'asphalte et bitume, béton armé, bois non traité.
- **les déchets inertes** : argile et terre cuite, brique et ciment, céramique. [40]



Figure II.3: Déchets de démolition

II.3.3. Déchets de verre

Chaque année, le recyclage permet de récupérer des millions de tonnes de verre, dont une partie est utilisée dans les matériaux de construction. Cependant, le béton ainsi obtenu présente généralement une résistance inférieure à celle du béton traditionnel. Le verre est principalement utilisé sous deux formes : les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). [41]



Figure II.4 : Déchets de verres.

II.3.4. Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient être une source de granulats légers de premier choix, mais leur application reste limitée. Leur combustion optimisée représente un atout majeur comparativement à d'autres granulats légers. Le carbone contenu dans les cendres produit la chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et atteindre la température de frittage. Les bétons légers fabriqués à partir de granulats de cendres volantes présentent une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40 MN/m^2 et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m^3 . Grâce à leur forme adéquate, leur bonne résistance et leur absorption d'eau modérée, ces granulats conviennent à la fabrication de blocs de béton léger et de béton léger. [42]

II.3.5. Déchets de plastiques

Ces déchets, qu'ils soient issus de processus de production, de transformation ou de consommation, ou qu'il s'agisse de produits plastiques destinés à être jetés, ont fait l'objet d'études démontrant leur potentiel d'utilisation dans le béton. Ils peuvent servir de liant pour créer un matériau composite à haute performance, ou être ajoutés directement au béton sous forme de grains ou de fibres (ondulées ou rectilignes). [41]



Figure II.5 : Déchets de plastiques

II.3.6. La boue rouge

Les boues rouges, sédiments caractéristiques des abysses océaniques, se définissent par leur faible teneur en débris organiques (moins de 25%), une prédominance de minéraux argileux, et la présence d'hydroxydes de fer et de manganèse. En se consolidant pour former la pierre de boue rouge, une roche sédimentaire fine composée majoritairement de minéraux argileux et de fines particules de quartz (limon), elles peuvent être transformées en granulats denses et résistants. Cette transformation ouvre la possibilité de les utiliser dans la composition de bétons aux propriétés mécaniques appropriées. [43]



Figure II.6 : Boues rouges.

II.3.7. Déchets de briques

Les déchets de briques sont valorisés dans la fabrication des ciments et des bétons. Les briques concassées issues des secteurs de la construction, de la démolition et de la fabrication (notamment les non-conformes) constituent une source de granulats alternatifs digne d'intérêt. Il permet de réduire considérablement le problème du stockage des déchets et contribue à la préservation des granulats naturels. [44]



Figure II.7 : Briques en terre cuite

II.3.8. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Il peut être refroidi lentement à l'air, formant un matériau cristallin et compact appelé « laitier refroidi à l'air », ou refroidi rapidement par des jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de « laitier expansé ». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulat pour le béton, et ses fines peuvent remplacer le sable sans inconvénient. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure rendent le béton de laitier armé adapté à de nombreuses applications. [40]



Figure II.8 : laitier de haut fourneau.

II.3.9. Laitier d'acier

Une fois l'acier écoulé en partie basse du convertisseur, le laitier d'aciérie de conversion liquide, qui surnage sur le dessus, est déversé dans un cuvier. Après un refroidissement lent et progressif à l'air puis à l'eau, on obtient une roche artificielle qui peut être concassée et criblée pour produire des granulats. Dans le domaine des travaux publics, le laitier d'aciérie de conversion est principalement employé pour les terrassements (remblais, merlons antibruit,

etc.), la fabrication de graves non traitées pour les couches de forme, ou encore comme enrochement pour la construction de digues. [45]



Figure II.9 : laitier d'acier.

II.3.10. Déchets de Caoutchouc

Le caoutchouc recyclé offre de nombreuses possibilités d'utilisation innovantes. Il peut être transformé en granulats pour des aires de jeux sécurisées et durables, ou en revêtements de sol pour ces mêmes espaces. [46]

Le caoutchouc usagé est également utilisé comme combustible dans les cimenteries et certaines centrales thermiques. [47]

Différentes recherches ont montré que l'utilisation de granulats de caoutchouc est susceptible d'apporter une valeur ajoutée en termes d'amélioration de certaines propriétés des matériaux cimentaires. D'autre part, l'incorporation du caoutchouc dans ces matériaux a un impact négatif sur ces propriétés mécaniques. [46]



Figure II.10 : Déchets de caoutchouc

Ce type de déchets (déchet de caoutchouc) est l'objet de notre recherche est, que nous explorerons en détail par la suite.
--

II.4. Le matériau caoutchouc

II.4.1. Définition

Le caoutchouc, contrairement à la laine, la soie ou le bois, est un matériau souple, hautement déformable et élastique. Ses longues molécules en chaînes sont flexibles à température ambiante, s'agitent et s'entremêlent spontanément. L'étirement nécessite une force et lui confère un comportement élastique. Un morceau de caoutchouc brut est un enchevêtrement de ces chaînes qui s'allongent lorsqu'il est étiré légèrement.

Après relâchement d'une faible tension, le caoutchouc reprend sa forme (élasticité). Cependant, sous une tension plus forte et maintenue, les chaînes glissent, et le matériau conserve une déformation résiduelle (plasticité), montrant ainsi un comportement à la fois élastique et plastique.[48]

II.4.2. Mode de fabrication du caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel est obtenu par la coagulation du latex de diverses plantes, principalement l'hévéa (*Hevea Brasiliensis*) d'Amazonie. La récolte, effectuée par les seringueros en Amazonie, consiste à inciser l'écorce pour recueillir le latex dans des godets. Le latex est ensuite filtré et stabilisé à l'ammoniaque ou coagulé et séché par fumage pour obtenir des balles de caoutchouc.

Bien qu'originaire d'Amérique du Sud, la culture de l'hévéa (hévéaculture) s'est principalement développée en Asie du Sud-Est et, dans une moindre mesure, en Afrique équatoriale (Nigeria, Côte d'Ivoire, Cameroun).

II.4.3. Production de granulat en caoutchouc naturel

La fabrication du caoutchouc naturel solide s'appuie sur des techniques de coagulation ou d'évaporation, permettant d'obtenir diverses formes (feuilles, blocs) et qualités. Ce caoutchouc est essentiel à la production d'articles variés tels que les pneumatiques et les courroies. Il est à noter que plus de 200 additifs sont employés pour moduler les propriétés du caoutchouc. Les principaux additifs du caoutchouc sont les accélérateurs de vulcanisation et les stabilisants. On trouve également des plastifiants, agents d'expansion, coagulants, lubrifiants, pigments et fragrances. La production mondiale de caoutchouc dépasse 21 millions de tonnes. [47]

II.4.4. Propriétés du matériau caoutchouc

Le caoutchouc est un matériau polyvalent qui possède plusieurs propriétés intéressantes.

II.4.4.1. Élasticité

Le caoutchouc est réputé pour sa grande élasticité. Il a la capacité de s'étirer et de se déformer considérablement sous l'effet d'une force, puis de retrouver sa forme initiale une fois cette force supprimée. Cette propriété élastique le rend indispensable dans de nombreuses applications nécessitant flexibilité et résilience.

II.4.4.2. Résistance à l'abrasion

Grâce à sa bonne résistance à l'abrasion, le caoutchouc peut supporter l'usure résultant du frottement et du contact avec des surfaces rugueuses. Cela en fait un matériau approprié pour les pneumatiques, les revêtements de sol, les joints d'étanchéité, etc.

II.4.4.3. Résistance aux produits chimiques

Le caoutchouc est également résistant à de nombreux produits chimiques. Sa résistance à divers acides, bases, solvants et huiles en fait un matériau de choix pour les applications impliquant un contact avec des substances corrosives ou réactives.

II.4.4.4. Isolation électrique

Le caoutchouc est un bon isolant électrique. Il peut résister à la conduction de l'électricité, ce qui en fait un matériau utilisé dans les câbles, les isolateurs, les joints d'étanchéité électriques, etc.

II.4.4.5. Étanchéité

Le caoutchouc possède une excellente capacité d'étanchéité, le rendant idéal pour les applications nécessitant une barrière contre les liquides ou les gaz. On l'utilise couramment dans les joints d'étanchéité, les tuyaux, les membranes d'étanchéité, etc.

II.4.4.6. Absorption des vibrations

Grâce à sa capacité d'absorption des vibrations et des chocs, le caoutchouc est utilisé dans divers systèmes d'amortissement, comme les supports moteur, les isolateurs de vibrations et les suspensions. [49]

II.4.5. Provenance des déchets de caoutchouc

Le recyclage de ce caoutchouc permet d'éviter le recours à de la matière neuve.

Les sources de caoutchouc recyclé sont donc les suivantes : les pneus usagés (70%), les déchets de caoutchouc industriel (semelles de chaussures...), ou encore les chutes de fabrication des pneus. Le caoutchouc recyclé peut être retrouvé dans toutes sortes de produits du quotidien.[50]

Donc, les pneus usagés constituent la principale source de déchets de caoutchouc. Toutefois, même en fin de vie, ils conservent de nombreuses propriétés intéressantes, ce qui en fait une véritable matière première secondaire :

- ✓ Elasticité ;
- ✓ Solidité de la structure ;
- ✓ Pouvoir drainant ;
- ✓ Pouvoir calorifique ;
- ✓ Haute teneur en carbone ;
- ✓ Durabilité ;
- ✓ Amortissement. [44]

II.4.6. Structure d'un pneu

Le pneu est constitué d'un assemblage de plusieurs matériaux. Plus de 200 matières premières peuvent entrer dans sa composition. Chaque élément lui confère une propriété : le caoutchouc (naturel ou synthétique) pour l'élasticité, le noir de Carbone ou la Silice pour renforcer sa résistance au frottement, des plastifiants (huiles et résines) pour renforcer la tenue à froid de la matière, du soufre (agent indispensable à la vulcanisation), des renforts métalliques et textiles.[51]

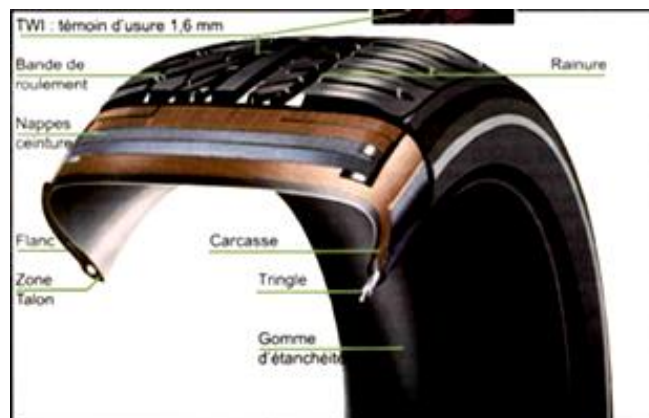


Figure II.11: Coupe transversale d'un pneu

En moyenne, un pneu moderne contient jusqu'à 25 composants et pas moins de 12 composés de caoutchouc différents. Tout commence avec du caoutchouc naturel extrait d'arbres spécifiques cultivés dans de grandes plantations. Ce liquide, le latex, coagule avec de l'acide, est nettoyé à l'eau et pressé en balles.

Le caoutchouc synthétique, quant à lui, est fabriqué selon un processus distinct en utilisant un mélange de substances chimiques en laboratoire. Durant l'étape de fabrication, ces balles (naturelles et synthétiques) sont découpées, pesées et mélangées avec d'autres ingrédients selon des formules précises.

Commençons par le côté en contact avec la route et remontons vers l'intérieur, un pneu est décomposé de :

- **Bande de roulement** – caoutchouc naturel et synthétique
- **Nappes ceintures** – nylon, incrusté dans du caoutchouc
- **Cordes pour les bandages d'acier** – cordes en acier à haute résistance
- **Nappe textile** – rayonne caoutchoutée ou polyester
- **Calandrage** – caoutchouc butyle
- **Flanc** – caoutchouc naturel
- **Bandelette** – nylon ou aramide
- **Apex** – caoutchouc synthétique
- **Tringle** – fils métalliques incrustés dans du caoutchouc

La quantité de matériau utilisée dans la fabrication des pneus est :

- Caoutchouc (naturel et synthétique) 41 % ;
- Remplissage (noir de carbone, silice, carbone, craie...) 30 % ;
- Matériaux de renforcement (acier, polyester, rayonne, nylon) 15 % ;
- Plastifiant (huiles et résines) 6 % ;
- Produits chimiques pour vulcanisation (soufre, oxyde de zinc...) 6 % ;
- Agents anti-vieillessement et autres produits chimiques 2 %. [52]

II.4.7. Utilisations des pneus usagés en Algérie

Le gisement Algérien de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre pour les véhicules poids lourds de 200000 tonnes /an (19 Millions de pneus). Mais les quantités valorisées sont très limitées, nous notons quelque type d'utilisation :

- Utilisées en agriculture pour renforcer les petits barrages et comme Siège dans les jardins traditionnels.
- Applications de résidus de copeaux de pneus en structure sous chaussée.
- Pour la Stabilité d'un talus.
- Rechapage pneus usagés à El Eulma.
- Utilisation pour couvrir les conducteurs électriques.
- Pneu sol, déjà utilisé dernièrement à Alger par une société Italienne.
- Stabilité d'un glissement de terrain. [53]

II.4.8. Recyclages des pneus usagés

Chaque année, 17 millions de tonnes de pneus en fin de vie sont jetés, et finissent incinérés ou enfouis. Ils constituent donc un vivier de caoutchouc de post-consommation important, et une opportunité de recyclage intéressante.[50]



Figure II.12 : Recyclage de pneus.

Le recyclage des pneus usagés engendre plusieurs bénéfices majeurs :

- Une réduction significative du volume de déchets.
- Une limitation de leur impact environnemental.
- Une protection accrue de l'environnement.
- Une contribution à la minimisation du réchauffement climatique.

De plus, cette pratique stimule la création d'emplois au sein du secteur du recyclage.[54]

Malgré les avantages de cette opération (recyclage des pneus usagés), les installations de recyclage nécessitent des équipements spécialisés et coûteux pour le broyage, la séparation des matériaux (caoutchouc, acier, textile) et le traitement des résidus. De plus, les procédés de recyclage peuvent engendrer une consommation d'énergie importante et générer des émissions

polluantes (gaz, particules), nécessitant des systèmes de traitement coûteux pour se conformer aux normes environnementales. [55]

II.4.8.1. Etapes de recyclage des pneus usagés

Le recyclage d'un pneu est un processus qui se compose de plusieurs étapes. Parmi ces étapes, nous retrouvons notamment :

- a. Collecte et faire le tri :** La collecte et le tri des pneus à recycler sont assurés par un prestataire spécialisé dans le recyclage de pneumatiques. [50]



Figure II.13 : Collecte et faire le tri de pneus.

- b. Déchiquetage :** De puissantes machines broient les pneus, séparant le caoutchouc et la ferraille pour ne produire que de gros copeaux de caoutchouc et des résidus métalliques.[50]



Figure II.14 : Machine de recyclage de pneus

c. Récupération de l'acier (Séparation) : Les fibres métalliques sont séparées de la caoutchouc et récupérées, cet acier est également recyclé de son côté, contribuant ainsi à une économie circulaire plus durable. [56]



Figure II.15 : Récupération de l'acier (Séparation).

d. Broyage final : Une fois qu'il ne reste que des granulés de caoutchouc, le tout est poussé dans un crible et broyé en différentes tailles selon l'usage auquel il est destiné. Les particules sont examinées en fin de processus et leur qualité contrôlée, puis acheminées selon leur réutilisation.

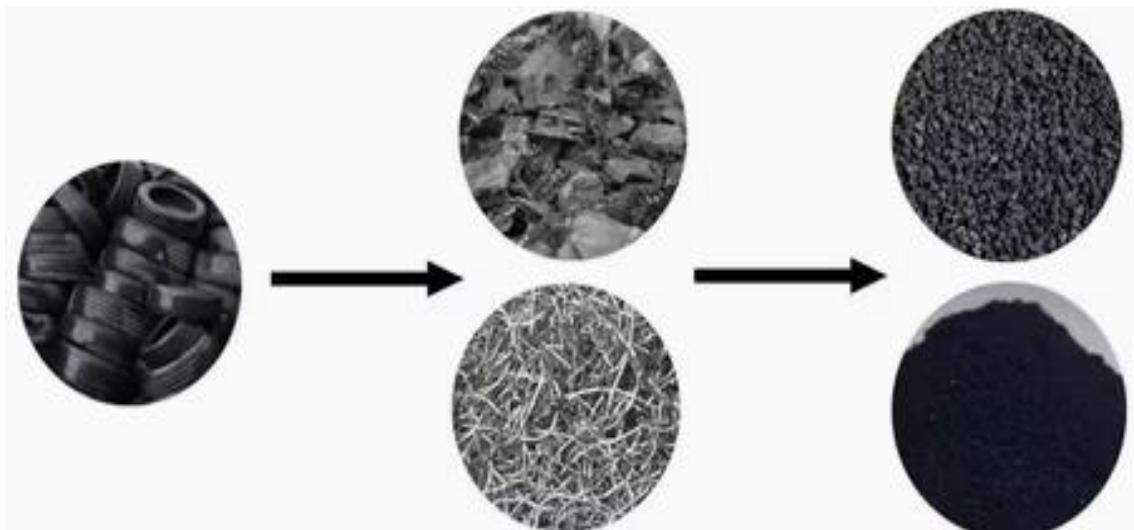


Figure II.16 : Les différentes tailles des déchets caoutchouc.

II.4.9. Valorisation des pneus usagés

L'accumulation de pneus usagés constitue un problème environnemental et économique de portée mondiale. Les millions de tonnes rejetées annuellement représentent non seulement des déchets volumineux et abondants, mais aussi des charges financières importantes liées à leur transport et une pression considérable sur l'espace disponible en décharge. Donc, la valorisation de ces déchets est un impératif global, et les méthodes employées pour y parvenir sont très diverses. [44]

II.5. Conclusion

Depuis plus de trois décennies, les efforts des chercheurs se concentrent plus spécialement sur le recyclage et la valorisation des pneumatiques en caoutchoucs usagés. Ces efforts sont concentrés pour assurer une utilisation efficace dans les matériaux des constructions sous diverses formes et plus précisément sous forme de granulats incorporés aux mélanges cimentaires en assurant ainsi leur élimination et en préservant un environnement sain. Cependant, l'incorporation de granulats de caoutchouc dans les matériaux de constructions, notamment dans les bétons, peut entraîner une perte importante des propriétés mécaniques, limitant ainsi leurs domaines d'utilisation.

CHAPITRE III

Valorisation des déchets pneus usagés dans les matériaux cimentaires

III.1. Introduction

La valorisation des déchets de pneus usagés représente un enjeu environnemental et économique majeur. Diverses techniques et applications permettent de transformer ces déchets en ressources précieuses. Parmi celles-ci, la valorisation des pneus usagés dans les matériaux cimentaires connaît un essor significatif, motivé par son double intérêt environnemental et technique.

III.2. Définition de la valorisation des déchets

La valorisation des déchets désigne le processus par lequel une intervention humaine ou mécanique permet de réemployer, réutiliser ou régénérer ces matériaux. C'est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel en un autre produit, matériel ou énergétique. En gestion des déchets, la valorisation est généralement considérée comme une solution préférable à l'élimination. [57]

III.2.1. Valorisation des pneus usagés

Le problème des pneus usagés est une préoccupation mondiale majeure. Chaque année, des millions de tonnes de ces déchets volumineux et abondants sont jetées, entraînant des coûts de transport élevés et une saturation des décharges.

La valorisation des pneus usagés, peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

III.2.1.1. La valorisation énergétique

On parle de valorisation énergétique lorsqu'on récupère et valorise l'énergie libérée par le traitement des déchets, en utilisant des procédés tels que la combustion, la biomasse ou la méthanisation. La valorisation énergétique des pneus usagés est l'utilisation de broyats de pneus ou de pneus entiers comme combustible alternatif pour la production d'énergie. Cette énergie sert à fournir de la chaleur et/ou de l'électricité. C'est donc le pouvoir calorifique des pneus qui est la propriété recherchée lors de leur combustion, un procédé notamment utilisé dans l'aciérie et la cimenterie. [58]

III.2.1.2. La valorisation sous forme des matières premières

Ce type de valorisation vise à diminuer l'accumulation de pneus usagés en décharge en les transformant en matières premières réutilisables sous diverses formes : broyats, granulats, poudrette, voire pneus entiers.

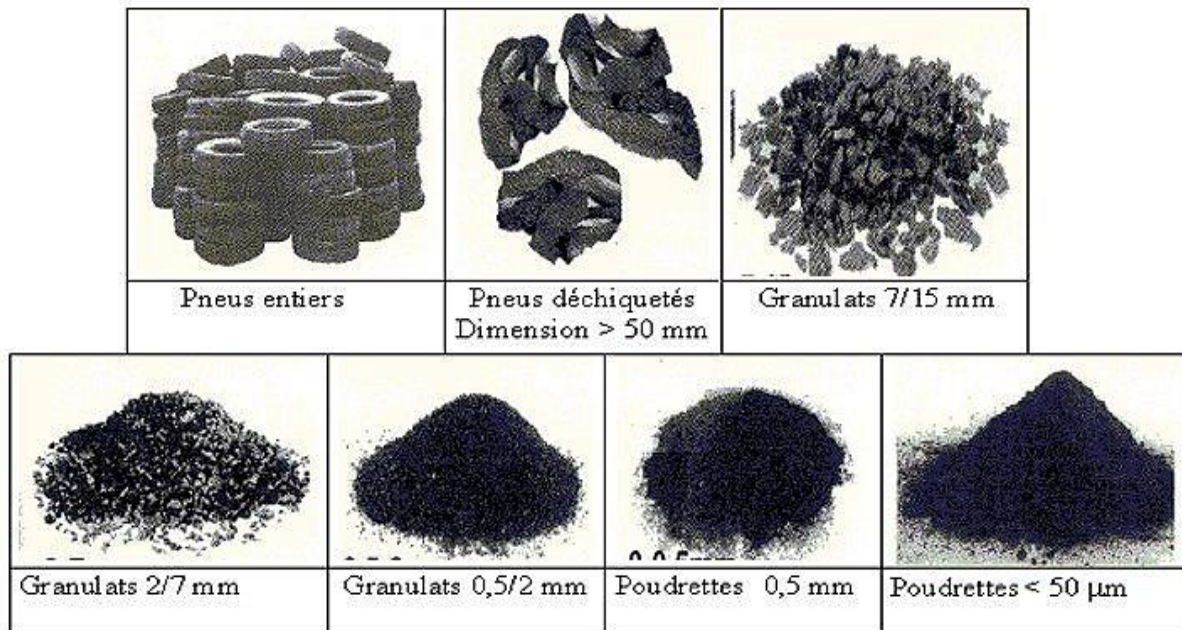


Figure III.1: Schéma d'une filière de valorisation matière [59]

Lors du processus de valorisation de la matière, le pneu usagé est employé sous différentes formes :

a. Rechapage

Allongeant considérablement la durée d'utilisation des pneus, le rechapage constitue la première voie de recyclage. Cette technique repose sur le remplacement des bandes de roulement usagées par de nouvelles. Elle cible les pneumatiques usagés dont les carcasses ont conservé intactes leurs qualités intrinsèques, notamment leur endurance. Cette activité génère à son tour des déchets, dont la poudrette de caoutchouc. [58]



Figure III.2 : Bandes de roulement [60]

b. Pneus entiers

➤ **Pneu sol** : Cette technique consiste à superposer des couches de pneus liées et remplies de matériaux de remblai, permettant la construction d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, de structures absorbant l'énergie (protection contre les chutes de blocs) et de répartiteurs de contraintes au-dessus de canalisations enterrées.

Cette combinaison pneu-sol est capable de supporter des efforts de traction importants et les pneus sont soit entièrement, soit partiellement coupés afin d'être combinés en couches ou superposés, au moyen de fixations métalliques.

➤ **Drainage** : l'utilisation de pneus ligaturés entre eux et mis en place sous forme de tube, permet le drainage de fossés et de parcelles.

➤ **Protection de quai** : On utilise souvent des pneus entiers pour absorber les chocs le long des quais et des jetées.

