

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

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de génie civil.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil.

Spécialité : Matériaux.

Par

- **OUREDJDAL Youghorta.**
- **TAMIMOUNT Oussama.**

Intitulé

Comportement physico-mécanique des BCR contenant du caoutchouc traité avec du laitier : Analyse expérimentale.

Soutenu le : juin 2022.

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.NOUI Ammar</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BENAMMAR Abdelhafid</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BELKADI Ahmed Abderaouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.BENOUADAH Abdelatif</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.KESSAL Oussama</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remercîment

Tout d'abord, je tiens à témoigner sincèrement ma gratitude en remerciant Allah le tout puissant qui nous a montré le chemin et nous a aidés à faire ce travail.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à Mr. Benammar Abdelhafid et Mr. Abdelraouf Belkadî, les professeurs de l'université de Bordj Bou Arreridj, pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour leur totale disponibilité.

Je voudrais également exprimer mon appréciation et mes remerciements particuliers au professeur Ammar Nouî qui 'ma fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui formuler ma profonde reconnaissance.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements aux Mr. Abdellatif Benouadah et Kessal Oussama D'avoir accepté de juger ce travail.

Aucours de mes travaux de recherche j'ai eu l'opportunité de bénéficier d'un grand soutien de Mr. Abdellatif Benouadah et Mr. Benammar Abdelhafid pour leurs énormes efforts et les conseils qu'ils nous ont donnés pour que ce travail soit bien fait.

Je tiens également à remercier mes collègues (Khamadj Walid et Abllaoui Abdelghani et Bougerra Thabet) et mes amis (Youghourta, Ryad, Saadi, Mouhamed Saïd, Salim, Omar, elkhiyar, bilal, bachir, soufain, karim, nabîl, houssam, oussama, issam, sami, abid, walid, lounis, hicham, hakim,). Qui étaient présent au cours de cette année.

Je terminerai en remerciant de tout mon cœur mes parents, ma grand'mère, mon grand-père mes frères, mes sœurs et toute ma famille qui mon soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable

Dédicace

Youghorta OUREDJDAL.

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

Ma grande mère,

Ma mère et mon père

Mes frères et mes sœurs

Et toute ma famille

Je teins aussi a dédié de travail a celle qui occupe mon cœur depuis toujours.

Oussama TAMIMOUNT

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

Mes grands-pères et mes grandes mères,

Ma mère et mon père

Mes frères et mes sœurs

Et toute ma famille

Table des matières

CHAPITRE I : Recherche bibliographique sur les BCR.

1. Introduction.....	11
2. Définition.....	11
3. DOMAINE D'UTILISATION DU BCR.....	11
3.1 Les barrages :.....	12
3.2 Les routes.....	13
4. AVANTAGES DU BCR.....	14
5. INCONVENIENTS DU BCR.....	14
6. COMPACTAGE DU BCR.....	15
6.1 Matériels de compactage.....	15
6.2 Opérations.....	16
7. FORMULATION DE BCR.....	17
7.1 MÉTHODES EMPIRIQUES.....	17
7.1.1 Méthode de formulation respectant les limites de maniabilité.....	17
7.1.2 Formulation basée sur des principes géotechniques.....	18
7.2 Méthode semi-empirique.....	20
7.3 Méthode théorique.....	21
8. PROPRIÉTÉS DU BCR.....	21
8.1 À L'ÉTAT FRAIS.....	21
8.2 À l'état durci.....	22

CHAPITRE II : Recherche bibliographique sur le caoutchouc.

1. Introduction.....	24
2. TYPES DE DECHETS.....	24
2.1 Déchets non recyclables :.....	24
2.2 Déchets banals.....	25
2.3 Déchets dangereux.....	25
3. Les déchets pneumatiques (caoutchouc).....	25
3.1 Le caoutchouc naturel.....	25
3.2 Le caoutchouc synthétique.....	26
4. LES PNEUMATIQUES :.....	27
5. PROBLEMATIQUE DES PNEUS.....	29
6. RISQUES POTENTIELS POUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT.....	30
7. FILIERES DE VALORISATION.....	31

7.1	Le rechapage.....	31
7.2	Valorisation énergétique.....	31
7.3	La valorisation sous forme de matières premières	31
8.	EMPLOI EN DOMAINE GENIE CIVIL.....	32
8.1	Le tapis de pneus anti-vibration.....	32
8.2	La construction de récifs artificiels	32
8.3	Mur antibruit.....	32
8.4	Le Pneu sol	33
9.	VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES DANS LES BETONS.....	33

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux, formulation et essais