➤ **Ensilage** : certaines techniques agricoles utilisent des pneus pour le maintien des bâches d'ensilage. [59]



Figure III.3: Technique de Pneu sol

c. Poudrette de caoutchouc

La poudrette de caoutchouc, provenant du broyage de pneus usagés non réutilisables ou de résidus de rechapage, est polyvalente. On la retrouve dans les revêtements de sols industriels et sportifs, l'isolation phonique, les membranes anti-fissures pour routes et anti-vibrations pour voies ferrées.

Elle sert également à la production de roulettes, de dalles de revêtement, de sols amortissants, de murs antibruit et d'aires de jeux, et peut être employée comme support de voie ferrée pour réduire le bruit et les vibrations.

Utilisée comme liant dans les bitumes et ajoutée aux enrobés, la poudrette de pneu usagé améliore l'acoustique, la résistance aux fissures (gel/dégel) et l'adhérence, tout en favorisant le drainage (réduction de l'aquaplaning et du bruit) et en prolongeant la durée de vie de l'enrobé. [61]



Figure III.4: Poudrette de caoutchouc

d. Granulats de caoutchouc

Ces particules de caoutchouc, de taille supérieure aux poudrettes, peuvent être liées par des résines et colorées ou non. Leur moulage aisé permet la fabrication de feuilles et de plaques.



Figure III.5 : Granulats de caoutchouc

Les granulats de caoutchouc sont utilisés dans :

- **Gazon synthétique** : Les granulats de caoutchouc sont utilisés pour le remplissage des terrains de sport, améliorant l'amortissement et prévenant ainsi les blessures. Ils assurent une qualité de jeu constante en toutes saisons, tout en réduisant l'arrosage et l'entretien.
- **Aires de jeux** Grâce à leur légèreté et leur élasticité, les granulats de caoutchouc sont un matériau prometteur pour les aires de jeux. Ils offrent une excellente absorption des chocs, assurant ainsi une grande sécurité.
- **Sols équestres** Les avantages de l'utilisation des granulats de caoutchouc dans la fabrication des sols équestres sont : amélioration de la flexibilité, amélioration du drainage, moins abrasif que le sable, pas de création de poussière. [61]



Figure III.6: Enrobés routiers.

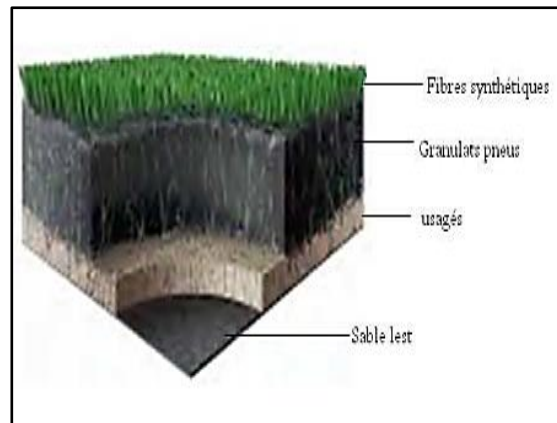


Figure III.7: Gazons synthétiques



Figure III.8 : Aire de jeux.



Figure III.9 : Sol équestre .[61]

➤ **Les matériaux cimentaires**

Pour diminuer la consommation des granulats naturels, des granulats alternatifs sont recherchés. L'emploi de particules de caoutchouc issues de pneus usagés dans le béton constitue une ressource respectueuse de l'environnement qui favorise les buts du développement durable. [61]

- D'autres types de valorisation de matière, basées sur la transformation chimique, comme la régénération (combinant actions chimiques, mécaniques et thermiques) et la pyrolyse/thermolyse. Ces procédés produisent des huiles combustibles (lourdes et légères), du carbone, etc. Cependant, leur industrialisation est limitée par leur coût de mise en œuvre élevé. [59]

III.3. Valorisation des déchets pneus usées dans les matériaux cimentaire

De nombreuses études ont exploré l'utilisation de déchets de pneumatiques comme granulats dans les matériaux cimentaires. Ces recherches visaient à évaluer l'impact de cette incorporation sur les propriétés des matériaux, tant à l'état frais qu'à l'état durci. [62]

L'utilisation de caoutchouc de pneus broyés dans le béton et le mortier est explorée de diverses manières. Des recherches considèrent son ajout au béton en remplacement partiel ou total des granulats naturels (graviers, sables ou leur combinaison) et/ou du ciment par de la poudre de caoutchouc. D'autres études se concentrent sur le mortier caoutchouté, substituant le sable et/ou le ciment par des particules de caoutchouc de taille similaire.

Les études clés dans ce domaine sont synthétisées dans les tableaux qui suivent :

Tableau III.1 : Résumé des différentes recherches dans le domaine de l'utilisation des déchets des pneus usagés dans les matériaux cimentaires

N°	N° Réf	Année	Matériaux cimentaires	Matériau naturel à substituer	Forme de Déchet de caoutchouc	Substitution	
						Nature	% - kg/m ³
01	63	1992	Béton	- Sable - Gravier	- Fin - Gros	Volumique	25-50-75-100% 25-50-75-100%
02	64	1995	Béton	- Sable - Gravier	Fin	Volumique	15-30-45% 15-30-45%
03	65	1996	Béton	Gravier	Gros	Volumique	25-50 -75- 100%
04	66	1996	Béton	Ciment	Fin	Massique	10-20- 30%
05	67	1999	Béton	- Sable - Gravier - Sable + Gravier	- Fin - Gros - Fin + Gros	Volumique	5-10-15-20-40-60- 80- 100% 5-10-15-20-40-60-80- 100% 5-10-15-20-40-60-80- 100%
06	68	2000	Pate de ciment	Ciment	Poudre	Massique	10%
07	69	2004	Béton	Gravier	- Copeaux - Fibres	Volumique	15%
08	70	2004	Béton	Sable	Fin	Volumique	2,5-5-10-15-25-50%
09	71	2004	Mortier	Sable	Fin	Massique	2,5 - 5 - 7,5 -10%
10	72	2004	Béton	Sable Gravier	Fin Gros	Volumique	10-20-30-40-50%
11	73	2005	Béton	Sable	Fin	Volumique	5-10- 15 %

N°	N° Réf	Année	Matériaux cimentaires	Matériau naturel à substituer	Forme de Déchet de caoutchouc	Substitution	
						Nature	% - kg/m ³
12	74	2005	Mortier	Sable	Fin	Volumique	20-30%
13	75	2005	Béton	Sable	Fin	Massique	5-10 %
14	76	2006	Pate de ciment	Ciment	Poudre	Volumique	10- 20- 30- 40- 50%
15	77	2006	Pate de ciment	Ciment	Poudre	Volumique	10- 20- 30- 40- 50%
16	78	2006	Béton autoplaçant	Sable	Fin	Volumique	22,2- 33,3%
17	79	2007	Pate de ciment	Ciment	Fin	Volumique	10- 20-30- 40- 50%
18	80	2007	Béton	• Sable + • Gravier	• Fin + • Gros	Volumique	• 5-15- 25% + • 5-15- 25%
19	81	2007	Béton	Sable	Fin	Volumique	5-10-15- 20%
20	82	2008	Béton	• Sable • Gravier • Sable + Gravier	• Fin • Gros • Fin + Gros	Volumique	• 12,5- 25-37,5- 50% • 12,5- 25-37,5- 50% • 25 - 50%
21	83	2008	Béton	Gravier	Gros	Volumique	15- 30- 45%
22	84	2008	Béton	• Sable + Gravier	• Fin • Gros	Volumique	25 -50- 75 -100%

N°	N° Réf	Année	Matériaux cimentaires	Matériau naturel à substituer	Forme de Déchet de caoutchouc	Substitution	
						Nature	% - kg/m ³
23	85	2008	Béton autoplaçant	Gravier	Gros	Volumique	10 -15- 20 -25 %
24	86	2009	Mortiers	Sable	Fin	Massique	2,5 -5- 7,5- 10- 12,5-15%
25	87	2009	Béton autoplaçant	• Sable + • Gravier	Fin	Massique	60-120-180 kg/m ³
26	88	2009	Béton	• Gravier • Ciment	• Gros • Poudre	Massique	• 5- 7,5- 10% • 5- 7,5- 10%
27	89	2009	Béton	• Sable	• Fin	Massique	• 10- 20- 30%
28	90	2010	Béton	• Sable • Gravier	• Fin • Gros	Massique	• 10- 20-30- 40% • 10- 20-30- 40%
29	91	2010	Béton	• Gravier • Sable	• Gros • Fin	Massique	• 100% • 50- 100%
30	92	2010	Béton	• Gravier gros • Gravier fin	• Gros • Fin	Volumique	• 25- 50-75 % • 15-30-50-75 %
31	93	2010	Béton	Sable	Fin	Volumique	20-30-40%
32	94	2011	Béton	Sable	Fin	Volumique	10%
33	95	2011	Béton autoplaçant	Sable	Fin	Volumique	5-15-25%
34	96	2012	Béton	• Sable • Gravier • Sable + Gravier	• Fin • Gros • Fin + Gros	Volumique	• 5-10-15% • 5-10-15% • 5-10-15%

N°	N° Réf	Année	Matériaux cimentaires	Matériau naturel à substituer	Forme de Déchet de caoutchouc	Substitution	
						Nature	% - kg/m ³
35	97	2012	Béton	• Sable • Gravier • Sable + Gravier	• Fin • Gros • Fin + Gros	Volumique	• 5-10-15% • 5-10-15% • 5-10-15%
36	98	2012	Béton autoplaçant	• Sable • Gravier • Sable + Gravier	• Fin • Gros • Fin + Gros	Massique	• 5-10-15% • 5-10-15% • 5-10-15%
37	99	2012	Béton	• Sable • Ciment	• Fin • Poudre	Volumique	• 5-10 - 20% • 5-10 - 20%
38	100	2012	Béton	Sable + Gravier	Fin + Gros	Volumique	20 -40- 60-80- 100%
39	101	2013	Béton autoplaçant	Sable	Fin	Volumique	5-10-15- 20%
40	102	2013	Mortier	Sable	Fin	Volumique	25-50 - 75- 100%
41	103	2013	Béton	Sable	Fin	Volumique	10- 20%
42	104	2013	Béton	Sable	Fin	Volumique	15-25-50- 100%
43	105	2013	Béton	Sable	Fin	Volumique	5-10-15%
44	106	2013	Béton	Gravier	Gros	Volumique	15-30%
45	107	2014	Béton	Sable	Fin	Massique	2-4- 6-7-8-10-12%
46	108	2014	Béton	Gravier	Gros	/	5 -10 – 15%

N°	N° Réf	Année	Matériaux cimentaires	Matériau naturel à substituer	Forme de Déchet de caoutchouc	Substitution	
						Nature	% - kg/m ³
47	109	2014	Béton autoplaçant	• Ciment	Poudre	Volumique	• 5, 10,15 , 20 %
48	110	2014	Béton	• Sable	Fin	Volumique	• 5, 10,15%
49	111	2015	Béton	• Sable	Fin	Volumique	• 2.5- 5 - 7.5 -10 -12.5 - 15 - 17.5- 20%
50	112	2015	Béton	• Sable	Fin	Volumique	20%
51	113	2016	• Bétons • Mortier	• Gravier + sable • Sable	Fin	Volumique	• Béton : 5-10 -15 -20 - 30% • Mortier :5 -10 -15 - 20 -25 -30 -35 -40%
52	114	2016	Béton autoplaçant	• Gravier • Sable	• Gros • Fin	Massique	• 10 - 20% • 2,5 - 5%
53	115	2016	Béton	Sable	Fin	Volumique	2.5 - 5- 7.5- 10-12.5-15- 17.5- 20%
54	116	2016	Mortier	Sable	Fin	Volumique	10 – 20 - 30%
55	117	2017	Béton	/	Fin	Massique	40-80-120, kg/m ³
56	118	2017	Béton autoplaçant	Sable Gravier	Fin Gros	Volumique	10 – 20 - 30%
57	119	2017	Béton	Sable	Fin et Gros	Massique	5 -10 – 20 %
58	44	2017	Mortier	Sable	Fin	Volumique	10 – 20 - 30%
59	120	2017	Béton	Sable	Fin	Volumique	4 - 4,5 - 5 - 5,5 %

N°	N° Réf	Année	Matériaux cimentaires	Matériau naturel à substituer	Forme de Déchet de caoutchouc	Substitution	
						Nature	% - kg/m ³
60	121	2017	Mortier Béton	Sable	Fin	Volumique	25- 35- 50 %
61	122	2018	Mortier	Sable	Fin	Massique	3 – 6 – 9 %
62	123	2018	Béton	Sable	Fin	Volumique	10 – 17,5 – 25 %
63	124	2018	Béton	• Sable • Gravier + sable	• Fin • Gros + Fin	Massique	• 5 -7.5 -10 % • 5 -7.5 -10 % + 5 -7.5 -10 %
64	61	2019	Béton	Sable	Fin	Volumique	10-20-40-60%
65	125	2019	Béton autoplaçant	Sable	Fin	Volumique	5-10-15-20-30%
66	126	2019	Mortier	Sable	Fin	Massique	10-20-30-40%
67	127	2021	Mortier	Sable	Fin	Volumique	10 – 20 – 30 %
68	62	2021	Mortier	Sable	Fin	Volumique	10 - 17.5 - 25%
69	128	2021	Bétons	Sable	Fin	Volumique	5-10-15-20%
70	129	2023	Mortier	Sable	Fin	Massique	4 – 8 - 12%

III.4. Synthèse sur les travaux étudiés

En s'appuyant sur les recherches présentées dans le tableau précédent concernant l'ajout de déchets de pneumatiques usagés aux matériaux cimentaires, on peut synthétiser ces études de la manière suivante :

➤ **Type Des Matériaux Cimentaires**

Caoutchouté

- a. Béton
- b. Mortier
- c. Pate de ciment

➤ **Matériaux à substituer**

- a. Gravier
- b. Sable
- c. Sable + gravier
- d. Ciment
- e. Ciment + granulats

➤ **Type des particules de déchets de caoutchouc**

- a. Copeaux
- b. Fibre
- c. Granulats (gros et fin)
- d. Poudre

➤ **Type de substitution**

- a. Volumique
- b. Massique

➤ **Taux de substitution**

- a. Granulats : de 5 jusqu'à 100 %
- b. Ciment : de 5 jusqu'à 50 %



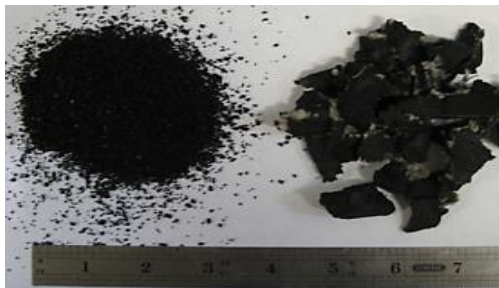
(a)



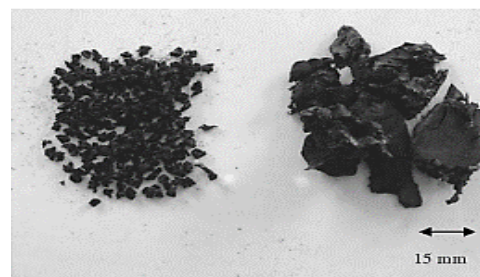
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.10 : quelques formes des déchets des pneus usagés utilisé dans les matériaux cimentaires

(a) Poudre [85] , (b) Copeaux [86] , (c) Granulats [87] ,
(d) Granulats (fin et gros) [95] , (e) Granulats (fin et gros) [79]

III.5. Conclusion

L'utilisation des déchets de pneus dans le domaine du génie civil a connu un fort développement ces dernières années. Ils remplacent progressivement certains matériaux de construction traditionnels.

Les déchets caoutchouteux – employés dans les matériaux cimentaires sous diverses formes telles que la poudre, les granulats, les copeaux et les fibres – peuvent être incorporés en substitution partielle du ciment, du sable et/ou des graviers dans un béton ou un mortier aux dimensions similaires. Cette incorporation représente une double aubaine : une réduction considérable des déchets pneumatiques, polluants persistants en raison de leur faible biodégradabilité, et une amélioration de certaines propriétés des matériaux, tout en offrant potentiellement une réduction des coûts par rapport à l'utilisation de matériaux naturels.

CHAPITRE IV

Influence des déchets des pneus usagés sur les propriétés des matériaux cimentaires

IV.1. Introduction

La valorisation des déchets de pneus usagés est un enjeu majeur, et leur intégration, sous forme de granulats de caoutchouc ou de poudre, dans les matériaux cimentaires est une voie de recherche et industrielle de plus en plus explorée. En effet, le caoutchouc, grâce à son élasticité et sa faible densité, pourrait conférer des propriétés améliorées aux bétons et mortiers. Toutefois, cette incorporation présente des défis significatifs, susceptibles d'affecter la durabilité intrinsèque de ces matériaux. Notre travail a pour objectif d'examiner l'influence de l'ajout de déchets de pneus usagés sur les diverses propriétés des matériaux cimentaires, tant à l'état frais qu'à l'état durci, en nous basant sur une revue approfondie des recherches existantes.

IV.2. Influence de l'Incorporation des déchets des pneus usagés sur les propriétés des matériaux cimentaires

IV.2.1. La substitution des granulats naturels par les granulats de caoutchouc des pneus usagés

IV.2.1.1. Etat frais

a. Ouvrabilité

L'ouvrabilité des matériaux cimentaire, qui donne une indication de sa rhéologie, est couramment évaluée par des essais mesurant soit l'affaissement, soit l'étalement (spécifiquement pour les bétons autoplacants).

De nombreuses études ont porté sur l'ouvrabilité des matériaux cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc (GC). [63,67-70,78,80-84,87,90,92,96,97,102,112, 113,114,118, 123-125,127 ,128...].

Aissaoui [123] a étudié l'ouvrabilité du béton modifié avec l'ajout de granulats de caoutchouc (GC). Il a observé que l'affaissement au cône d'Abrams augmentait avec l'incorporation de GC. Plus précisément, pour des taux de substitution du sable par des GC de 10, 17.5 et 25%, l'affaissement a augmenté respectivement de 42, 50 et 17%. Malgré ces augmentations, les bétons caoutchoutés sont restés classés dans la catégorie des bétons plastiques, tout comme le béton témoin (voir figure IV.1).

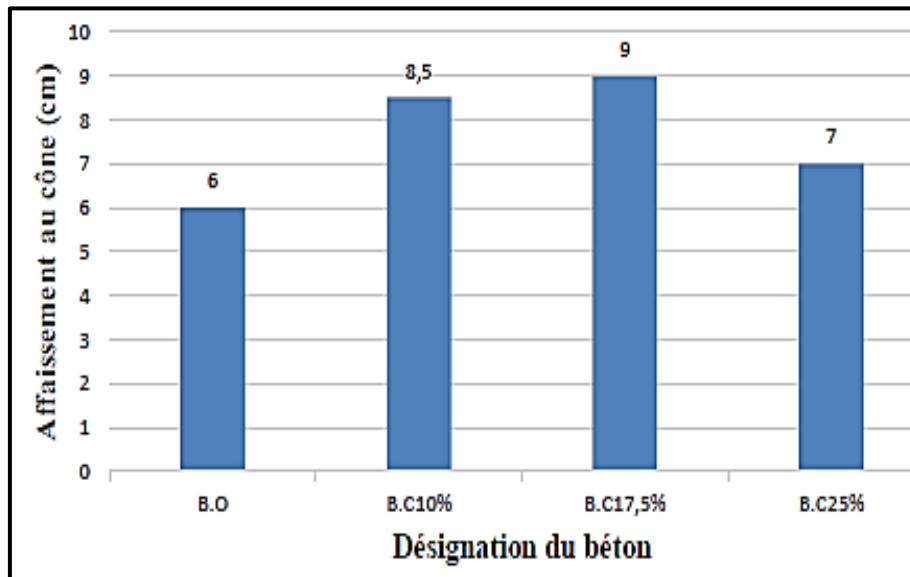


Figure IV.1: Influence des GC sur l'affaissement des bétons. [123]

Les mêmes remarques sont observées par Boudjedra [128], où l'incorporation des GC dans le béton ordinaire a une influence directe sur le comportement du béton frais (voir figure IV.2). Cette propriété augmente en augmentant la teneur en GC. On obtient une augmentation d'affaissement de 53% pour une substitution maximale de 20 % du sable par les particules de caoutchouc respectivement.

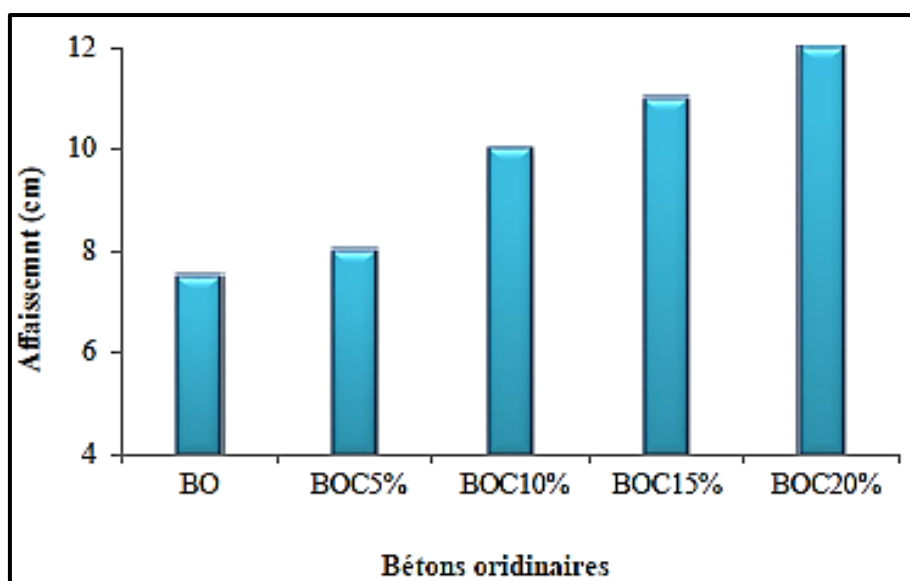


Figure IV.2: Influence des GC sur l'affaissement des bétons. [128]

Concernant le béton autoplaçant (BAP), les propriétés à l'état frais restent conformes aux recommandations de l'AFGC. Bignozzi et al. [78] ont évalué les performances mécaniques du BAP en remplaçant volumiquement le sable par des pourcentages de granulats de pneus usagés (22,2% et 33,3%). Cette étude a montré que l'étalement augmente avec le taux de substitution, atteignant 12% pour un remplacement de 33,3% des granulats de caoutchouc.

Cependant, d'autres études ont abouti à des conclusions différentes. Réda Taha et al. [84] ont, par exemple, observé une diminution de l'affaissement des bétons frais en remplaçant les gros et fins granulats par des granulats de caoutchouc (GC), avec des taux de substitution volumique de 25%, 50%, 75% et 100% (voir figure IV.3). Ils ont constaté que cette diminution était plus prononcée avec les gros granulats de caoutchouc qu'avec les petits, probablement en raison de leur taille. Cette réduction de l'affaissement est attribuée à la surface rugueuse du caoutchouc, qui augmente le frottement.

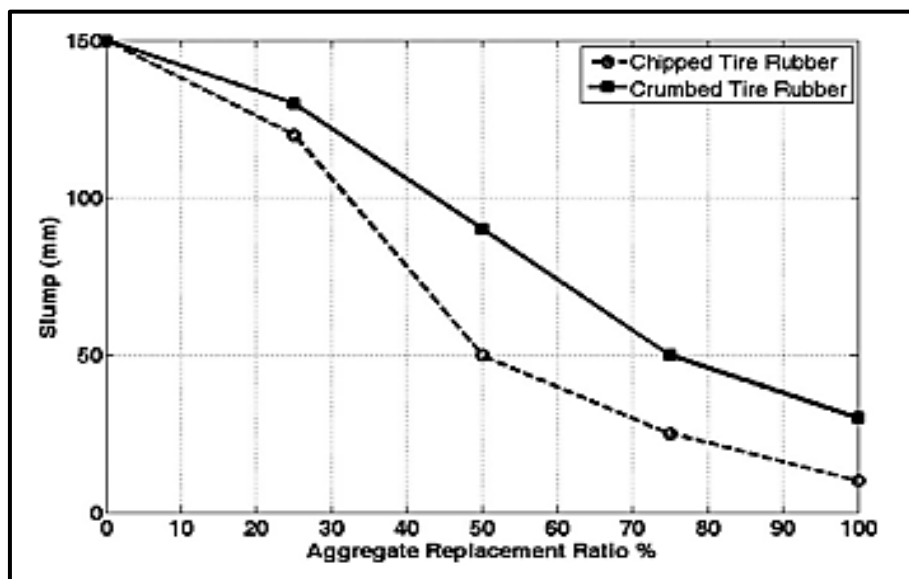


Figure IV.3: Effet du taux de remplacement des GC sur l'affaissement des bétons [84]

Selon Su et al. [112], cette réduction est principalement due à l'absorption d'eau plus élevée par les particules de caoutchouc que par le sable. Cela diminue la quantité d'eau libre dans le mélange, rendant ainsi le béton moins ouvrable.

Ce manque d'ouvrabilité se retrouve également dans le cas des bétons autoplaçants (BAP). Bensaci [125] a constaté que le remplacement du sable par des GC dans le BAP entraînait une diminution du diamètre d'étalement. Cette réduction a atteint 32% pour un taux de substitution maximal de 30% de granulats de caoutchouc (voir figure IV.4).

La diminution de la fluidité du béton peut s'expliquer aussi par le frottement généré entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. [125]

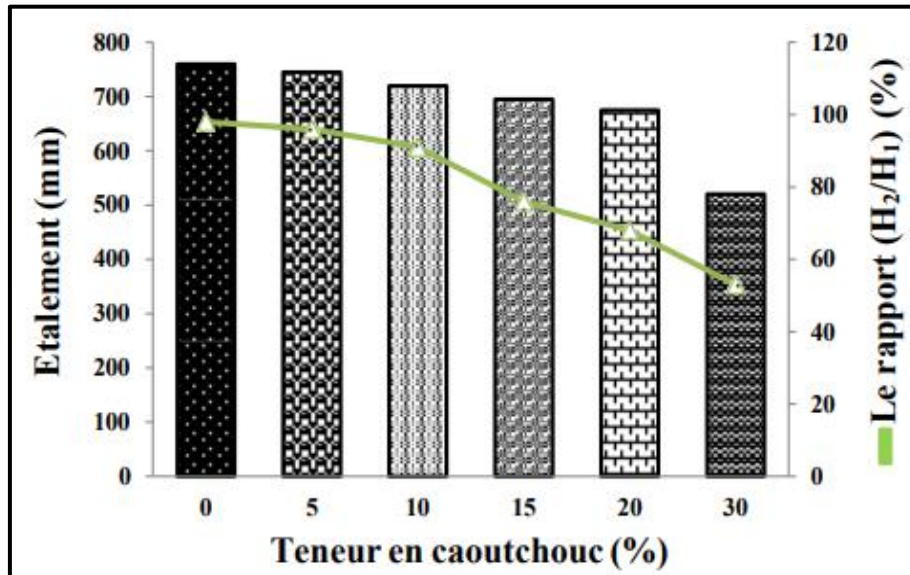


Figure IV.4: Influence des GC sur l'étalement des BAP.[125]

En ce qui concerne l'ouvrabilité des mortiers caoutchoutés, une étude expérimentale menée par Hadad et al. [113] a montré que l'affaissement des mortiers augmente avec l'accroissement du pourcentage de GC (voir figure IV.5). Au-delà de 25% de GC, l'affaissement se stabilise et tend vers une valeur constante de 14,2 cm. Cette augmentation s'explique par le fait que les granulats de caoutchouc n'absorbent pas l'eau, contrairement aux granulats naturels.

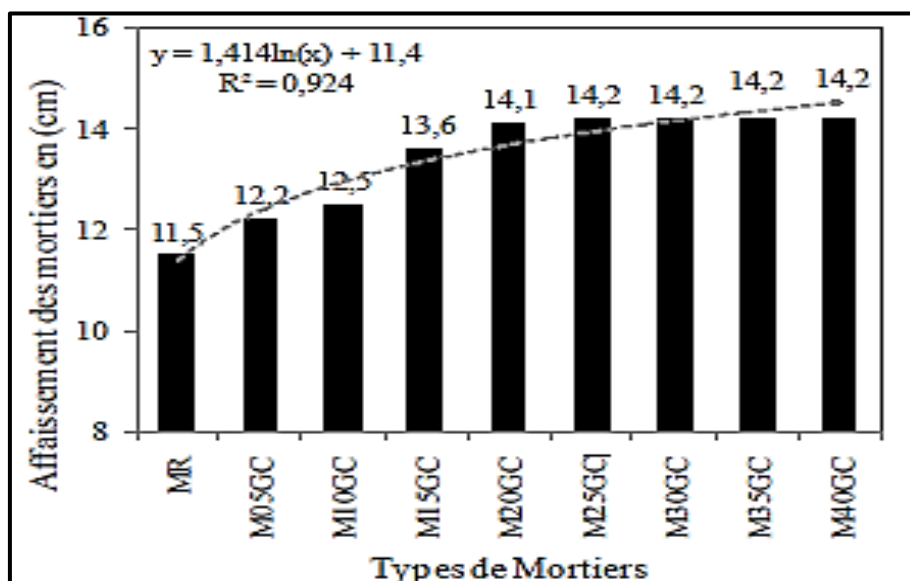


Figure IV.5: Influence des GC sur l'affaissement des mortiers. [113]

C'est la même observation que l'on retrouve dans les travaux de Benazzouk et al. [102] et Khelaifa et al. [127].

b. La masse volumique

La masse volumique du béton frais est directement liée à sa composition, en particulier à la masse volumique des granulats employés. Comme on peut s'y attendre, l'incorporation de GC entraîne une diminution de cette masse volumique en raison de leur faible densité.[123]

Indépendamment de la taille de particule de caoutchouc utilisée, une nette diminution de la masse volumique du béton frais a été observée avec l'incorporation de GC selon Su et al. [112]

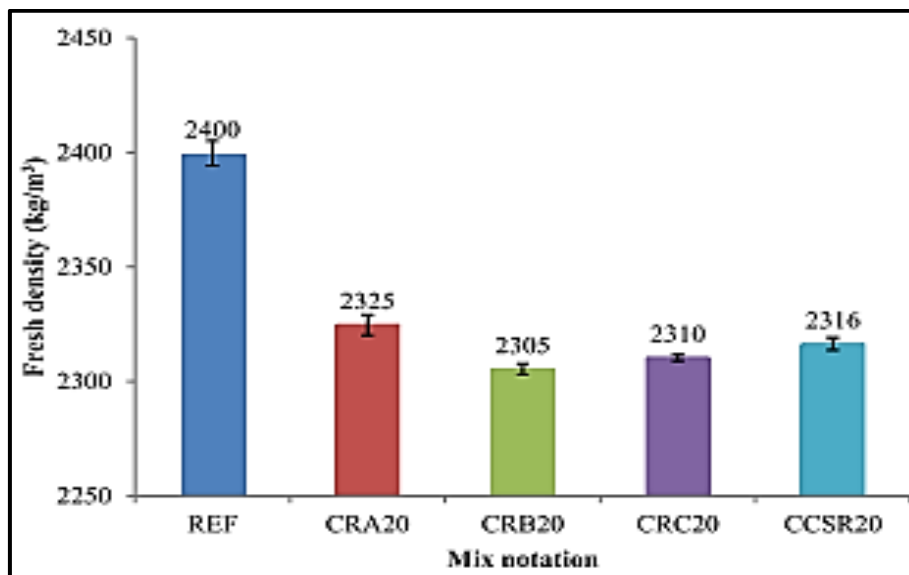


Figure IV.6: Influence des GC sur la masse volumique des bétons à l'état frais.[112]

Cette diminution s'explique principalement par les différences de densité des granulats de caoutchouc. Selon Su et al. [112], cette baisse atteint 3,9% pour une substitution volumique de 20% du sable par des GC, comparativement au béton de référence.

Aiello et al. [92] ont également constaté que l'incorporation de GC en remplacement des granulats naturels (gravier et sable) entraînait une réduction du poids unitaire du béton. Cette diminution atteignait 9% pour un taux de substitution volumique maximal de 75% de granulats de caoutchouc.

La diminution de la masse volumique est aussi une observation récurrente dans le cas des bétons autoplaçants, comme le confirment plusieurs études [114, 118, 125].

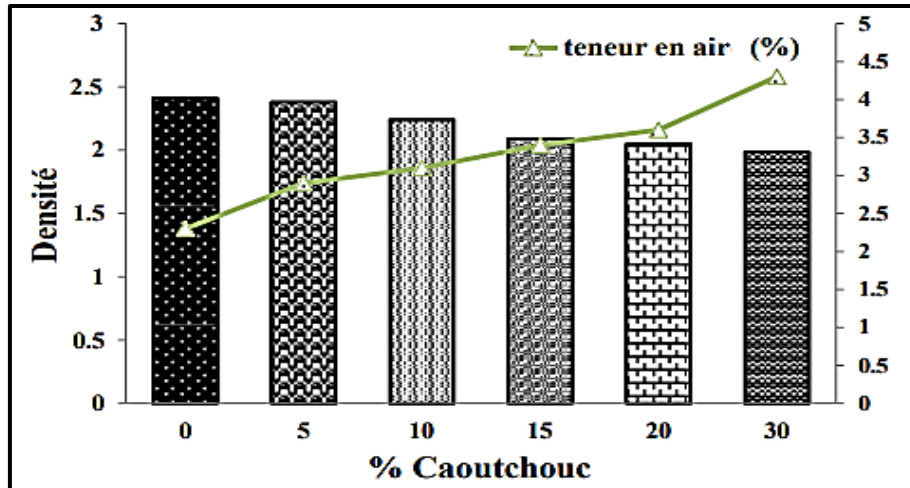


Figure IV.7: Influence des GC sur la masse volumique des bétons à l'état frais [125]

De plus, la légèreté du béton caoutchouté le rend particulièrement adapté aux applications architecturales, telles que les fausses façades et la construction intérieure.

c. Teneur en air

La teneur en air correspond au volume d'air intentionnellement introduit et emprisonné sous forme de bulles microscopiques dans le béton frais. Concernant cette propriété, de nombreuses études [67, 69, 70, 71, 84, 118, 124, 125] ont unanimement constaté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc incorporé.

Selon l'étude de Réda Taha et al. [84], l'augmentation de la teneur en particules de caoutchouc a conduit à une augmentation de la teneur en air du mélange, ce qui a, en retour, entraîné une réduction plus significative du poids unitaire (voir figure IV.8).

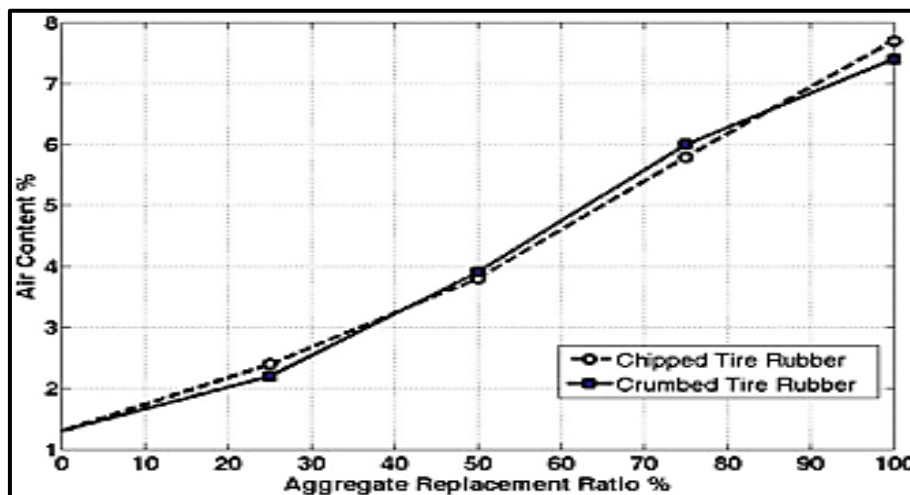


Figure IV.8: Influence du GC sur la teneur en air. [84]

Cette augmentation est attribuée à la nature non polaire des particules de caoutchouc et à leur tendance à repousser l'eau, piégeant ainsi de l'air dans le mélange de béton. [84]

Une observation similaire a été faite pour le BAP, Bensaci [125] a constaté que la teneur en air augmentait de 89,9% lorsque le dosage en caoutchouc passait de 0 à 30% (voir figure IV.9). Cette augmentation de l'air occlus est directement liée à la baisse de densité du béton caoutchouté. Ils ont rapporté que l'air piégé dans la surface rugueuse des particules de caoutchouc contribuant à alléger le béton.

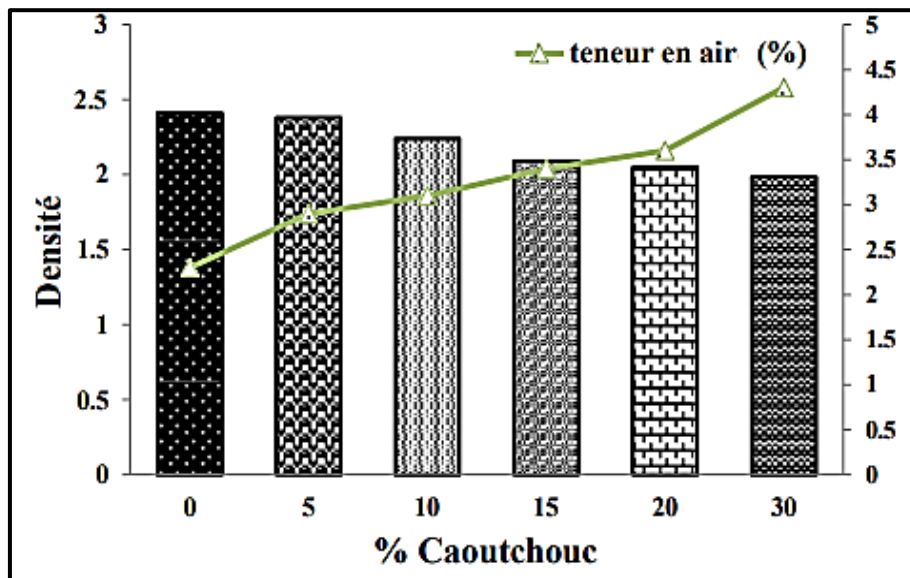


Figure IV.9: Effet du taux d'incorporation des GC sur la teneur en air des BAP [125]

Pour le mortier, les résultats de Benazzouk et al. [102] ont montré que l'entraînement d'air passe de 2,8% pour le mortier de référence à 8,6% pour une composition à 100% de caoutchouc. Cette augmentation est due à la nature non-polaire du caoutchouc, qui, de par sa texture et sa morphologie, tend à entraîner de l'air dans la matrice [102].

Cependant, d'autres résultats présentent une tendance différente. Selon Al Akhrass et al. [71], la teneur en air des mortiers caoutchoutés a diminué de 42% pour une teneur en caoutchouc de 10% (voir figure IV.10).

Cette observation est attribuée au fait que les particules de granulats de caoutchouc occupent une partie des vides d'air initialement présents dans le mélange de mortier. Ainsi, la teneur en air du mortier de GC a diminué malgré une réduction de la maniabilité à mesure que le niveau de remplacement du GC augmentait.

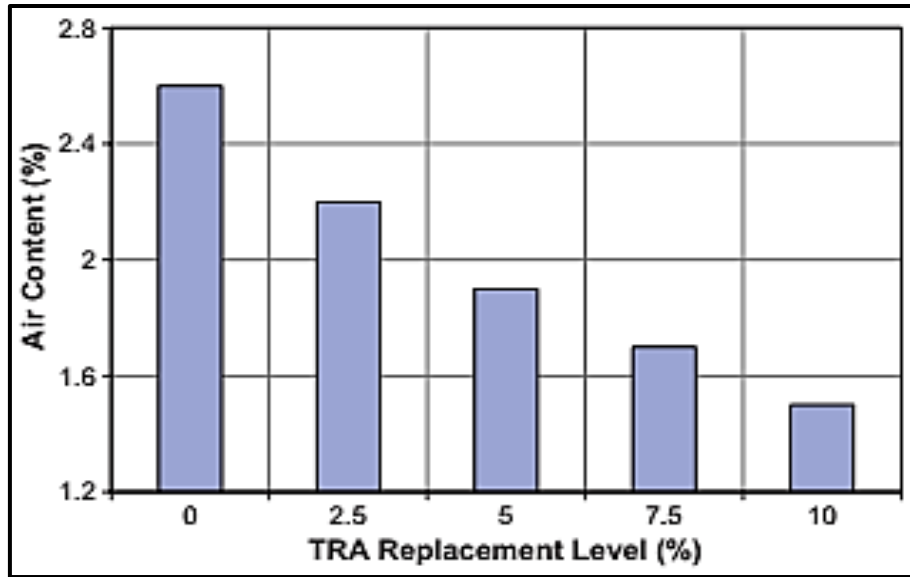


Figure IV.10: Influence des GC sur la teneur en air du mortier.[71]

IV.2.1.2. Etat durcis

a. Résistance à la compression

Un facteur clé influençant la résistance à la compression des matériaux cimentaires est le type de granulats utilisés. Les chercheurs ayant étudié les bétons où une partie des granulats naturels est remplacée par des granulats de caoutchouc ont unanimement constaté que cette substitution entraînait inévitablement une baisse de la résistance à la compression. Plus le taux de substitution est élevé, plus cette détérioration est prononcée.[123]

Girskas et al. [119] ont démontré qu'une substitution de 20% en poids de granulats entraînait une chute de 68% de la résistance à la compression (voir figure IV.11). Plusieurs facteurs expliquent cette diminution, les particules de caoutchouc sont plus souples et moins résistantes que la matrice de ciment.

Par conséquent, les fissures ont tendance à apparaître en premier lieu à l'interface entre le granule de caoutchouc et la matrice ; le remplacement de granulats de densité et de résistance supérieures par des granulats plus faibles et moins denses réduit inévitablement la résistance à la compression.

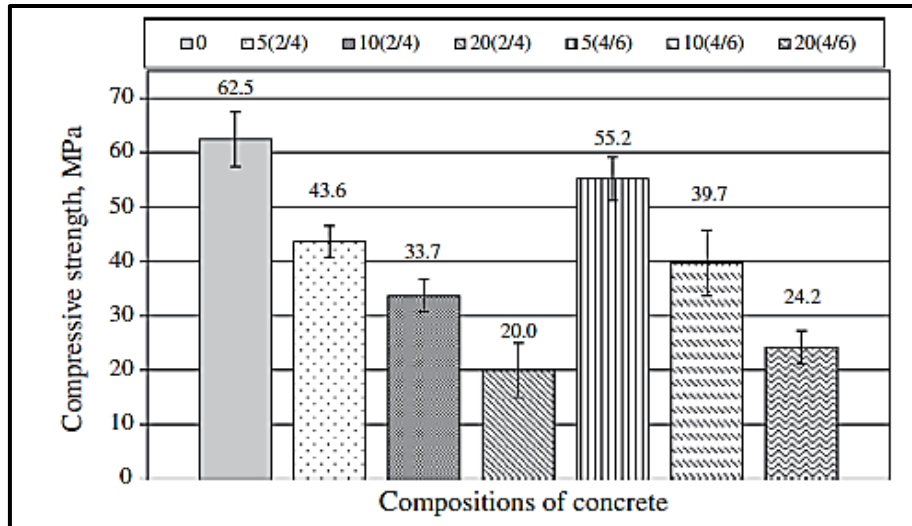


Figure IV.11: Influence des GC sur la résistance à la compression des bétons. [119]

Robert Bennett [108] a également abordé la diminution de la résistance à la compression. Il a expliqué que cette réduction est due à la nature plus faible et plus élastique des particules de caoutchouc par rapport à la matrice de ciment environnante. Cette différence de propriétés permet aux fissures de se propager facilement depuis la zone de contact entre le caoutchouc et la matrice de ciment, conduisant progressivement à la rupture du béton sous charge. [108]

Pour les bétons autoplaçants, une étude menée par Zaoiai et al. [114] ont révélé que la résistance à la compression diminuait significativement. Pour un taux de GC de 5% (GC 0/3) et 20% (GC 3/8), la résistance a chuté respectivement de 37,5% et 35,9%. Cette réduction est attribuée à la faible qualité de l'interface entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment.

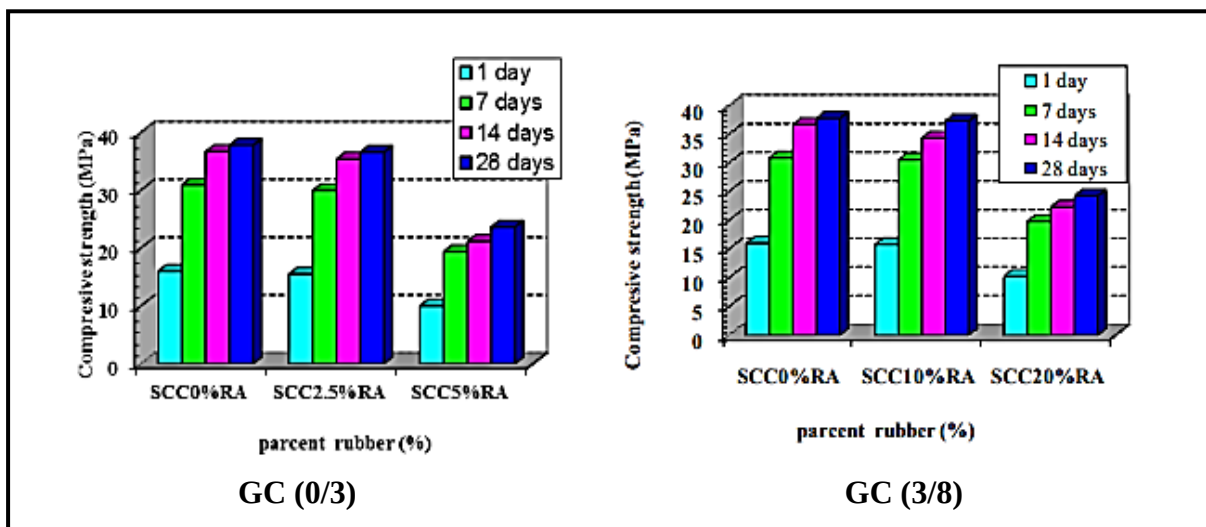


Figure IV.12: Influence des GC sur la résistance à la compression des bétons. [114]

Bensaci [125] a attribué cette réduction à la faible rigidité du caoutchouc comparée à celle des granulats naturels, ainsi qu'au manque d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire.

L'analyse de la structure interne du béton caoutchouté révèle que la perte significative de résistance est principalement due au fait que les particules de caoutchouc agissent comme des granulats faibles, plutôt qu'à une mauvaise liaison entre le caoutchouc et le ciment. [84]

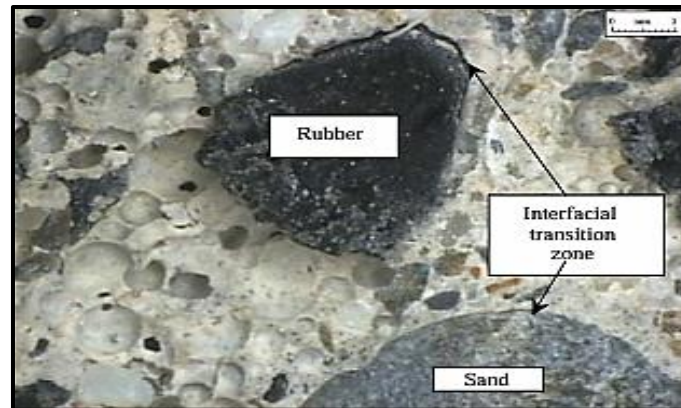


Figure IV.13: Zone de transition interfaciale entre la pâte de ciment et « GC et GN ». [74]

L'incorporation de GC entraîne une diminution de la résistance à la compression des mortiers [71, 74, 86, 102, 113, 122, 126, 127, 129].

Par exemple, Guelmine et al. [122] ont observé une réduction de l'ordre de 48% pour un dosage en GC variant de 0 à 9%, la résistance passant de 46 MPa à 23 MPa (voir figure IV.14). Cette perte de performance mécanique est principalement attribuée à la faible adhérence des particules de caoutchouc à la matrice cimentaire [122].

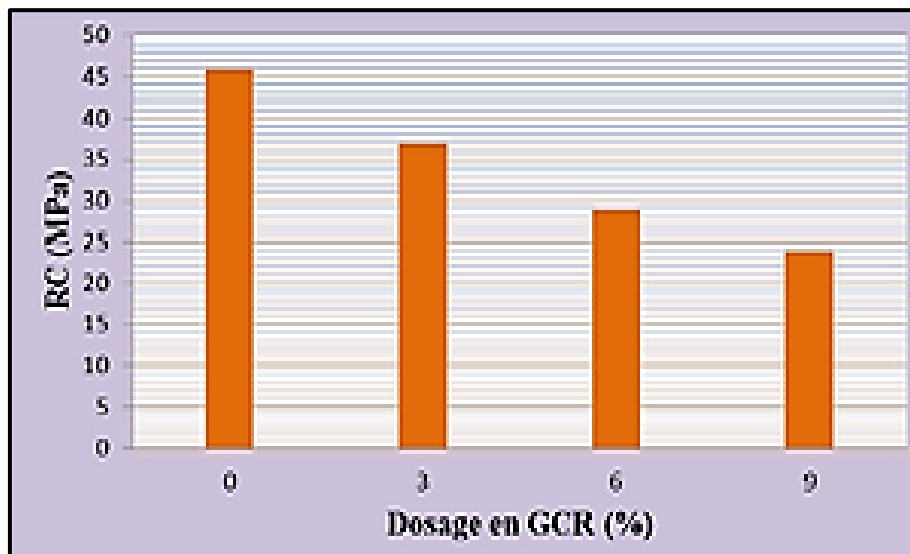


Figure IV.14: Influence des GC sur la résistance en compression des mortiers [122]

La perte de résistance des mortiers est imputable à deux facteurs principaux : d'une part, la nature élastique des particules de caoutchouc, et d'autre part, l'augmentation de la porosité due à une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau, en fonction de la composition en caoutchouc [102, 127].

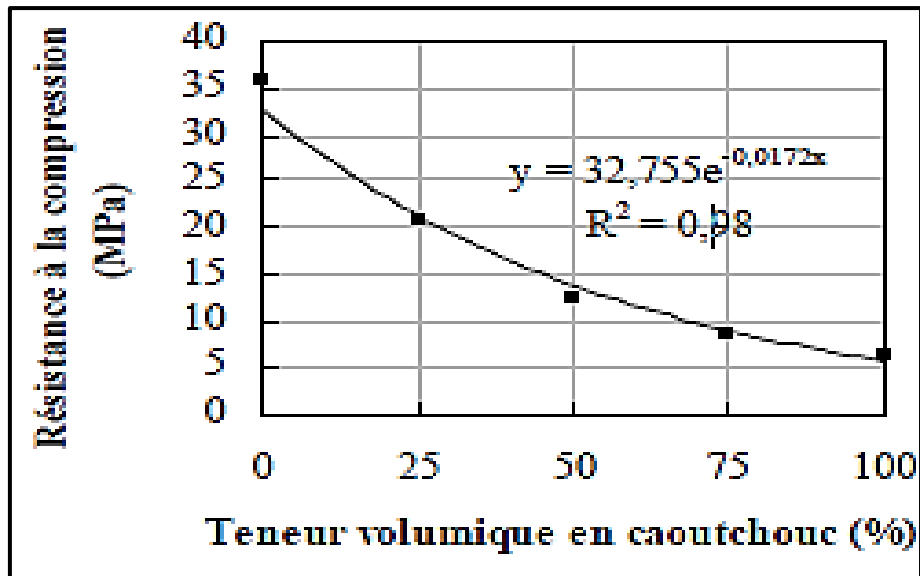


Figure IV.15: Influence des GC sur la résistance en compression des mortiers. [102]

b. Résistance à la flexion

Le remplacement des granulats naturels par des GC dans le béton est systématiquement associé à une perte de résistance à la flexion [63-65, 67, 71, 86, 90, 92, 98, 99, 102, 103, 105, 112, 114, 123, 125, 126]. Tout comme la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue à mesure que la teneur en GC dans le béton augmente.

Bisht et al. [120] ont notamment observé qu'une incorporation de 5,5% de GC entraînait une diminution de 16,5% de la résistance à la flexion (voir figure IV.16). Cette chute dépend généralement de la forme et de la taille des GC, et est également attribuée à la présence de fissures qui mènent à une faible liaison entre les matériaux constitutifs.

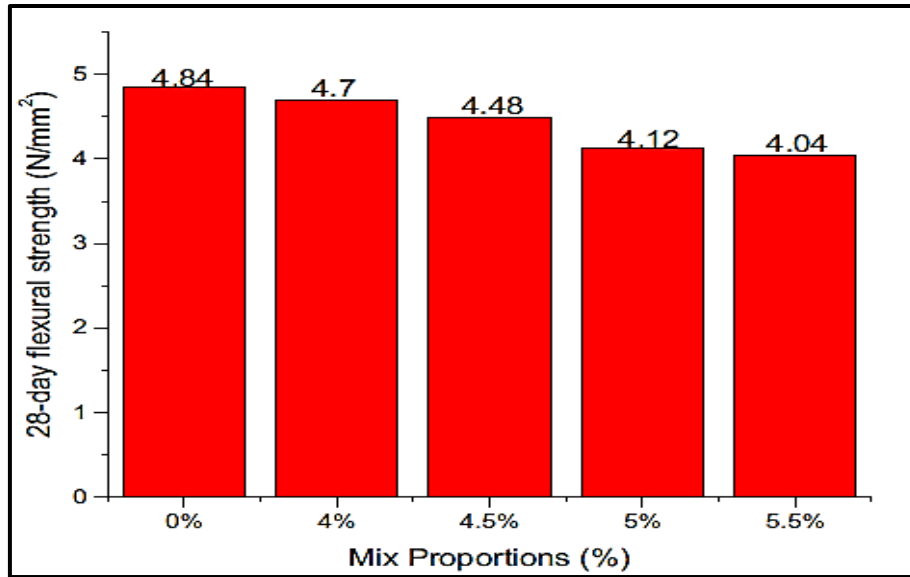


Figure IV.16: Influence des GC sur la résistance à la flexion des bétons [120]

On observe la même tendance pour les (BAP). Zaoia et al. [114] ont attribué cette réduction de la résistance à la flexion à la mauvaise qualité de l'interface entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment.

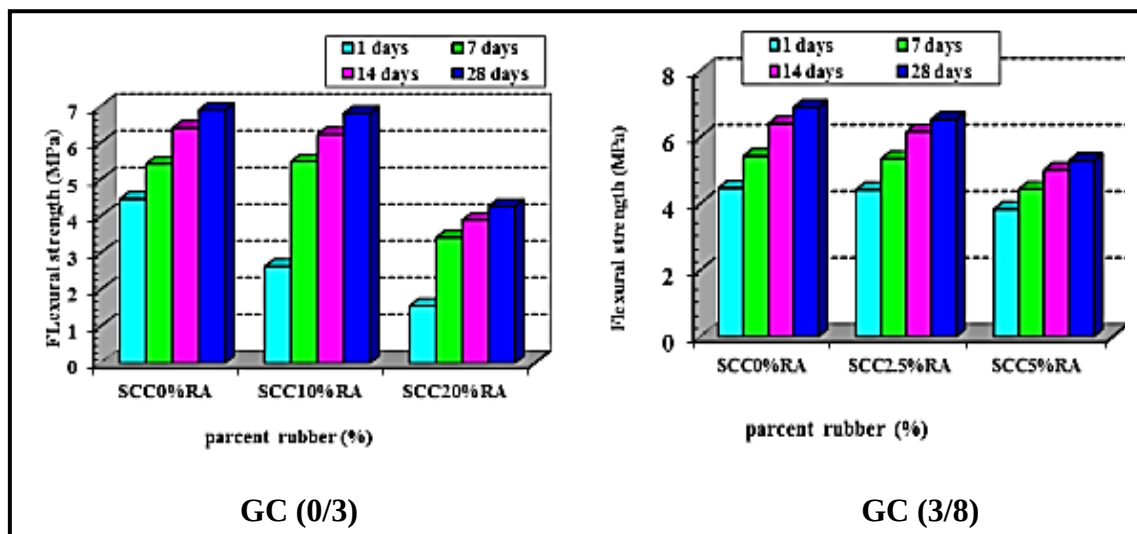


Figure IV.17: Influence des GC sur la résistance à la flexion des bétons autoplaçants. [114]

Selon Najim et al. [98], bien que la substitution par des GC réduise la résistance à la flexion, elle entraîne une amélioration significative de la capacité de déformation. Les particules de caoutchouc peuvent ainsi retarder la formation de microfissures en relaxant les contraintes. Elles améliorent de manière mesurable la capacité de déformation avant l'apparition des

microfissures, ce qui réduirait très probablement et de manière bénéfique la fissuration due au retrait.

Tout comme la résistance à la compression, la résistance à la flexion des mortiers diminue à mesure que la proportion de granulats de caoutchouc augmente [102]. Par exemple, elle passe de 4,1 MPa pour le mortier de référence à 2,6 MPa pour une composition contenant 100% de caoutchouc selon Benazzouk et al. [102] (voir figure IV.18).

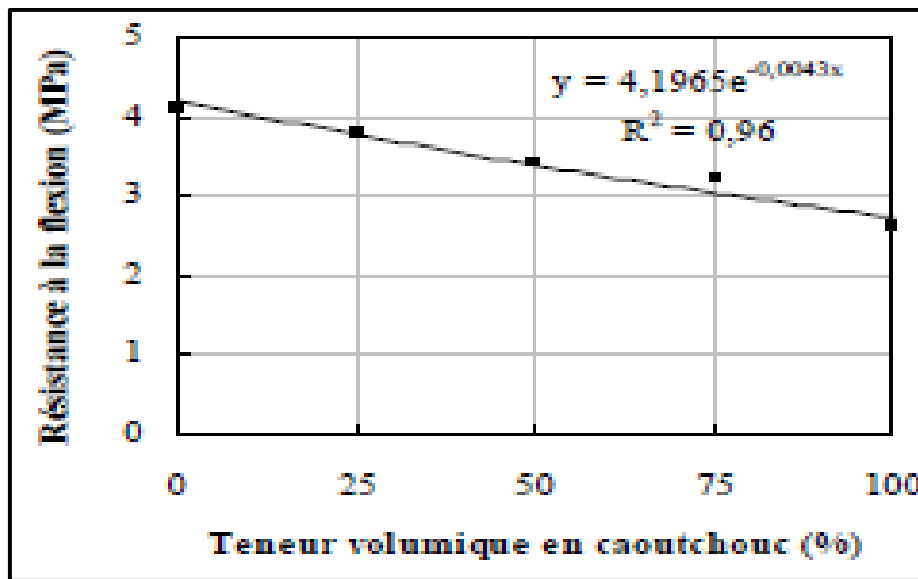


Figure IV.18: Influence des GC sur la résistance à la flexion des mortiers [102].

c. Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton représente sa capacité à supporter des forces d'étirement sans se fissurer ni se rompre. Comme cela a été mentionné pour la résistance à la compression, les chercheurs s'accordent unanimement sur le fait que les granulats de caoutchouc sont préjudiciables à la résistance à la traction [63, 64, 69, 70, 74, 81, 88, 90, 97, 112, 118, 123, 124, 127, 129].

Ganjian et al. [88] ont observé une réduction de 44% de la résistance à la traction par rapport au mélange témoin, suite au remplacement de 7,5% des granulats naturels par des granulats de caoutchouc (voir figure IV.19).

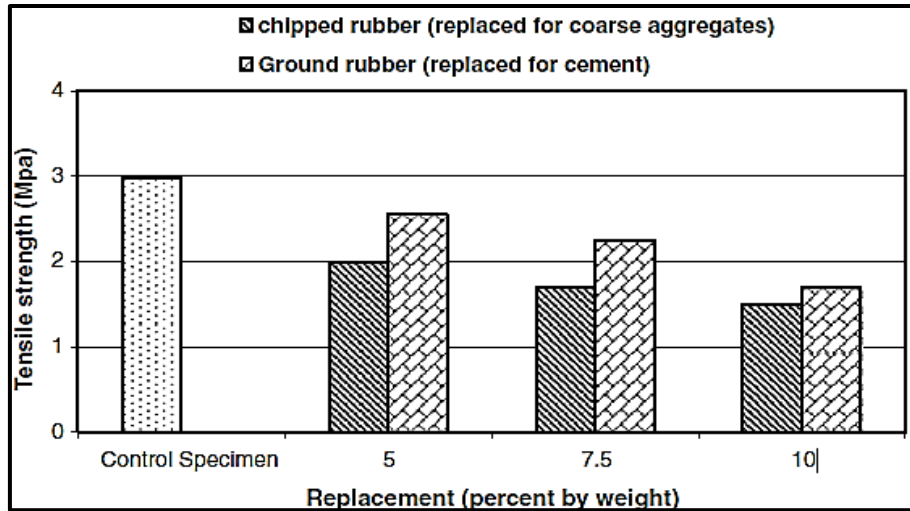


Figure IV.19 : Influence des GC sur la résistance à la traction des bétons [88].

Ce phénomène s'explique par le fait que, lors de la propagation d'une fissure, le contact avec une particule de caoutchouc et la contrainte exercée provoquent une ségrégation de surface entre le caoutchouc et la pâte de ciment. On peut donc conclure que le caoutchouc agit simplement comme une cavité et un point de concentration des contraintes, menant à une rupture rapide du béton. [88]

Najim et al. [98] ont attribué la baisse de la résistance à la traction des BAP à une faible liaison dans la zone de transition interfaciale entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc.

Les résultats concernant la résistance à la traction des mortiers confirment qu'une substitution par des GC entraîne une diminution significative de cette propriété. Pour un composite incorporant 30% de GC, ces valeurs chutent respectivement de 30% et 25% par rapport à celles du mortier témoin selon Turatsinze et al. [74].

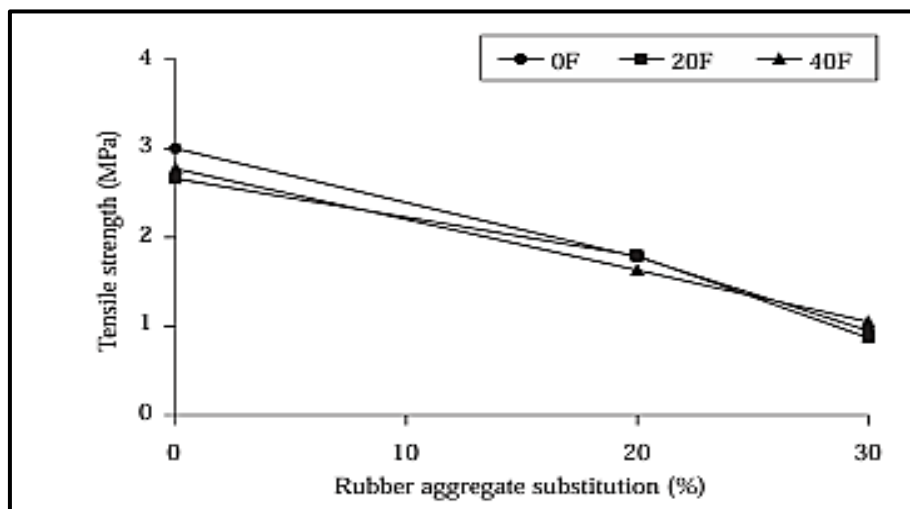


Figure IV.20: Influence des GC sur la résistance à la traction des mortiers. [74].

d. Module d'élasticité

De nombreux travaux confirment que l'incorporation de GC entraîne une chute importante du module d'élasticité [63, 69, 70, 83, 89, 93, 94, 107]. Cuong [93] a notamment observé que l'ajout de GC provoquait une diminution significative du module, de l'ordre de 51%, pour un taux de substitution de 40% par rapport au béton de référence.

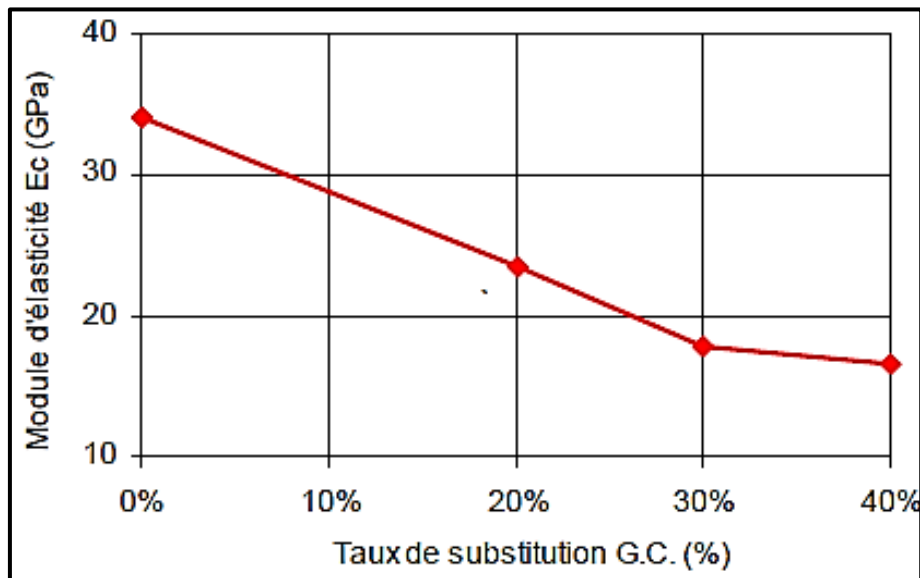


Figure IV.21 : Influence du GC sur le module d'élasticité [93]

Selon Bennett [108], le module d'élasticité réduit des matériaux à base de caoutchouc indique également que le béton caoutchouté est moins fragile que le béton traditionnel. Cela se traduit par une meilleure performance sous des charges dynamiques, sans rupture soudaine de l'éprouvette.

Benazzouk et al. [102] ont démontré que l'incorporation de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire réduit le module d'élasticité dynamique des mortiers de 23 GPa à 3,2 GPa, pour une teneur en caoutchouc variant de 0% à 100% (voir figure IV.22).

Cette diminution s'explique par la nature du caoutchouc, qui absorbe les ondes ultrasonores. Ce phénomène est amplifié par la présence de bulles d'air dans la matrice : les ondes doivent les contourner pour se propager dans la pâte de ciment. Cela augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et, par conséquent, réduit sa vitesse. Ces résultats indiquent que le composite à base de caoutchouc possède des capacités d'atténuation des ondes ultrasonores et d'amortissement des vibrations. [102]

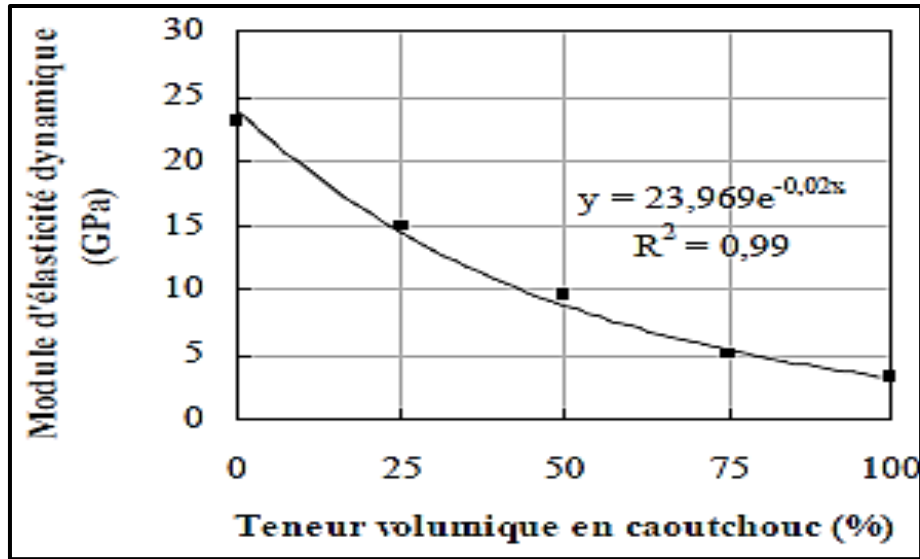


Figure IV.22: Influence du GC sur le module d'élasticité dynamique. [102]

e. Vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV)

L'impact de l'incorporation de granulats de caoutchouc (GC) sur les vitesses ultrasoniques a été largement étudié [63, 64, 78, 80, 82, 98, 101, 104, 108, 119, 122, 127].

Par exemple, Bennett [108] a observé une réduction de 3 % de la vitesse ultrasonique dans les bétons contenant 15 % de GC en substitution aux granulats naturels, comparativement au béton témoin.

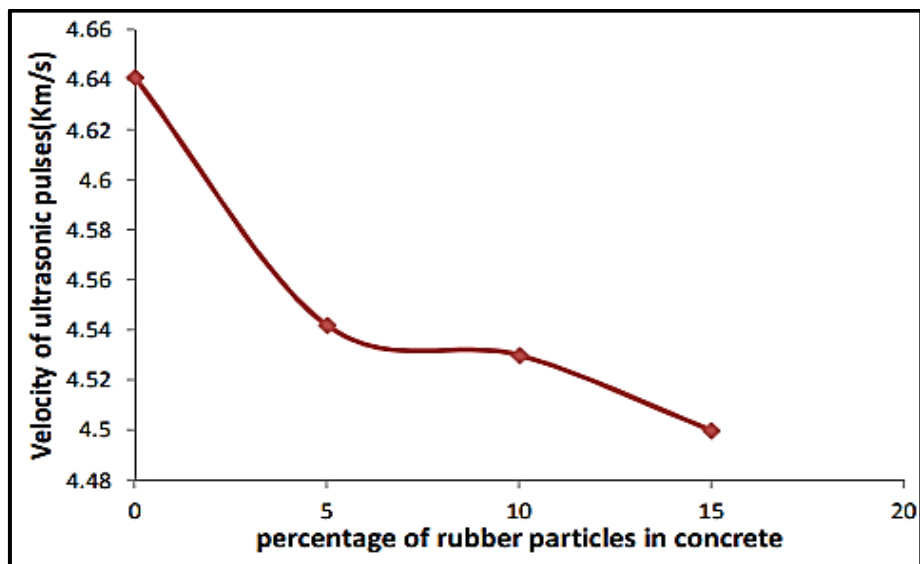


Figure IV.23: Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des bétons [108]

Une autre étude, menée par Girskas [119], a également révélé une diminution des vitesses d'impulsion ultrasonore de 13 % lorsque 20 % du sable était remplacé par des GC.

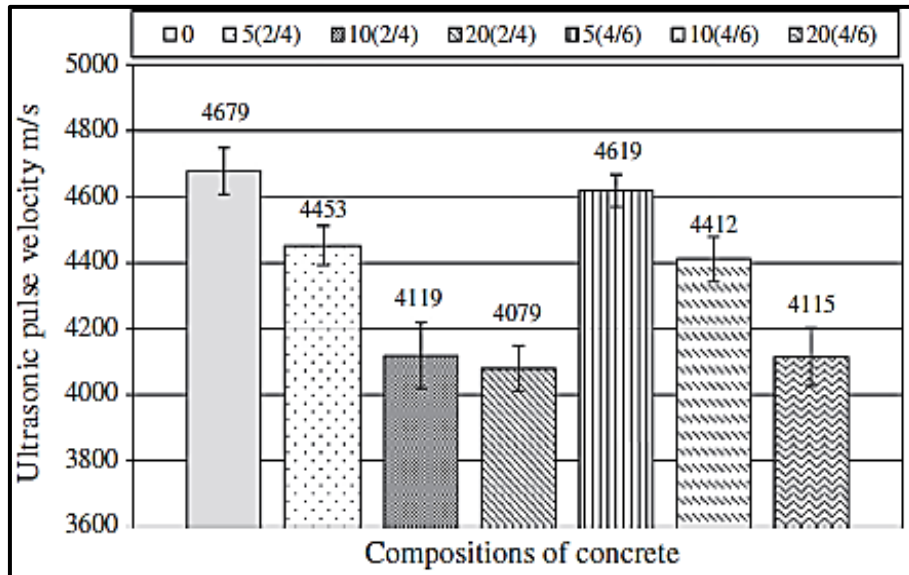


Figure IV.24: Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des bétons.[119]

Dans le même ordre d'idées, Boudjedra [128] a démontré que le remplacement du sable par des GC dans le béton ordinaire, ainsi que dans le béton auto-plaçant (BAP), entraînait une diminution des vitesses ultrasoniques à tous les âges. Elle a également observé que cette diminution s'accroît avec l'augmentation de la teneur en GC (voir figure IV.25).

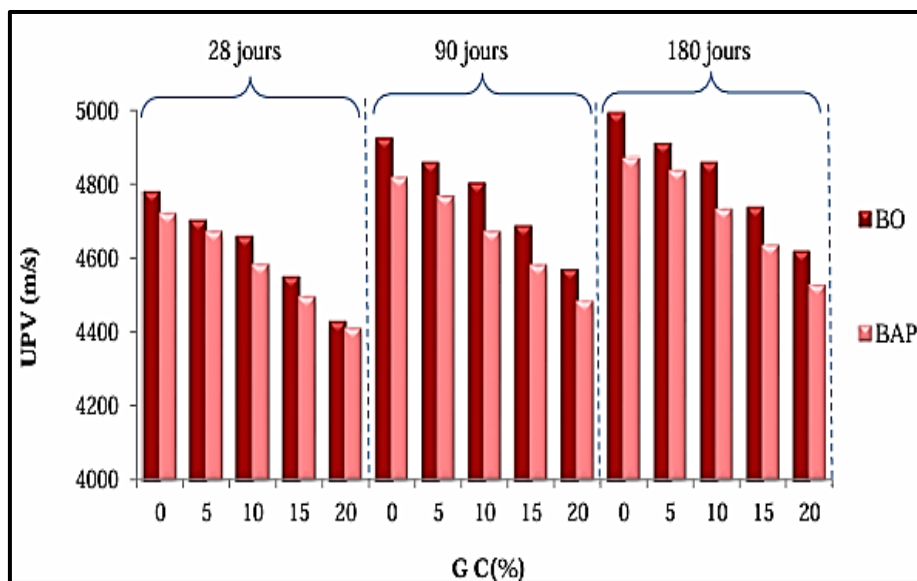


Figure IV.25: Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des BAP.[128]

Cette baisse est due à l'augmentation de la porosité et à la teneur plus élevée en vides d'air en raison des surfaces rugueuses des particules de caoutchouc. Sans oublier la densité des granulats de caoutchouc qui est très inférieures à celles des autres constituants de ces bétons. [128]

De fortes réductions de la vitesse des ultrasons indiquent une composition interne poreuse du béton caoutchouté. Cette diminution de la vitesse rend le béton caoutchouté un bon absorbant acoustique, ce qui peut être avantageux pour les structures nécessitant une atténuation sonore [108].

La figure IV.26 met en évidence la diminution de la vitesse d'impulsion ultrasonique dans les mortiers à mesure que la proportion de GC recyclé augmente. Guelmine et al. [122] ont rapporté des réductions significatives, atteignant 26,56 % pour les mortiers incorporant 9 % de GC par rapport au mortier de référence. Cette baisse de vitesse s'explique par la capacité des GC à absorber les ondes ultrasoniques. Ils agissent comme des vides au sein de la structure du matériau cimentaire, ce qui a pour effet d'allonger le temps de propagation de l'onde et, par conséquent, de réduire sa vitesse [121].

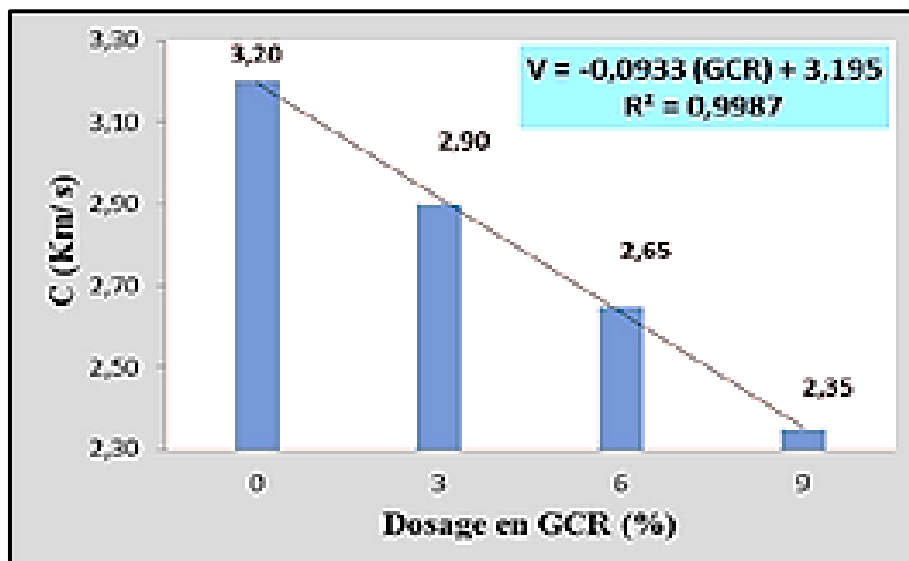


Figure IV.26: Influence du GC sur la vitesse des impulsions ultrasonores des mortiers [122].

f. Porosité

La porosité est une caractéristique cruciale qui impacte significativement les propriétés des matériaux cimentaires, incluant sa résistance mécanique, sa perméabilité, sa durabilité et sa masse volumique. Elle est également influencée par l'incorporation des GC.

Une étude menée par Girskas [119] a révélé une augmentation d'environ 16 % de la porosité des bétons caoutchoutés par rapport au béton témoin, lorsque 20 % des granulats naturels étaient remplacés par des GC (voir figure IV.27). Cette augmentation peut s'expliquer par une plus grande quantité d'air occlus dans les mélanges de béton, ainsi que par la présence de pores fermés au sein des particules de caoutchouc elles-mêmes.

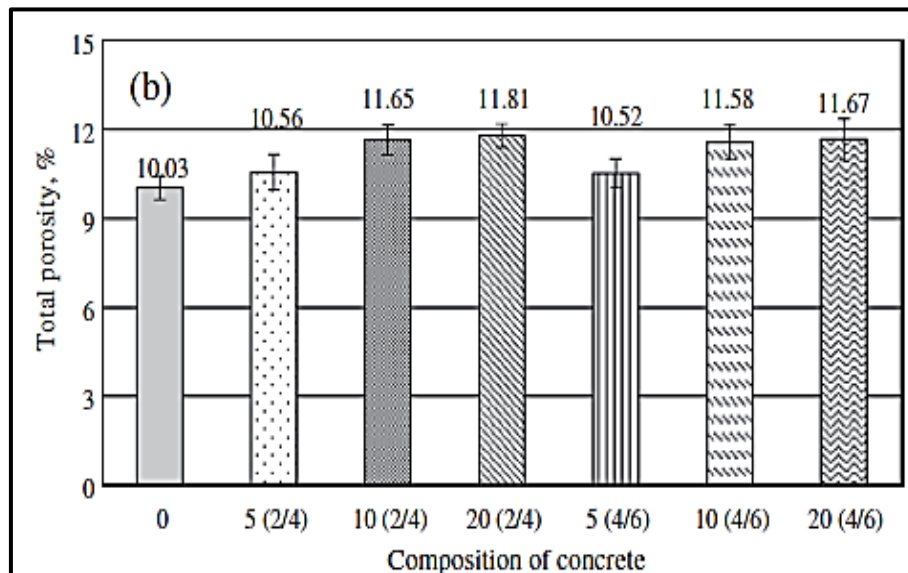


Figure IV.27: Influence du GC sur la porosité des bétons.[119]

Pour le béton autoplaçant (BAP), les résultats de Bignozzi [78] ont montré une très légère augmentation de la porosité avec l'ajout de caoutchouc dans les mélanges. Ceci est probablement dû à des écarts de granulométrie du sable ou à une quantité d'air occlus légèrement plus élevée piégée lors du malaxage du BAP caoutchouté. C'est une conséquence directe de cette teneur en air occlus et de la surface plus rugueuse des granulats de caoutchouc.

g. Masse volumique

L'influence des granulats de caoutchouc (GC) sur la masse volumique du béton à l'état frais est similaire à celle observée à l'état durci.

Bennett [108] a constaté une diminution du poids unitaire du béton durci à mesure que le taux de substitution par des particules de caoutchouc augmente (voir figure IV.28).

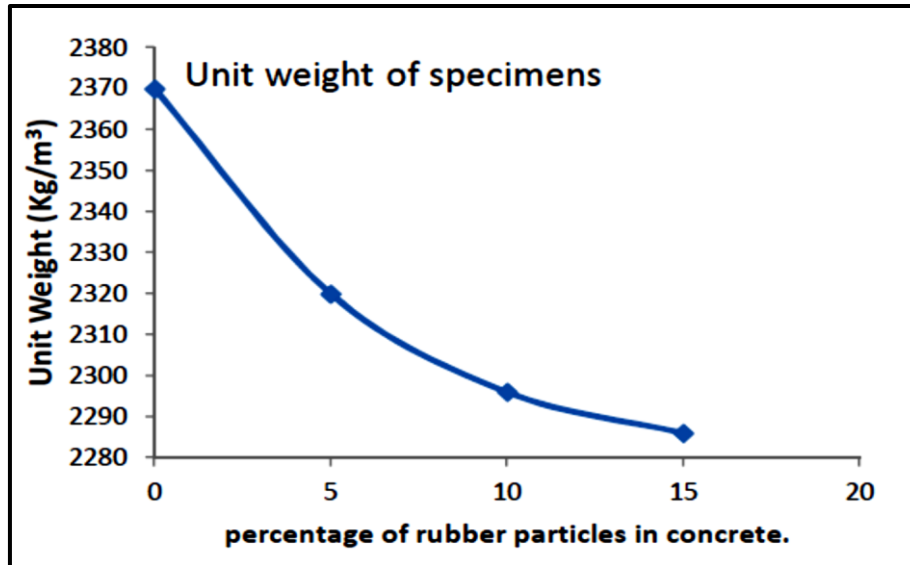


Figure IV.28 : Influence du GC sur le poids unitaire des bétons. [108]

Cette diminution atteint 3,54 % pour une substitution de 15 % de GC. Comme à l'état frais, cette baisse est attribuée à la faible densité des granulats de caoutchouc par rapport à celle du gravier. [108]

Dans le cas des mortiers, une étude menée par Khelafia et al. [127] a démontré une réduction significative de 13,82 % de la masse volumique sèche par rapport au mortier témoin, lorsque le taux de granulats de caoutchouc augmentait de 0 à 30 % (voir figure IV.29).

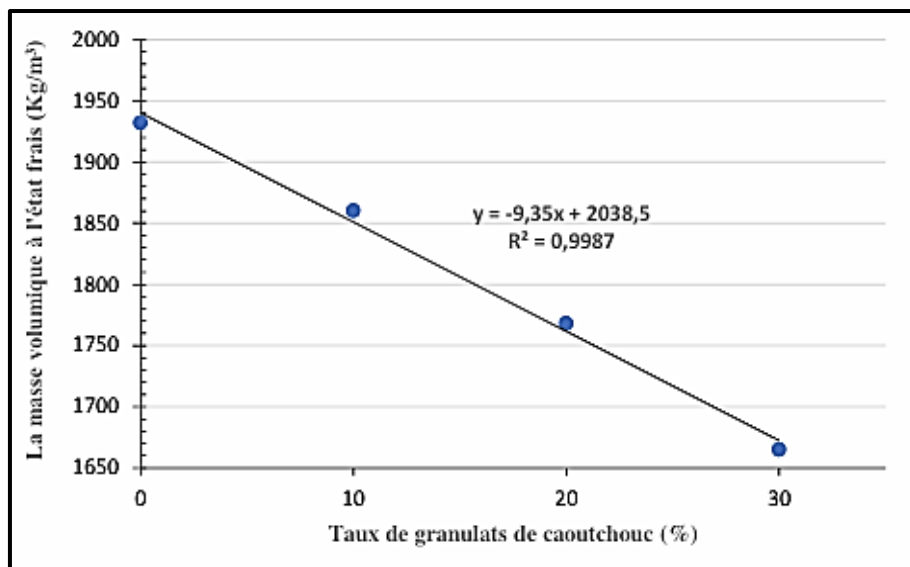


Figure IV.29 : Influence du GC sur le poids unitaire des mortiers [127].

La faible masse volumique des granulats de caoutchouc est le principal facteur expliquant cette réduction. De plus, la nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, qui piège les bulles d'air, contribue également à l'allègement des composites incorporant ces granulats.[127]

h. La conductivité thermique

L'ajout de caoutchouc au béton réduit de manière significative sa conductivité thermique, comme l'illustre la figure IV.30.

L'incorporation de granulats de caoutchouc dans le béton améliore considérablement son isolation thermique. Cette réduction de la conductivité thermique peut améliorer la durabilité des structures à base de béton caoutchouté et s'avérer utile pour l'isolation en période de chaleur. [125]

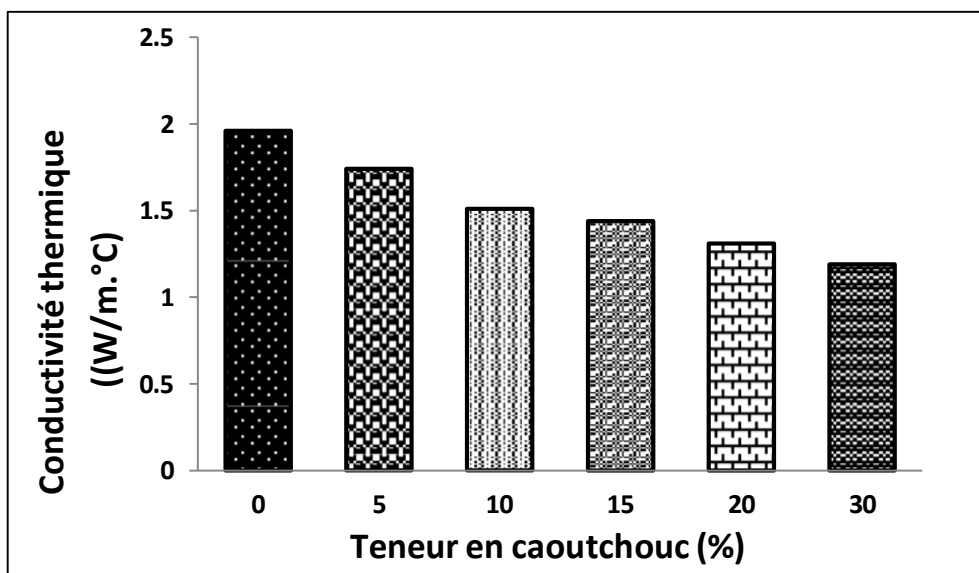


Figure IV.30: Influence du GC sur la conductivité thermique des bétons.[125]

i. Pénétration aux ions de chlorure

Selon Bencassi [125], les recherches de Thomas et al. [115] indiquent que l'intégration de granulats de caoutchouc dans le béton réduit le transfert d'ions chlorure jusqu'à un taux de 7,5 % (voir figure IV.31). Au-delà de ce seuil, la pénétration des chlorures augmente. Cette diminution initiale s'explique par l'imperméabilité des GC, qui bloquent le passage des ions en n'absorbant pas l'eau. L'augmentation subséquente de la pénétration des chlorures, au-delà de 7,5 %, est attribuée à la présence de GC non enrobés par la pâte de ciment. [125]

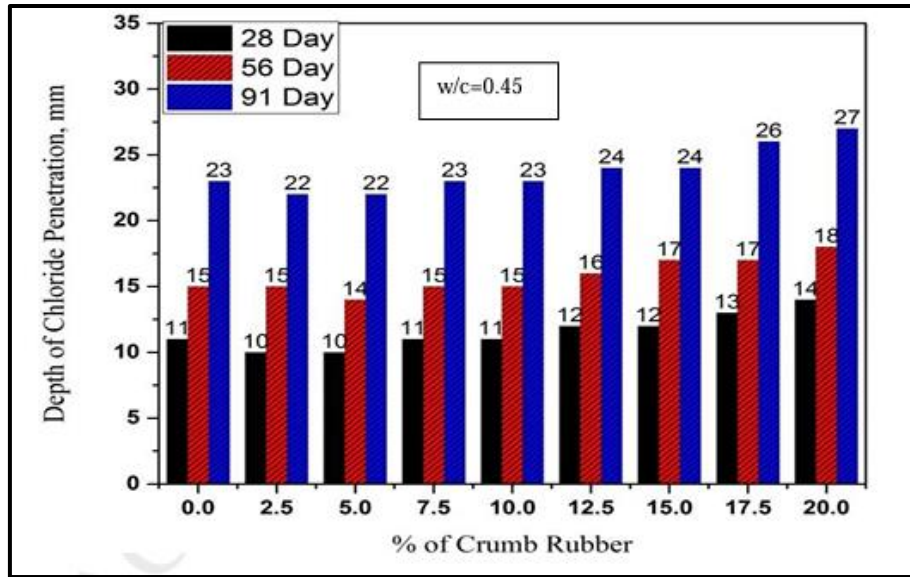


Figure IV.31: Influence du GC sur la profondeur de pénétration des chlorures.[115]

j. Résistance à l'abrasion

Lorsqu'ils sont exposés à l'acide, les échantillons de béton témoin ont montré la perte de poids la plus élevée, tandis que le mélange avec 20 % de caoutchouc a enregistré la perte la plus faible. Il est clair que le béton caoutchouté offre une meilleure résistance aux environnements agressifs, notamment aux attaques acides, le rendant ainsi plus adapté à ces conditions. [115]

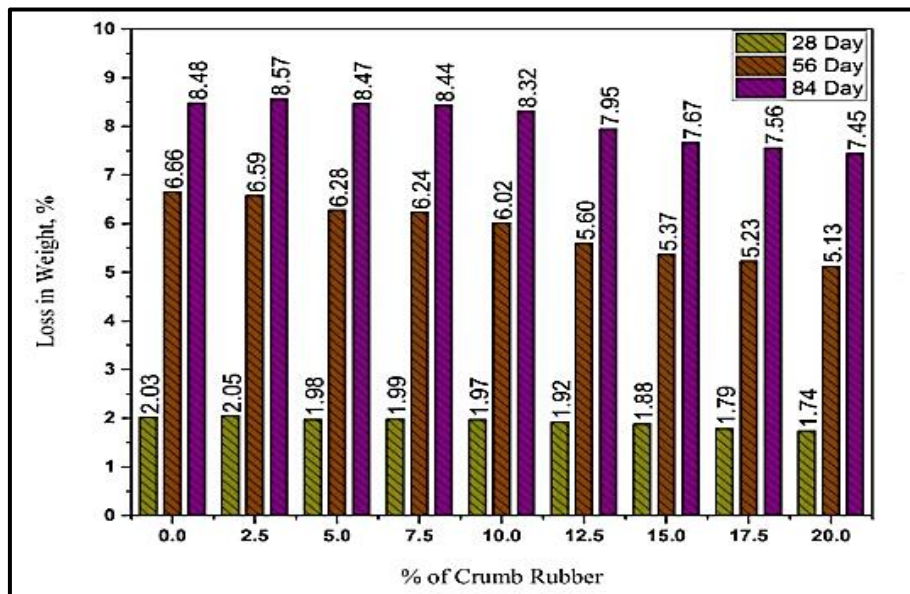


Figure IV.32: Influence du GC sur la perte de poids après attaque d'acide.[115]

k. Résistance à la fracture

Selon certains auteurs, l'intégration de granulats de caoutchouc modifie le mode de rupture des éprouvettes. Elles se distinguent par des déformations bien plus importantes avant la rupture comparativement au béton témoin, conservant ainsi plus longtemps leur intégrité structurelle avant de se désagréger.

L'étude de Khaloo et al. [82], citée par Bencassi [125], a analysé le comportement à la rupture du béton caoutchouté à travers l'observation visuelle et dimensionnelle des éprouvettes. Contrairement au béton ordinaire qui subit une rupture brutale et explosive, le béton caoutchouté montre une détérioration plus lente avec une déformation progressive jusqu'à la rupture. Les granulats de caoutchouc augmentent ainsi la capacité du béton à supporter des charges supplémentaires au-delà de sa charge maximale, ou charge de rupture.



Béton de référence

Béton avec 25% caoutchouc

Figure IV.33: Influence du GC sur le type de rupture. [82,125]



Figure IV.34: Détails d'une section fissurée pour une poutre caoutchoutée. [92]

IV.2.2. La substitution des ciments par les poudres de caoutchouc des pneus usagées

IV.2.2.1. Etat frais

a. L'ouvrabilité

Les travaux de Chylík et al. [117] ont montré que l'ajout de poudre de caoutchouc (PC) dans le béton frais réduit significativement son ouvrabilité (une chute de 64 % par rapport au béton témoin). Cette diminution s'expliquerait par la capacité des particules de caoutchouc à retenir les molécules d'eau, les fines particules capturant plus d'eau et, par conséquent, diminuant l'ouvrabilité [117].

Cependant, des résultats différents ont été obtenus par Moghaddam et al. [109] concernant le béton Autoplaçant (BAP). Leur étude indique que les mélanges de BAP contenant de la PC présentent un diamètre d'étalement plus élevé que le mélange témoin, avec une augmentation de 2,8 %. Selon Moghaddam et al. [109], cette amélioration de l'ouvrabilité est attribuée à la faible absorption d'eau du caoutchouc.

L'affaissement, indicateur de la fluidité et de la consistance d'un matériau, augmente avec la teneur en air. Sans agent entraîneur d'air, l'affaissement de tous les mélanges se situait entre 90 et 100 mm. Cependant, pour les pâtes de ciment contenant 50 % de poudre de caoutchouc (PC) et un agent entraîneur d'air, l'affaissement s'est amélioré, atteignant des valeurs de 100 à 169,5 mm [76] (voir figure IV.34).

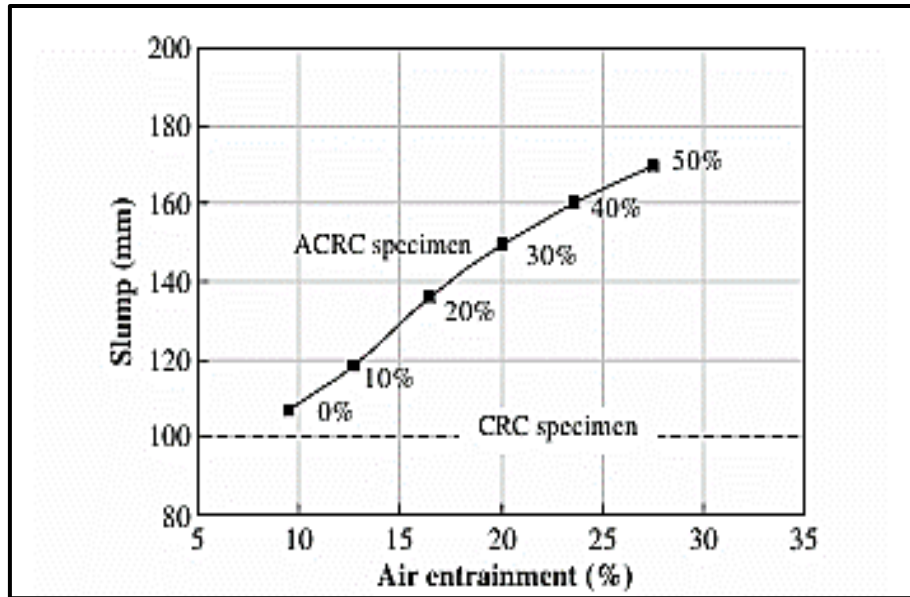


Figure IV.35: Influence de l'entraînement d'air sur l'affaissement du composite contenant des PC.[76]

L'affaissement des composites contenant du caoutchouc augmente avec l'entraînement d'air, ce qui est dû aux microbulles d'air créées dans la matrice.[77]

b. Teneur en air

Chylík et al. [117] ont également démontré que l'incorporation de poudre de caoutchouc dans le mélange de béton entraînait une teneur en air plus élevée dans le béton frais. Cela s'explique par la capacité de la surface des particules de caoutchouc à capter les molécules d'air qui pénètrent dans le béton. Plus le caoutchouc est fin, plus sa surface spécifique est grande, et donc plus il attrape de molécules d'air que le caoutchouc plus grossier. [117]

Benazzouk et al. [79] ont étudié la teneur en air des pâtes de ciment. Ils ont observé une augmentation de la teneur en air, passant de 2 % à 17 %, pour les échantillons contenant de la poudre de caoutchouc variant de 0 % à 50 %. Cette augmentation plus importante de l'entraînement d'air pourrait être attribuée à la capacité des particules de caoutchouc à emprisonner l'air sur leur surface rugueuse, en raison de leur nature apolaire. L'ajout de caoutchouc au mélange peut attirer l'air car il a tendance à repousser l'eau.

c. Poids unitaires

Selon Fedroff et al. [66], en raison de la faible densité du caoutchouc, l'augmentation du pourcentage de caoutchouc entraîne une diminution du poids unitaire du béton. Pour une substitution maximale de 30 % de poudre de caoutchouc (PC), le poids unitaire du béton de caoutchouc diminue de 11 %. De plus, l'accroissement de la teneur en caoutchouc augmente la teneur en air, ce qui à son tour réduit encore le poids unitaire.

IV.2.2.2. Etat durcis

a. Résistance à la compression

Selon les résultats de Moghaddam et al. [109], la résistance à la compression la plus faible à 28 jours (22,3 MPa) a été observée avec le mélange de béton contenant 20 % de poudre de caoutchouc (PC), ce qui représente une diminution de 52,04 % par rapport au mélange témoin (voir figure IV.35). Cette faible résistance est attribuée à une mauvaise adhérence entre le caoutchouc et le ciment [109].

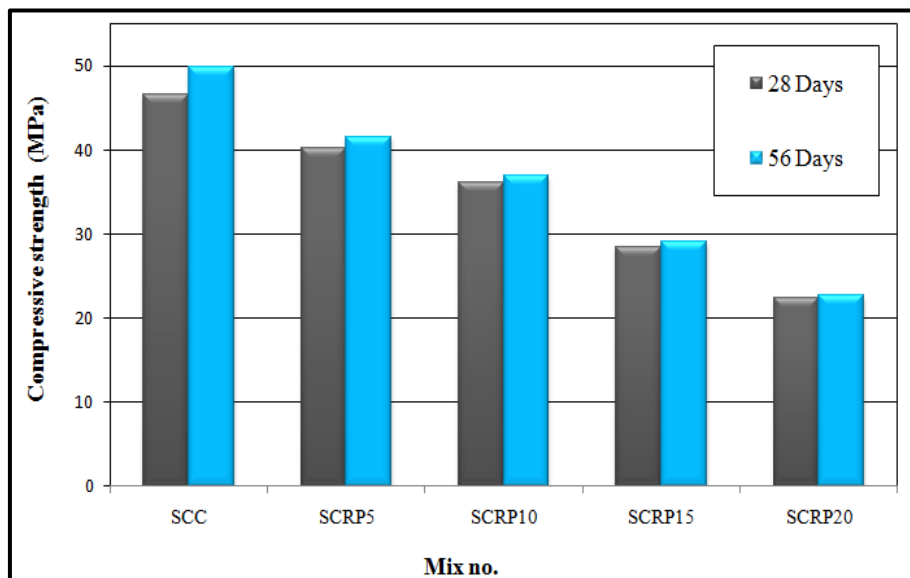


Figure IV.36: Influence du PC sur la résistance à la compression des BAP [109].

Selon Ganjian et al. [88], et comme illustré dans la Figure IV.36, le remplacement du ciment par 5 %, 7,5 %, et 10 % de poudre de caoutchouc a réduit la résistance à la compression d'environ 5 %, 10 %, et 23 % respectivement, par rapport au mélange témoin. Cette faiblesse des mélanges caoutchoutés est attribuée à la diminution de la quantité de ciment, qui agit comme un matériau adhésif (ou de cimentation).

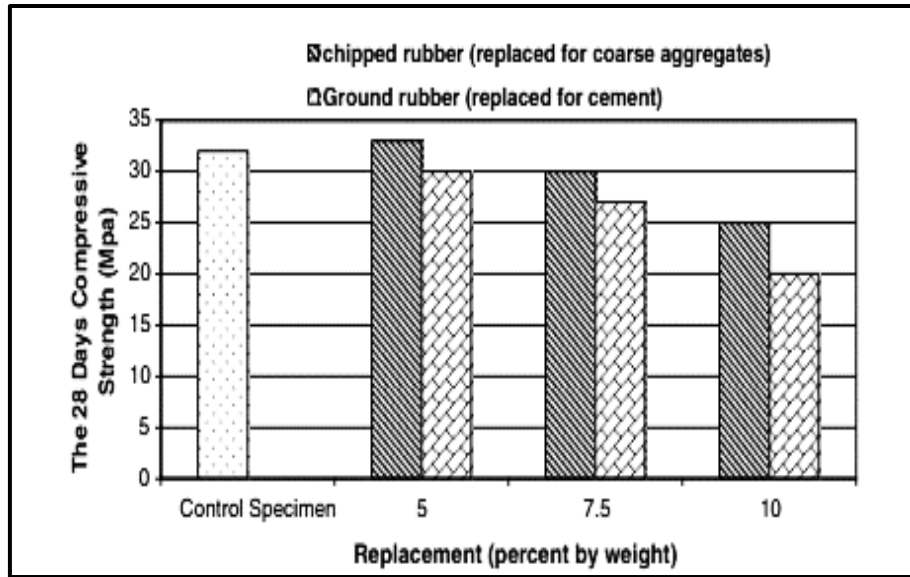


Figure IV.37: Influence du PC sur la résistance à la compression [88]

La figure IV.37 illustre la résistance à la compression en fonction du pourcentage de poudre de caoutchouc (PC) par rapport au poids de ciment. Fedroff et al. [66] ont constaté une perte de résistance à 28 jours d'environ 50 % pour les bétons contenant 10 % de PC, et près de 75 % pour 30 % de PC.

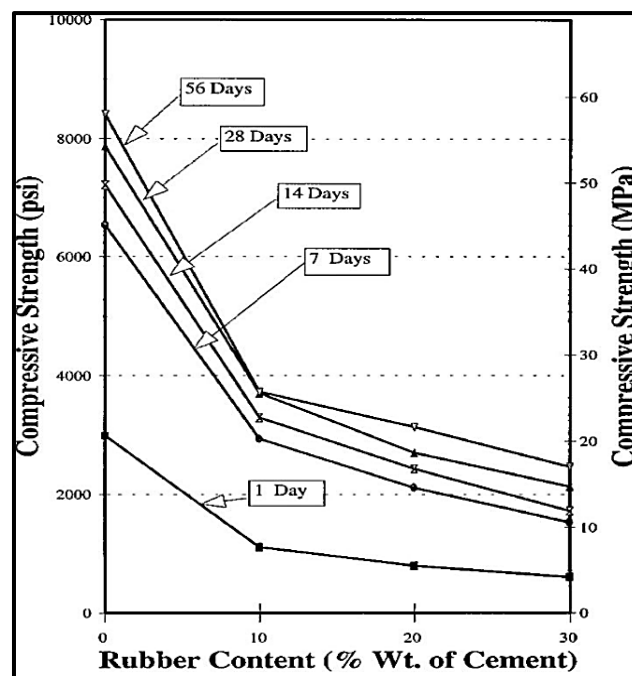


Figure IV.38: Influence du PC sur la résistance à la compression, à chaque âge d'essai. [66]

Il est à noter que l'ampleur de cette perte de résistance diminue avec l'augmentation de la quantité de caoutchouc pour un âge d'essai donné.

Par ailleurs, la réduction de résistance est plus prononcée aux jeunes âges lorsque la teneur en caoutchouc augmente, comparativement aux âges avancés. Ces réductions de résistance incluent l'effet de la quantité supérieure de caoutchouc et de l'augmentation du poids. [66]

Benazzouk et al. [79] ont observé une chute de la résistance à la compression des pâtes de ciment à mesure que la quantité de poudre de caoutchouc (PC) augmente. Cette propriété passe de 82 MPa pour le ciment pur à 10,5 MPa pour un composite contenant 50 % de caoutchouc, soit une réduction d'environ 77 % (voir figure IV.39). Cette diminution est attribuée à la faible rigidité des particules de caoutchouc par rapport à la pâte de ciment, ainsi qu'à l'augmentation de la teneur en air dans le matériau.

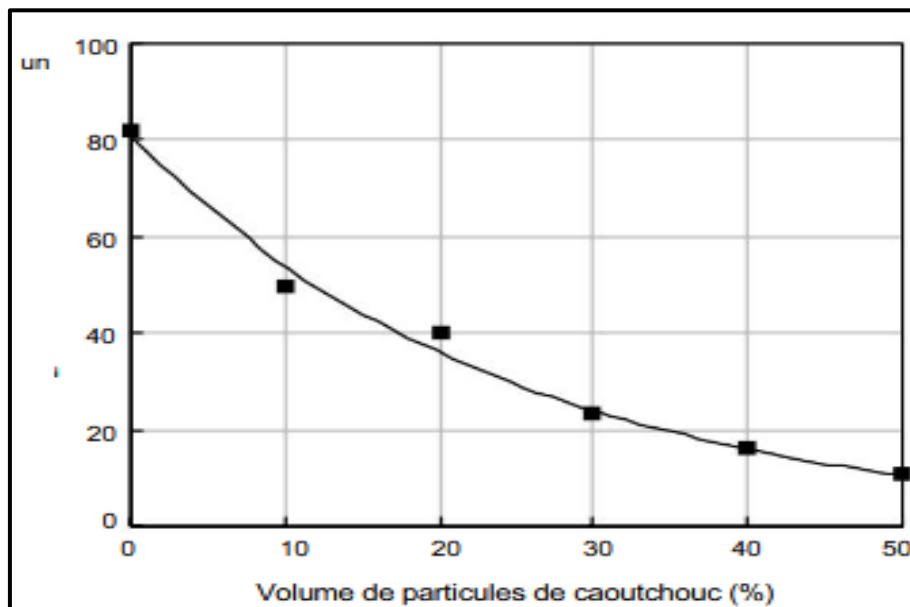


Figure IV.39: Influence du PC sur la résistance à la compression des pâtes de ciment [79]

b. Résistance à la flexion

L'étude de Moghaddam et al. [109] a révélé que l'augmentation de la quantité de poudre de caoutchouc (PC) dans le béton réduit sa résistance à la flexion. Des ajouts de 20 % de PC entraînent une baisse significative de 47,06 % (voir figure IV.40). Cette détérioration est due à la faible adhérence entre la pâte de ciment et la poudre de caoutchouc, une conclusion également formulée par Ganjian et al. [88].

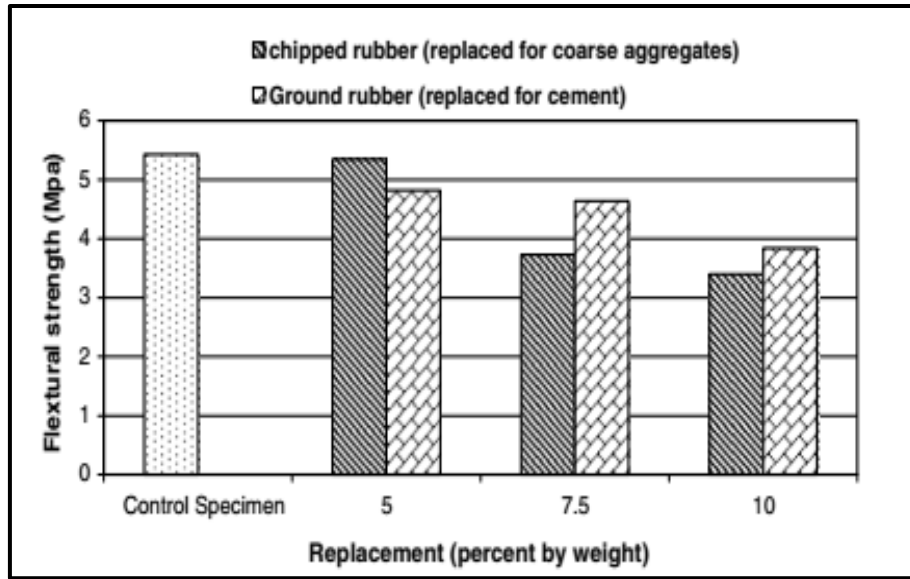


Figure IV.40: Influence du PC sur la résistance à la flexion des pâtes de ciment [88]

Dans leur recherche, Benazzouk et al. [79] ont analysé la résistance à la flexion des composites de ciment. Comme le montre la Figure IV.41, l'incorporation de déchets de poudre de caoutchouc améliore cette résistance, atteignant un pic d'environ 18 % lorsque la teneur en caoutchouc se situe entre 20 % et 30 % en volume. Au-delà de cet optimum, la résistance à la flexion tend à baisser, probablement en raison de la réduction de la quantité de ciment disponible dans le mélange.

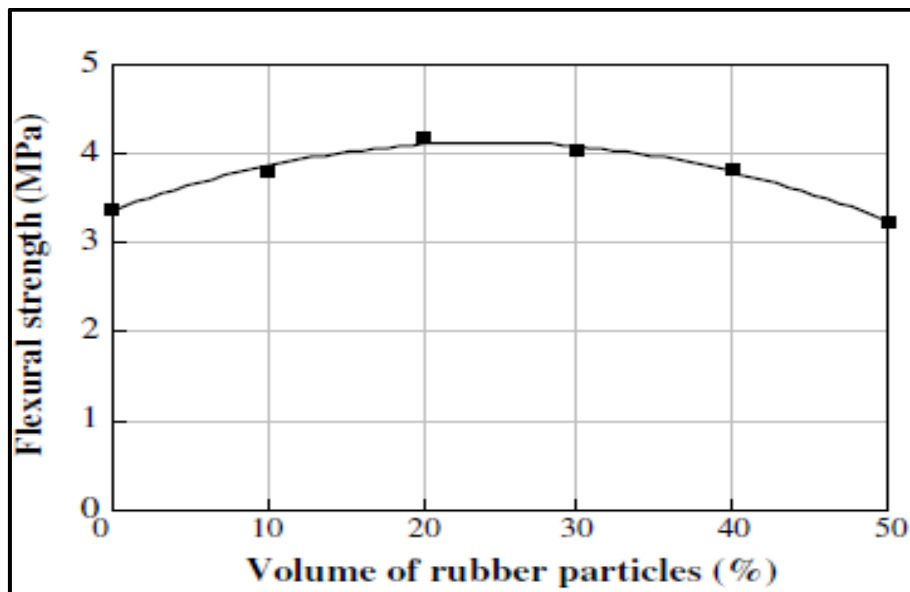


Figure IV.41: Influence du PC sur la résistance à la flexion des pâtes de ciment.[79]

L'augmentation initiale de la résistance est due à l'élasticité et à la non-fragilité des particules de caoutchouc. Celles-ci permettent aux fissures de contourner les particules, retardant ainsi la rupture du matériau. On peut en conclure que l'effet de la structure poreuse (due à l'air entraîné) est plus influent que l'élasticité des particules de caoutchouc. [77]

c. Résistance à la traction

Selon Ganjian et al. [88], la résistance à la traction du béton diminue lorsque le ciment est remplacé par du PC dans le mélange. Une substitution de 7,5% entraîne même une réduction de 24% par rapport au mélange témoin (voir figure IV.42). Ce phénomène s'explique par le fait que, lors de l'expansion d'une fissure, le contact avec les particules de caoutchouc génère une contrainte qui provoque une ségrégation superficielle entre le caoutchouc et la pâte de ciment.

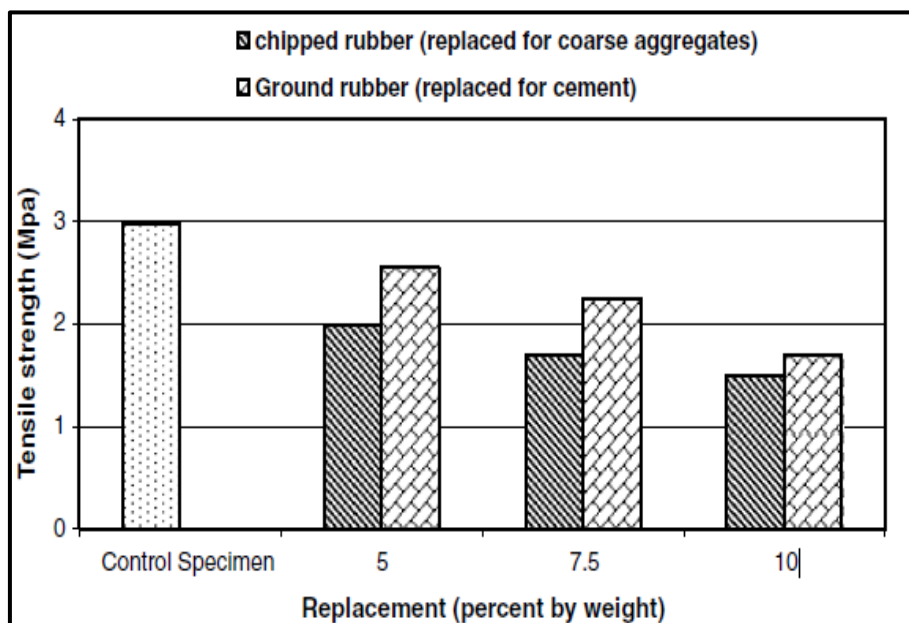


Figure IV.42: Influence du PC sur la résistance à la traction des pâtes de ciment.[88]

d. Vitesse d'impulsion ultrasonore

De manière similaire de la substitution des granulats naturels par des granulats de caoutchouc, l'incorporation de poudre de caoutchouc (PC) dans le béton en lieu et place des ciments tend à diminuer la vitesse des pulsations ultrasoniques (UPV). Moghaddam et al. [109] ont ainsi rapporté une réduction de 15,54 % pour un taux de remplacement de 20 % (voir figure IV.43).

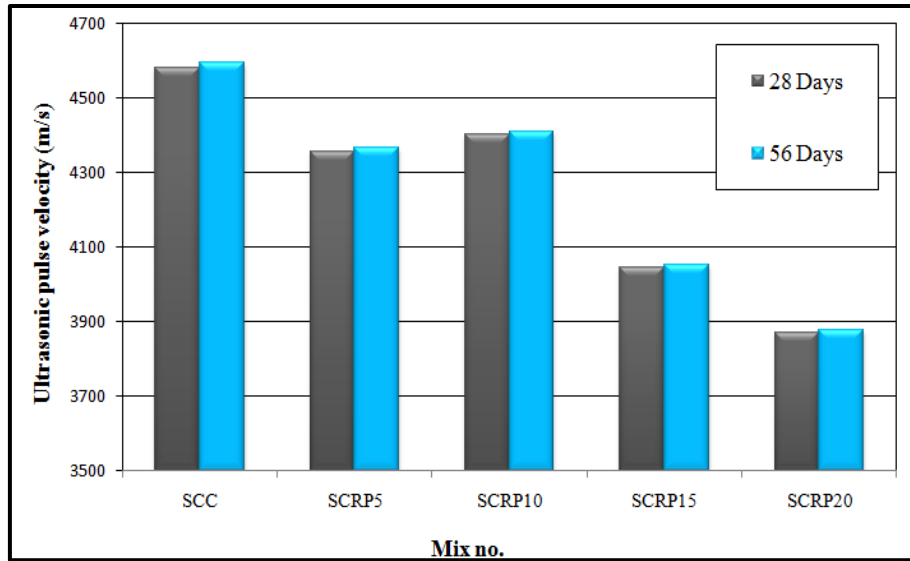


Figure IV.43: Influence du PC sur UPV des BAP.[109]

e. Le module d'élasticité

Le remplacement du ciment par du poudre de caoutchouc réduit le module d'élasticité du béton. Cette réduction est de 36% pour un remplacement de ciment de 10% par la poudre de caoutchouc selon Ganjian et al.[88].

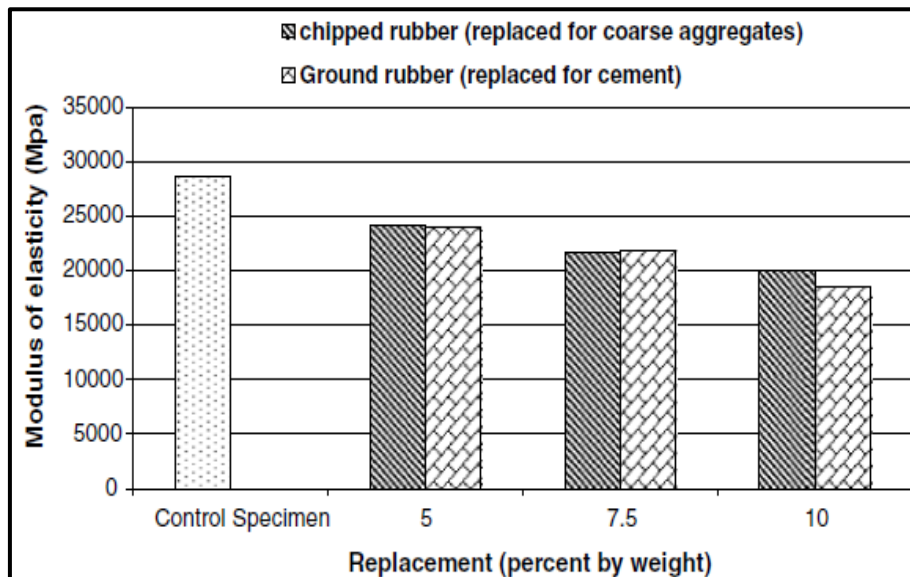


Figure IV.44: Influence du PC sur le module d'élasticité. [88]

Comme l'ont également noté Fedroff et al. [66], il existe une corrélation inverse entre le module d'élasticité du béton et sa teneur en caoutchouc. La Figure IV.45 détaille l'évolution de ce module en fonction de l'âge pour divers pourcentages de caoutchouc.

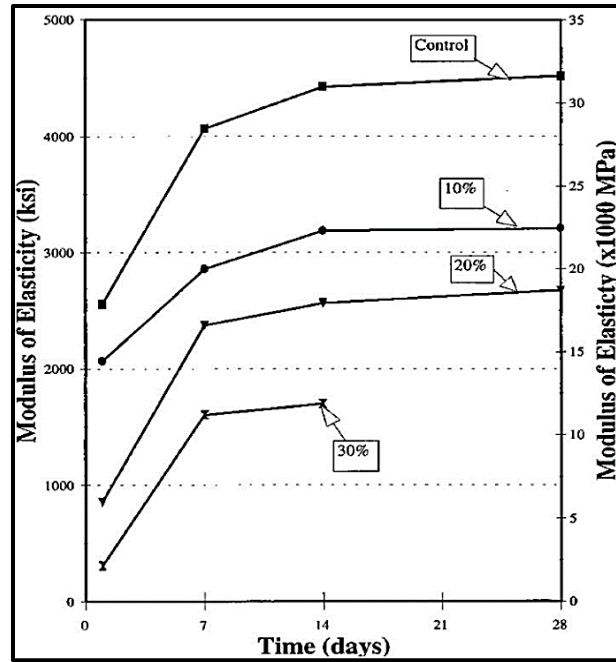


Figure IV.45: Influence du PC sur le module d'élasticité. [66]

La figure IV.46 illustre l'évolution du module d'élasticité dynamique des composites de ciment en fonction de leur teneur en poudre de caoutchouc. Benazzouk et al. [79] ont observé une diminution significative de ce module, passant de 10,5 GPa à 1,9 GPa lorsque la proportion de caoutchouc varie de 0 % à 50 %.

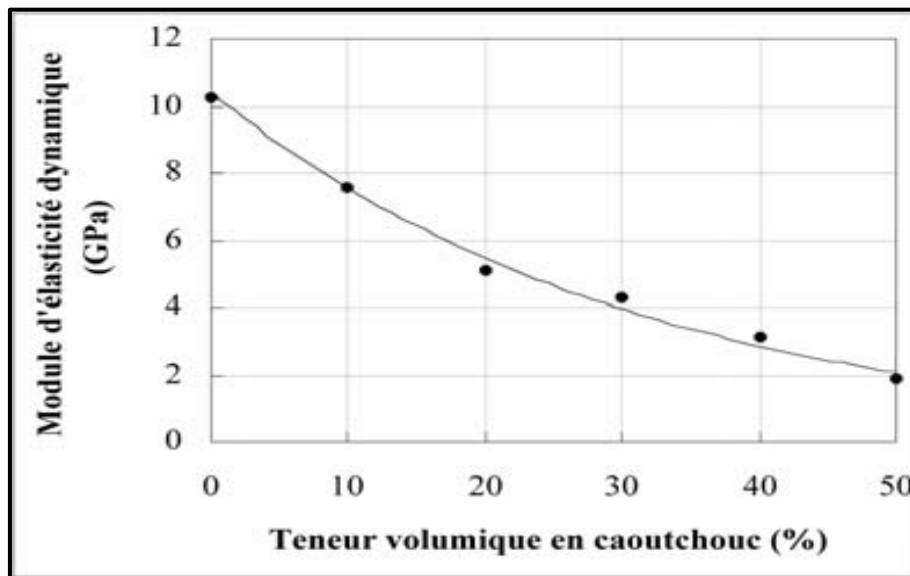


Figure IV.46: Influence du PC sur le module d'élasticité dynamique [79].

L'ajout de particules de caoutchouc à la matrice cimentaire permet aux composites de réduire l'intensité sonore et d'amortir les vibrations, offrant ainsi une isolation acoustique de haut niveau [77].

f. Poids unitaire

La figure IV.47 présente l'évolution du poids unitaire sec des composites de ciment en fonction de leur teneur en PC. Les valeurs diminuent d'environ d'environ 1980 kg/m³ pour la pâte de ciment à 1150 kg/m³ pour l'échantillon contenant 50% de particules de caoutchouc. Cela représente une réduction allant jusqu'à 42 % par rapport au composite témoin. Cette diminution est due à la faible densité spécifique du caoutchouc et à l'augmentation du niveau d'entraînement de l'air avec l'ajout de particules de caoutchouc. Le flux d'air accru s'explique par la capacité des particules de caoutchouc, de par leur nature non polaire et leur surface rugueuse, à piéger l'air. [79]

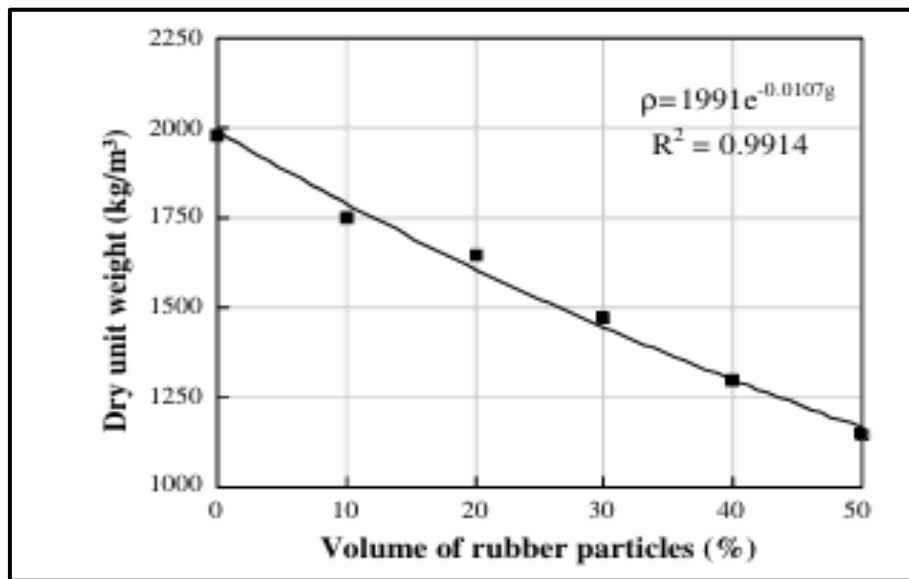


Figure IV.47: Influence du PC sur le poids unitaire des pâtes de ciments. [79]

Lorsque du caoutchouc est ajouté au mélange, il peut attirer l'air car il a tendance à repousser l'eau.

L'ajout de caoutchouc au mélange peut attirer l'air en raison de sa tendance à repousser l'eau. La figure IV.48 illustre des exemples de vides d'air discontinus dans la matrice cimentaire de composites contenant 20 % et 50 % de particules de caoutchouc. L'allègement du composite de ciment est un avantage très intéressant, notamment pour la rénovation de bâtiments et la conception d'éléments structurels légers. [79]

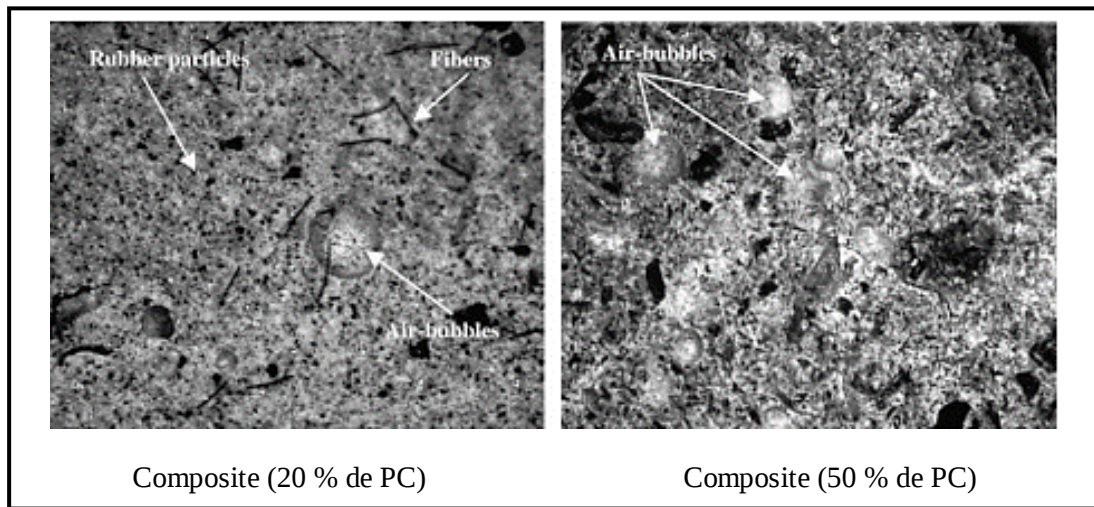


Figure IV.48: Image optique de la distribution discontinue des vides d'air dans les composites. [79]

IV.3. Amélioration des propriétés des matériaux cimentaires à base des granulats de caoutchouc

L'intégration de granulats de caoutchouc des pneus usagés dans les matériaux cimentaires débloquent un potentiel significatif pour les matériaux, leur conférant une masse volumique inférieure, une ductilité accrue, une résistance améliorée aux chocs et à l'abrasion, et des capacités d'isolation thermique et acoustique supérieures.

Cependant, la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire, qui est due à l'hydrophobie du caoutchouc, à leur surface inerte et aux différences de rigidité entre ces deux composants, constitue la difficulté majeure.

Cette incompatibilité peut entraîner une diminution notable des propriétés mécaniques conventionnelles, comme la résistance à la compression, à la flexion et à la traction, ce qui limite le champ d'application des bétons caoutchoutés.

L'objectif est de créer des liaisons plus solides pour maximiser les avantages du caoutchouc tout en minimisant la perte de performance mécanique. Pour ce faire, des méthodes prometteuses sont activement étudiées, notamment le traitement de surface des granulats de caoutchouc, l'ajout d'agents d'adhérence et l'optimisation des formulations.

IV.3.1. Le traitement de surface des granulats de caoutchouc

Ces traitements modifient la composition chimique de la surface du caoutchouc pour la rendre plus réactive, plus polaire ou moins hydrophobe, favorisant ainsi des liaisons chimiques ou physiques plus fortes avec la matrice cimentaire.

Selon Bouchlaghem [62], un traitement des granulats de caoutchouc avec une solution alcaline (préparée en dissolvant 10 g de pastilles d'hydroxyde de sodium (NaOH) dans 90 cm³ d'eau distillée) a un impact significatif sur les propriétés du mortier.

Ce traitement entraîne une légère diminution de l'ouvrabilité (inférieure à 3 %) et une légère augmentation de la teneur en air (inférieure à 7 %). Plus important encore, l'étude a révélé que la réduction de la résistance à la compression est moins prononcée lorsque les granulats de caoutchouc ont été traités avec la solution de NaOH.

L'amélioration des performances du mortier caoutchouté grâce à ce traitement est due à une meilleure adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice de ciment [45, 62].

Cette observation est en accord avec les conclusions de Segre et Joeke [68]. Eux aussi ont utilisé une solution de NaOH pour traiter des poudres de caoutchouc issues de pneus usagés. Leurs recherches ont montré que ce traitement de surface à la soude augmentait la force de liaison interfaciale entre la pâte de caoutchouc et la pâte de ciment, ce qui a conduit à une amélioration de la résistance et de la ténacité du mortier caoutchouté.

Li et al. [69] ont montré que la grande surface des poudres de caoutchouc permet un contact accru et des réactions chimiques plus nombreuses à la surface de ces particules. Cela se traduit par une amélioration des propriétés mécaniques du mortier modifié.

En revanche, bien que le traitement de surface au NaOH soit efficace pour les poudres de pneus usagés de petite taille, il s'avère inefficace pour les copeaux de pneus usagés de plus grande taille [69].

L'étude de Balaha et al. [81] a exploré l'utilisation de trois matériaux – l'acétate de polyvinyle (PVA), la fumée de silice (SF) et l'hydroxyde de sodium (NaOH) – pour traiter le caoutchouc issu de pneus usagés. L'objectif principal était d'améliorer la friction entre les particules de caoutchouc et la matrice de ciment.

Concernant la consistance, le PVA et la SF ont montré les améliorations les plus significatives, tandis que le NaOH a eu le plus faible impact sur l'ouvrabilité. Ce phénomène

est probablement dû à la capacité du NaOH à créer des vides à la surface des particules de caoutchouc, rendant ainsi la surface plus rugueuse.

En ce qui concerne la résistance à la compression, le traitement du caoutchouc avec le PVA, la SF et le NaOH a entraîné des réductions respectives de 14 %, 15 % et 17 % par rapport au béton normal. En comparaison, l'utilisation de caoutchouc non traité (caoutchouc normal) a conduit à une réduction bien plus importante, de 27 %, pour un même pourcentage d'incorporation de caoutchouc (20 %).

Le comportement observé peut s'expliquer par les mécanismes suivants : Le PVA (acétate de polyvinyle) enrobe les particules de caoutchouc, créant ainsi une meilleure adhérence entre leur surface et la pâte de ciment. La fumée de silice, grâce à sa granulométrie très fine, agit de manière similaire : elle assure une excellente adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment tout en augmentant la densité de cette dernière. Ces deux effets combinés améliorent considérablement la résistance à la compression du béton de caoutchouc. Une tendance similaire a été notée concernant la résistance à la traction [81].

D'après Boukour [44] il y'a d'autre solution utiliser pour le traitement de la surface des granulat de caoutchouc comme l'acide sulfurique H_2SO_4 , l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$, l'acide acétique CH_3COOH , différents solvants de l'éthanol, méthanol et de l'acétone...etc.

IV.3.2. Utilisation d'additifs dans la pâte de ciment

En plus de modifier la surface des granulats de caoutchouc, une autre approche clé pour améliorer les performances du béton de caoutchouc consiste à enrichir directement la pâte de ciment avec des additifs. Cette stratégie vise à rendre la matrice cimentaire plus dense, plus résistante et surtout, plus compatible et à même d'interagir efficacement avec les granulats de caoutchouc.

Gneyisi et al. [70] soulignent que la réduction de résistance souvent observée dans le béton de caoutchouc, attribuée à un manque d'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment, pourrait être atténuée par un traitement de surface préalable du caoutchouc.

Par ailleurs, l'ajout d'adjuvants minéraux ultrafins, comme la fumée de silice, à la pâte de ciment est une autre stratégie efficace. Ces adjuvants améliorent l'homogénéité de la pâte et réduisent la proportion de grands pores, ce qui contribue à la production d'un matériau plus résistant.

L'étude menée par Gneyisi et al. [70] a examiné l'impact de l'ajout de fumée de silice à des dosages de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % du poids du ciment. Les résultats ont montré une amélioration significative des caractéristiques mécaniques des bétons, qu'ils soient standards ou enrichis en caoutchouc. L'incorporation de fumée de silice a également permis de réduire la vitesse de perte de résistance généralement observée avec l'ajout de caoutchouc.

Cet effet bénéfique de la fumée de silice était particulièrement notable pour les résistances à la compression et à la rupture, entraînant une augmentation allant jusqu'à 27 %. Parallèlement, les modules d'élasticité des bétons caoutchoutés ont connu une légère augmentation, jusqu'à 15 %, grâce à l'utilisation de la fumée de silice [70].

Guneyisi et Gesoglu [80] ont également étudié l'impact de l'ajout de fumée de silice sur les propriétés du béton de caoutchouc, en utilisant un dosage de 10 % par rapport au poids du ciment.

Les résultats de leurs essais ont clairement démontré que la fumée de silice est très efficace pour augmenter la résistance à la compression et la vitesse des impulsions ultrasoniques dans le béton de caoutchouc. Cette amélioration s'explique par la capacité de la fumée de silice, grâce à sa finesse, à favoriser une excellente adhérence entre le caoutchouc et la matrice de ciment.

L'incorporation de fumée de silice améliore la résistance du béton à la pénétration du chlorure, et ce, quelle que soit la quantité de caoutchouc utilisée. Les profondeurs de pénétration du chlorure ont montré une diminution notable avec l'ajout de fumée de silice.

Ce phénomène s'explique par l'effet de remplissage de la fumée de silice. Ses particules ultrafines (0,1-0,2 μm) comblent les vides à la fois au sein de la pâte de ciment et entre la pâte et les granulats, créant ainsi une microstructure plus dense [80].

Onuaguluchi et Panesar [110] ont étudié l'effet bénéfique de la fumée de silice sur les propriétés du béton de caoutchouc. Leurs recherches ont montré une amélioration significative des résistances à la compression et à la traction dans les mélanges qui contenaient à la fois du caoutchouc granulé enrobé et de la fumée de silice. Les mesures de résistivité de surface ont révélé que le caoutchouc granulé agissait comme un isolant électrique, augmentant ainsi la résistivité du béton. Cette hausse était encore plus prononcée

lorsque de la fumée de silice était ajoutée aux mélanges. De plus, à l'instar des résultats de résistivité, l'incorporation de fumée de silice a significativement amélioré la résistance à la perméabilité aux chlorures du béton [110].

Une étude menée par Gesoglu et Guneyisi [95] a examiné l'impact de l'ajout de cendres volantes en substitution partielle du ciment Portland, à des taux de 20 %, 40 % et 60 % en poids.

Leurs résultats ont montré qu'à 28 jours, l'incorporation de cendres volantes n'affectait pas de manière significative la perméabilité aux ions chlorure des bétons de caoutchouc autocompactants. Cependant, lorsque la période de durcissement était prolongée à 90 jours, les cendres volantes affinaient la structure des pores du béton grâce à une réaction à long terme, ce qui entraînait une réduction drastique de la pénétration des ions chlorure.

L'étude a également révélé que l'augmentation de la proportion de caoutchouc granulaire (de miettes) dans le béton entraînait une hausse de l'absorption d'eau. Cependant, l'incorporation de cendres volantes a permis de contrecarrer cet effet négatif du caoutchouc. Plus le taux de substitution par les cendres volantes était élevé, plus la réduction de l'absorption d'eau était prononcée.

Ce bénéfice des cendres volantes s'explique par deux mécanismes : un effet de remplissage à un âge précoce du béton, où les fines particules de cendres volantes comblent les vides, et une réaction pouzzolanique à des âges plus avancés, qui contribue à densifier la microstructure du béton [95].

Les recherches de Ramdani [61] ont montré que l'intégration de poudre de verre aux granulats de caoutchouc améliore la maniabilité du béton. Cette amélioration est attribuée à la faible capacité d'absorption d'eau de ces deux matériaux. De plus, le béton de caoutchouc modifié avec de la poudre de verre a atteint sa résistance à la compression maximale à 28 jours.

Ces résultats suggèrent que la poudre de verre finement broyée peut être considérée comme une bonne pouzzolane dans les matériaux cimentaires. Ramdani [61] confirme également que l'efficacité de la poudre de verre est d'autant plus marquée à un âge plus avancé du béton.

L'incorporation simultanée de déchets de caoutchouc et de poudre de verre augmente la ductilité du béton en ralentissant les déformations élastiques et plastiques et en améliorant l'énergie de déformation de l'échantillon avant la rupture, et diminue la perméabilité à l'eau et augmente la résistance à l'acide sulfurique par rapport au béton de référence.[61]

Les recherches de Hamlaoui [126] confirment également l'intérêt d'intégrer des déchets de verre dans les bétons. Elle a conclu que l'ajout de ces déchets permet de compenser les dégradations des propriétés causées par l'incorporation de granulats de caoutchouc dans le béton de sable.

Plus précisément, l'ajout de déchets de verre réduit la porosité du béton de sable, ce qui a pour effet d'améliorer l'adhérence entre ses différents constituants [126].

Une autre approche pour améliorer les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des composites a impliqué l'introduction de fillers de déchets de brique (DB) dans les mortiers de caoutchouc. Cette investigation a effectivement montré que les DB permettaient de minimiser les effets négatifs des granulats de caoutchouc (GC) et de renforcer les propriétés de durabilité, déjà améliorées par les GC [44].

IV.3.3. Méthode combinée

En combinant le traitement de surface du caoutchouc et la modification de la pâte de ciment, les chercheurs visent à optimiser les propriétés du béton et du mortier intégrant des granulats de caoutchouc. Cette approche cherche à développer des matériaux de construction plus performants, ce qui ouvrirait la voie à une utilisation plus étendue de ce matériau recyclé dans le secteur de la construction.

Pelisser et al. [94] ont démontré une synergie remarquable en combinant deux méthodes pour améliorer les performances du béton de caoutchouc : le traitement chimique des granulats de caoutchouc avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'ajout de 15 % de fumée de silice.

Cette approche conjointe a permis de récupérer la résistance du béton de manière significative, atteignant une résistance à la compression de 50 MPa, soit l'équivalent de celle d'un béton de référence.

Ces bétons aux propriétés améliorées ouvrent de nouvelles perspectives pour la conception de structures légères qui offrent une résistance satisfaisante tout en nécessitant une faible consommation de ciment. Cela les rend particulièrement adaptés à la fabrication de panneaux de construction.

➤ **Exemple d'une analyse Microstructurale du Béton de Caoutchouc**

D'après Pelisser et al. [94], les études de microstructure menées par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) ont permis de mieux comprendre les défis liés à l'incorporation du caoutchouc dans le béton, ainsi que les solutions potentielles.

Initialement, le béton contenant des granulats de caoutchouc révèle de grands vides à l'interface caoutchouc/ciment (voir figure VI.49). Les micrographies mettent en évidence des particules de caoutchouc de forme irrégulière et d'une teinte plus foncée.

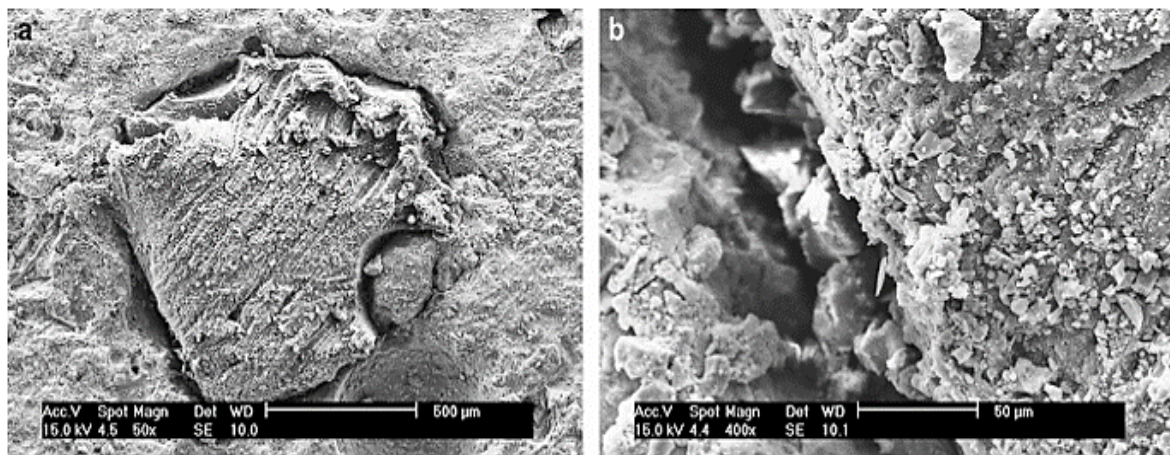


Figure IV.49: Microstructure du béton avec caoutchouc

(a) Matrice de ciment avec particule de caoutchouc ; (b) interface caoutchouc/béton. [94]

Des améliorations significatives sont observées dans le béton de caoutchouc modifié. Une réduction notable de la porosité est visible dans la zone de transition. Cette amélioration est attribuée à une forte concentration d'hydroxyde de sodium (Figures IV.50 a et b), suggérant un effet hydrophile dû au traitement.

De plus, la présence de fumée de silice à l'interface caoutchouc/ciment (Figure IV.50 c) joue un rôle crucial en contribuant à une meilleure adhérence et à une diminution des points faibles dans le matériau.

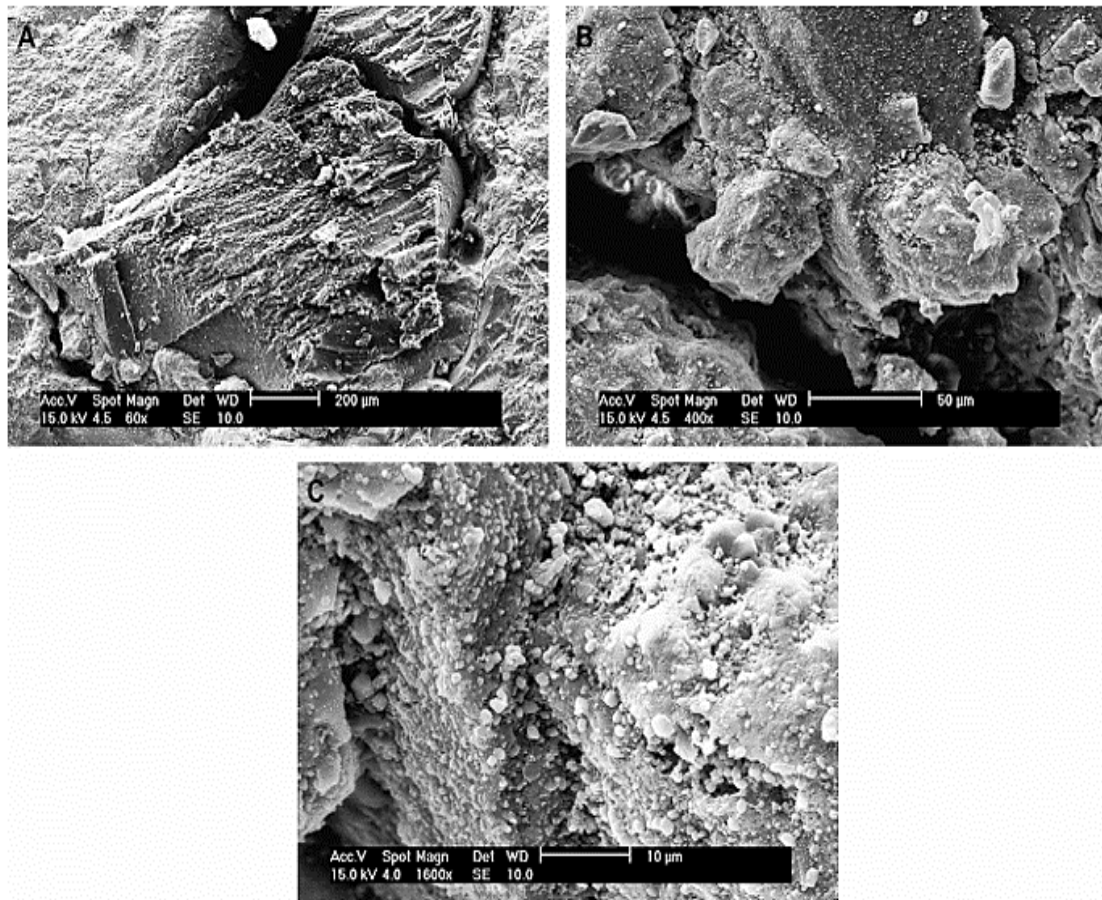


Figure IV.50: Microstructure du béton avec caoutchouc modifié

(a) matrice de ciment avec particule de caoutchouc modifié ;

(b) interface caoutchouc modifié/béton (MEB) ;

(c) détails montrant la fumée de silice sur la particule de caoutchouc. [94]

Selon Pelisser et al. [94], la combinaison d'un traitement du caoutchouc à l'hydroxyde de sodium (NaOH) et de l'ajout de fumée de silice est une approche très efficace. Cette association favorise une réduction significative de la porosité à l'interface entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire. En conséquence, le béton retrouve une meilleure résistance et présente une perméabilité réduite.

IV.4. Conclusion

L'incorporation de caoutchouc, quelle que soit sa forme, sa taille ou sa quantité, impacte diverses propriétés du béton à l'état frais et durci. Elle mène notamment à l'amélioration de certaines caractéristiques comme la réduction de la masse volumique, l'augmentation de la ductilité et de la résistance aux chocs, ainsi qu'une meilleure isolation thermique et acoustique.

Cette amélioration s'avère avantageuse pour la rénovation de bâtiments, la conception d'éléments structurels légers, les infrastructures soumises à des contraintes dynamiques ou sismiques, ainsi que pour les structures nécessitant une atténuation sonore ou une isolation thermique (en période de chaleur notamment) ...etc.

L'incorporation de particules de caoutchouc tend également à réduire certaines propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, telles que la résistance à la compression, à la flexion et à la traction...etc. Cette perte de performance est principalement due à la faible adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire, ainsi qu'à la différence de rigidité entre les deux matériaux.

Les recherches sur les matériaux cimentaires intégrant des granulats de caoutchouc révèlent des effets variés, voire contradictoires, ce qui souligne la complexité inhérente à ce matériau composite.

Afin de mieux comprendre les matériaux cimentaires à base de caoutchouc et d'optimiser leurs performances, les recherches actuelles se concentrent sur la compréhension des interactions entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire, et le développement de stratégies efficaces, telles que le traitement de surface des granulats de caoutchouc, l'incorporation d'agents d'adhérence ou l'optimisation des formulations, dont l'objectif est de créer une interface plus robuste et compatible avec le ciment.

C'est un domaine de recherche très actif et prometteur pour l'intégration réussie des granulats de caoutchouc dans les bétons et mortiers écologiques.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Cette étude s'appuie sur une revue de la littérature afin d'examiner l'impact des granulats de caoutchouc recyclés (issus de pneus usagés) sur les matériaux cimentaires. Dans un contexte mondial fortement orienté vers la durabilité environnementale, cette étude explore principalement les propriétés des matériaux cimentaires ainsi modifiés. Elle met en lumière les opportunités et les limites inhérentes à cette approche innovante.

Sur la base des résultats de plusieurs travaux de recherche, voici les conclusions formulées :

L'incorporation de caoutchouc dans les matériaux cimentaires - quelle que soit sa forme, sa taille, sa quantité ou le type de matériau naturel qu'il substitue - impacte la plupart de leurs propriétés.

Toutes les études s'accordent à dire que l'ajout de particules de caoutchouc aux matériaux cimentaires diminue leur masse volumique, ce qui est dû à la faible densité du caoutchouc.

En revanche, les recherches révèlent des effets variés, voire contradictoires, concernant l'ouvrabilité et la teneur en air.

Certaines études montrent que l'intégration de caoutchouc augmente l'ouvrabilité, s'expliquant par le fait que les granulats de caoutchouc n'absorbent pas l'eau, contrairement aux granulats naturels. D'autres recherches observent une réduction de cette propriété, attribuable, selon ces chercheurs, au frottement accru entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment.

Pour la teneur en air, Quelques études ont noté une augmentation de cette propriété dans le mélange, souvent attribuée à la nature non polaire des particules de caoutchouc. Celles-ci ont tendance à repousser l'eau, ce qui piège de l'air au sein du béton. Cependant, d'autres études rapportent une tendance inverse : une diminution de la teneur en air. Ce phénomène s'expliquerait par le fait que les granulats de caoutchouc occupent une partie des vides d'air qui seraient normalement présents dans le mélange cimentaire.

À l'état durci toutes les recherches indiquent que l'intégration de particules de caoutchouc a tendance à réduire certaines propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, notamment la résistance à la compression, à la flexion, à la traction, etc.

Cette diminution de performance est principalement attribuée à deux facteurs, une faible adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire et la différence de rigidité entre les deux matériaux. Ces disparités favorisent une propagation aisée des fissures à partir de la zone de contact entre le caoutchouc et le ciment, menant progressivement à la rupture du béton sous contrainte.

Cependant, ces diminutions des performances mécaniques sont partiellement compensées par l'amélioration d'autres propriétés. On observe notamment une réduction de la masse volumique, une augmentation de la ductilité et de la résistance aux chocs, ainsi qu'une meilleure isolation thermique et acoustique.

Ces avantages sont particulièrement intéressants pour divers domaines d'application, tels que la conception d'éléments structurels légers, les infrastructures soumises à des contraintes dynamiques ou sismiques, les structures nécessitant une atténuation sonore ou une isolation thermique, notamment durant les périodes de forte chaleur.

Pour maximiser les bénéfices du caoutchouc dans les matériaux cimentaires tout en minimisant la perte de performance mécanique due à la faible adhérence, plusieurs stratégies prometteuses sont activement étudiées. Le traitement de surface des granulats de caoutchouc : avec des solutions chimiques telles que l'hydroxyde de sodium (NaOH), l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$), l'acide acétique (CH_3COOH), et divers solvants (éthanol, méthanol, acétone) qui sont employées pour renforcer l'adhérence entre le caoutchouc et la matrice de ciment. La méthode d'ajout d'additifs à la pâte de ciment avec l'incorporation d'additifs vise à densifier et à renforcer la matrice cimentaire, la rendant plus compatible et interactive avec les granulats de caoutchouc. Parmi ces additifs, on utilise notamment la fumée de silice, les cendres volantes, la poudre de verre finement broyée et les fillers de déchets de brique...etc

Pour optimiser les propriétés du béton et du mortier intégrant des granulats de caoutchouc, la combinaison du traitement de surface du caoutchouc avec la modification de la pâte de ciment est une approche très efficace. Cette synergie permet de développer des matériaux de construction plus performants, ouvrant ainsi la voie à une utilisation plus étendue du caoutchouc recyclé dans le secteur de la construction et aidant à surmonter les défis actuels liés à son intégration.

En conclusion, les matériaux cimentaires caoutchoutés représentent une solution écologique innovante. Ils contribuent à la valorisation des déchets et à la promotion de l'économie circulaire, tout en offrant des performances spécifiques intéressantes. La poursuite des recherches expérimentales est cruciale pour affiner les formulations et étendre leur champ d'application, consolidant ainsi leur rôle dans la construction durable de demain.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Sayad, Y. « comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de biskra) », Thèse de doctorat, Université de biskra, (2021).
- [2] https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs8.html
- [3] Boubekeur, T., « polycopié de : Matériaux De Construction 01 », Centre Universitaire De Tissemsilt, institut des sciences et technologies, Algérie (2017).
- [4] Cimbéton. Fiches Techniques, Tome 2, « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre », Paris. (2006).
- [5] Dreux, G., Festa, J. « nouveau guide du béton et ses constituants ». Edition Eyrolles, huitième édition, Paris (1998).
- [6] <https://maconnerie.bilp.fr/guide-general/part-1-generalites/materiel-materiaux / beton / standard>
- [7] Dupain, R., Lanchon, R., Saint Arroman, J.C. « Granulats, sols, ciments et bétons caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Collection CAPLIEZ, édition CASTEILLA, V235. Paris (2000).
- [8] Ayache, B., Rahal, I., Benmansour, W. « différents types de béton à base de copeaux de bois (béton ordinaire – béton autoplaçant – béton à haute performance) », Mémoire de Master, Université de Annaba, (2019).
- [9] Bendrif, A., Elmajdoubi, H. « La formulation du béton prêt à l'emploi et procédés de ses différents types de contrôle de qualité », Mémoire de Master, Université de Maroc, (2021).
- [10] Meftah, H., Arabi, N. « Les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis », Mémoire de Master. Université de Tlemcen. (2011).
- [11] Blessen, S.T. « Strength and durability of concrete containing discarded crumb rubber tire », Thèse de doctorat, Malaviya national institute of technology, Jaipur, India, (2016).

- [12] Ghriga, GH., Oulad Said, N. « étude physico-mécanique d'un mortier à base de sable de carrière et déchets industriels (déchets de brique et déchets de plastique pet) », Mémoire de Master, Université Ghardaïa. (2022).
- [13] Jean, F., Georges, D. « Nouveau guide du béton et ses constituants », 8^{ème} édition, Eyrolles, (2007).
- [14] <https://www.distriartisan.fr/blog/tout-savoir-sur-le-mortier/>
- [15] Djebbari, O. « Influence des éléments mineurs et majeurs sur la réactivité du clinker », Mémoire de master, Université de Biskra, (2020).
- [16] Fiches techniques tome 1, « les constituants des bétons et des mortiers » Paris. (2005).
- [17] Guide de formulation, de mise en œuvre et de contrôle des bétons, centre national d'étude et de recherches intégrées du bâtiment, (2007).
- [18] Guide pratique du béton, « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables », Holcim (Suisse) SA, 5^{ème} édition, (2009).
- [19] Belhout, R., Meguenni, M. « Comparaison entre béton ordinaire et béton à haute performance : étude d'une structure (R+6) en béton armé contreventé par des voiles », Mémoire de master, Université de Blida, (2021).
- [20] Guide pratique du béton « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables ». Editeur : Holcim (Suisse) SA 6^{ème} édition (2015).
- [21] Baron, J., Ollivier, J.P. « les bétons : bases et données pour leur formulation », tome 2, édition Eyrolles, Paris, (1997).
- [22] Daoudi, D., Fatmi, B. « Caractérisation des granulats pour la formulation d'un béton », Mémoire de master, Université de Tiaret, (2021).
- [23] <http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11657/1/chapitre%201.pdf>.
- [24] Kortey, A. « Travaux Pratiques Matériaux De Construction », Université de Médéa, (2016).

- [25] Fnine, A. « Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence », Thèse de doctorat, Université Lille de France, (2006).
- [26] Righi, L., Leziar, Kh. « Contribution à l'étude des bétons à base des sables des carrières de la région de Bordj Bou Arreridj », Mémoire de master, Université de Bordj Bou Arreridj, (2018).
- [27] Achour, R. « Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage », Thèse de doctorat, mines douai, l'université Lille 1 et l'université de Sherbrooke, (2013).
- [28] Haddadi, B. Saidi, M., « Influence du rapport g/s et le diamètre maximal des granulats Dmax sur la qualité de béton ordinaire », Mémoire de Master, Université de Boumerdes, (2018).
- [29] Boyd, A. J., Birgisson, B., Ferraro, C., Cumming, S. (2005). «Nondestructive Testing for Advanced Monitoring and Evaluation of Damage in Concrete Materials», Final Report, University of Florida, (2005).
- [30] Fali, I. « Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc », mémoire de fin d'étude, Université de Tizi Ouzou, (2016).
- [31] Kehila, Y. « Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie », (2014).
- [32] <https://www.entreprisesnettoyage.pro/gestion-des-dechets-de-construction/>
- [33] <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales /déchets/>
- [34] Guide du traitement des déchets réglementation et choix des procédés (Alain Damien).
- [35] <https://nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/infographics/waste/index.cfm#:~:text=u%20d%20radioactif%20est%20toute,n'a%20aucune%20utilisation%20pr%20visible>
- [36] <https://www.envirourgence.com/fr/blogue/gestion-dechets-industriels/>
- [37] Léon, C. « Vers une meilleure gestion des déchets industriels commission de développement durable », (2012).

- [38] https://fr.wikipedia.org/wiki/gestion_des_d%C3%A9chets
- [39] Brik, L., Guerriche, A. « La valorisation des déchets », Mémoire de Master, Université de Constantine, (2021).
- [40] Laribi, I., Bourahdoun, N. « Valorisation des déchets dans le béton-auto-plaçant », Mémoire de Master, Université de Guelma, (2020).
- [41] Layada, S., khelaifia, KH. « Etude et caractérisation d'un béton à base de recyclâtes », Mémoire de Master, Université de Guelma, (2020).
- [42] Kouarta, H., Salah, Y. « Etude bibliographique de la durabilité des bétons à base de déchets de marbres », Mémoire de Master, Université de Guelma, (2020).
- [43] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/7639/boue-rouge>
- [44] Boukour, S. « Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éocomposites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés », Thèse de doctorat, Université de Guelma, (2017).
- [45] <https://www.ctpl.info/les-laitiers-siderurgiques/>
- [46] <https://brrc.be/fr/innovation/apercu-innovation/utilisation-granulats-caoutchouc-recycles-beton-premiers-resultats>
- [47] Talbi, A. « Effet des conditions climatiques sur le comportement des mortiers géopolymères à base de matériaux locaux », Mémoire de Master, Université de Bordj Bou Arreridj, (2022).
- [48] <https://fr.scribd.com/document/517520899/les-caoutchoucs>
- [49] <https://www.france-industrie.pro/industrie-plastique/les-types-de-plastique/le-caoutchouc/>
- [50] Tahar, L., Zeggaoui, B. « Formulation d'un béton ordinaire à base des granulats de caoutchouc », Mémoire de Master, Université de Tiaret, (2023).
- [51] <https://www.siligom.fr/tout-savoir-sur-le-pneu/structure-d-un-pneu#:~:text=la % 20 carcasse %20du%20pneu%20est,la%20structure%20et%20des%20tringles>

- [52] <https://www.continental-tires.com/fr/fr/tire-knowledge/tire-mixture/>
- [53] Bechir, O. « Etude de la durabilité d'un béton a base du granulat recycle », Mémoire de Master, Université de Guelma, (2019).
- [54] https://www.guadeloupe.developpement-durable.gouv.fr/img/pdf/teaser_2_recycler_les_pneus.pdf
- [55] <https://www.tires-recycling.eu/fr/2024/09/08/guide-complet-technologie-de-recyclage-des-pneus/>
- [56] <https://l450v.alamy.com/450vfr/2df8pre/corbeille-de-trashcan-avec-roue-de-voiture-rendu-3d-isole-sur-fond-blanc-2df8pre.jpg>
- [57] <https://image.made-in-china.com/2f0j00btfofrotqyrl/eco-green-tire-shredder-shredding-and-recycling-rubber-machine-tire-shredders.webp>
- [58] Benzoura, I., Boudieb, F. « L'utilisation de la technique pneu sol », Mémoire de Master, Université de Ain Témouchent, (2020).
- [59] Gasmi, S., Drouai, B. « Influence de déchets de pneus fins sur le compactage d'un sol », Mémoire de Master, Université de Annaba, (2020).
- [60] https://asset.hankooktire.com/content/dam/hankooktire/local/img/help-support/tire-guide/tire-structure/Tire%20Structure_m.jpg
- [61] Ramdani, S. « Performance behavior of concrete made with waste rubber aggregates from grinding used tires and glass waste», Thèse de doctorat, Université de Biskra, (2019).
- [62] Bouchelaghem, K. « Caractérisation des matériaux cimentaires à base de granulats de caoutchouc », Mémoire de master, Université de Guelma, (2021).
- [63] Eldin, N.N., Senouci, A.B. «Engineering properties of rubberized concrete», Canadian Journal of Civil Engineering, 19, 912-923, University of Wisconsin, (1992).
- [64] Topçu, I.B., «The properties of rubberized concretes», Cement and Concrete Research, 25(2): 304-310, (1995).

- [65] Toutanji, H.A. «The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates», *Cement and Concrete Composites*, 18(2): 135-139, (1996).
- [66] Fedroff, D., Ahmad, S., Savas, B. «Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1532, 66-72, (1996).
- [67] Khatib, Z.K., Bayomy, F.M. «Rubberized Portland cement concrete», *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 11(3): 206-213, (1999).
- [68] Segre, N. Joekes, I. «Use of tire rubber particles as addition to cement paste », *Cement and Concrete Research* 30 1421±1425, (2000)
- [69] Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B. «Development of waste tire modified concrete», *Cement and Concrete Research*, 34(12): 2283-2289.20, (2004).
- [70] Guneyisi, E., Gesoglu, M., Ozturan, T. « Properties of rubberized concretes containing silica fume», *Cement and Concrete Research*: 34 2309–2317, (2004).
- [71] Al-Akhras, N.M., Smadi, M.M. «Properties of tire rubber ash mortar», *Cement & Concrete Composites*, 26 821–826, (2004).
- [72] Yunping, Xi., Yue, Li., Zhaohui, Xie., Jae S, Lee. « Utilization of solid wastes (waste glass and rubber particles) as aggregates in concrete», CO 80309, USA, (2004).
- [73] Ghaly, A.M., Cahill, J.D. «Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete», *Can. J. Civ. Eng*, 32: 1075–1081, (2005).
- [74] Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J.L. «Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres », *Building and Environement*, 40(2): 221-226, (2005).
- [75] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J.L., Hernandezc, M. «Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing», *Composite Structures*, 71 439–446, (2005).

- [76] Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Quéneudec, M. «Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste», *Cement and Concrete Composites*, 28(7): 650-657, (2006).
- [77] Benazzouk, A., Douzane, O., Quéneudec, M. « Valorisation de déchets de caoutchouc dans les matériaux de construction : cas d'un composite cimentaire cellulaire », *Déchets sciences et techniques*, N°41, p. 30-35, (2006).
- [78] Bignozzi, M.C., Sandrolini, F. «Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete», *Cement and Concrete Research*, 36(4): 735-739, (2006).
- [79] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezzeb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M., «Physico mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes», *Cement and Concrete Composites*, 29(10): 732-740, (2007).
- [80] Guneyisi, E., Gesoglu, M. «Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume», *Materials and Structures* 40:953–964, (2007).
- [81] Balaha, M.M., Badawy, A.A.M., Hashish, M. «Effect of using ground tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes», *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 14(6): 427-435, (2007).
- [82] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. «Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles», *Waste Management*, 28(12): 2472-2482, (2008).
- [83] Zheng, L., Sharon Huo, X., Yuan, Y. «Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete», *Construction and Building Materials*, 22, 939–947, (2008).
- [84] Reda Taha, M.M., ASCE1, M., El-Dieb, A. S. Abd El-Wahab, M., Abdel-Hameed, M. E. « Mechanical, Fracture, and Microstructural Investigations of Rubber Concrete», *J. Mater. Civ. Eng.*, 20:640-649, (2008).

- [85] Turatsinze, A., Garros, M. «On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates», *Resources, Conservation and Recycling*, 52 1209–1215, (2008).
- [86] Oikonomou, N., Mavridou, S. «Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires», *Cement & Concrete Composites*, 31, 403–407, (2009).
- [87] Topçu, B., Bilir, T. « Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete», *Materials and Design*, 30 3056–3065, (2009).
- [88] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. « Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete», *Construction and Building Materials*, 23(5): 1828-1836, (2009).
- [89] Sukontasukkul, P. « Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel», *Construction and Building Materials*, 23, 1084–1092, (2009).
- [90] Mavroulidou, M., Figueiredo, J. « Discarded tyre rubber as concrete aggregate: A possible outlet for used tyres», *Global Nest Journal*, 12(4): 359-367, (2010).
- [91] El-Gammal, A., Abdel-Gawad, A.K., El-Sherbini, Y., Shalaby, A. « Compressive strength of concrete utilizing waste tire rubber», *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, 1(1): 96-99, (2010).
- [92] Aiello, M.A. Leuzzi, F. «Waste tire rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state», *Waste Management*, 30(8): 1696-1704. (2010).
- [93] HO Anh Cuong, M. « Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface », *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse*, (2010).
- [94] Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T.A., Bernardin, A.M. « Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition», *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7): 757-763, (2011).

- [95] Gesoglu, M., Guneyisi, E. « Permeability properties of self-compacting rubberized concretes», *Construction and Building Materials* 25 3319–3326. (2011).
- [96] Bravo, M., De Brito, J. «Concrete made with used tyre aggregate: Durability related performance», *Journal of Cleaner Production*, 25, 42-50. (2012).
- [97] Bravo, M., De Brito, J. « with used tire rubber aggregates: mechanical performance», (2012).
- [98] Najim, K.B., Matthew R.H. «Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete», *Construction and Building Materials*, 27 521–530, (2012).
- [99] Al-Tayeb.M.M., Abu Bakar, B. H., Hazizan, M.A., Hanafi, I. «Effect of Partial Replacements of Sand and Cement by Waste Rubber on the Fracture Characteristics of Concrete», *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 51:6, 583-589, (2012).
- [100] Atahan, A.O., Yücel, A.Ö. «Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation», *Construction and Building Materials*, 36, 617-622, (2012).
- [101] Yung, W.H., Yung, L.C., Hua, L.H. «A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete», *Construction and Building Materials*, 41, 665-672, (2013).
- [102] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Labbani, F., Roucoult, J. « Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment », (2013).
- [103] Al-Tayeb.M.M., Abu Bakar, B. H., Hazizan, M.A., Hanafi, I. «Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: experiment and simulation», *Journal of Cleaner Production* 59 284e289, (2013).
- [104] Issa, C.A. Salem, G. «Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design», *Construction and Building Materials* 42 48–52, (2013).

- [105] Liu, F., Zheng, W., Li, L., Feng, W., Ning, G. «Mechanical and fatigue performance of rubber concrete», *Construction and Building Materials*, 47: 711–719, (2013).
- [106] Dong, Q., Huang, B., Shu, X. « Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent», *Construction and Building Materials* 48, 116–123, (2013).
- [107] Li, L., Ruan, S., Zeng, L. «Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles», *Construction and Building Materials*, 70, 291–308, (2014).
- [108] Robert Bennett, A.R. «Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Rubber Particles », *Vol.4, No.3; 2599-2610*, (2014).
- [109] Moghaddam, M., Rahat Dahmardeh, S., Moghaddam, H., Mousavi, S.R. «Employment Waste Rubber Powder as Cement Replacement in Self-Compacting Concrete to Achieve Environmental Suitable Concrete», *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan*, 659-666, (2014).
- [110] Onuaguluchi, O., Panesar, D.K. «Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume», *Journal of Cleaner Production*, 82, 125–131, (2014).
- [111] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P., Kumar, S. «Performance of high strength rubberized concrete in aggressive Environment», *Construction and Building Materials*, 83, 320-326, (2015).
- [112] Su, H., Yang, J., Ling, T., Ghataora, G.S., Dirar, S. «Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes», *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296, (2015).
- [113] Haddad, O., Hacid, L., Aggoun, S., Kaci, S. « Effet des granulats en caoutchouc sur les propriétés des matériaux cimentaires », *Journal of Materials, Processes and Environment*, December édition, Vol.4, No2, (2016).

- [114] Zaoiai, S., Makani, A., Taфраoui, A., Benmerioul, F. « Optimization and mechanical characterization of self- compacting concrete incorporating rubber aggregates», (2016).
- [115] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J. «Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance», *Journal of Cleaner Production*, 112: 504-513, (2016).
- [116] Boukour, S., Benmalek, M.L. « Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate», *Construction and Building Materials* 120 473–481, (2016).
- [117] Chylík, R., Trtík, T., Fládr, J., Bílý, P. « Mechanical properties and durability of crumb rubber concrete», *Materials Science and Engineering* ,236, 012093, (2017).
- [118] Gargouri, A., Daoud, A. « Valorisation des granulats de caoutchouc dans le béton autoplaçant », Du 08 au 11 Mars, Sfax – Tunisie, (2017).
- [119] Girskas, G., Nagrockiene, D. « Crushed rubber waste impact of concrete basic properties », *Construction and Building Materials* 140 36–42, (2017).
- [120] Kunal Bisht, P., Ramana, V. « Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete », *Construction and Building Materials* 155 811–817, (2017).
- [121] Ruizhe, S., Shuaicheng, G., Qingli, D. «Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles», *Construction and Building Materials* 153 496–5050, (2017).
- [122] Guelmine, L., Hadjab, H., Benazzouk, A. « Effet des granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur les propriétés physiques et mécaniques de mortier de ciment », *Séminaire international de Génie Civil*, (2018).
- [123] Aissaoui, W. « Etude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats en caoutchouc », *Mémoire de master, Université de Guelma*, (2018).

- [124] Medine, M. « Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage Des pneus usés », Thèse de Doctorat, Université de Djillali Liabès, (2018).
- [125] Bensaci, H. « performance des bétons autoplaçants à base des déchets des pneus en caoutchouc et ajouts minéraux », Thèse de doctorat, Université de blida, (2019).
- [126] Hamlaoui, Ch.A., Moussaoui, H. « Valorisation des déchets de caoutchouc des pneus et déchets de verre dans le béton de sable », Mémoire de master, Universite de bouira, (2019).
- [127] Khelaifa, A., Arfa, E., Rebiat, CH., Belkacem, M. « Etude de l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur le comportement de mortier de ciment », Mémoire de master, Université d'el-oued, (2021).
- [128] Boudjedra, F. « Contribution à l'utilisation des outils d'analyse et d'interprétation de la propagation des ondes ultrasoniques pour le diagnostic des bétons », Thèse de doctorat Université El Bouaghi, (2021).
- [129] Djaout, A., Benhamouda, F. « Les effets de l'adjuvant hydrofuge et super-plastifiant sur le comportement d'un mortier de caoutchouc des pneus usés », Mémoire de master, Université de Bordj Bou Arreridj, (2023).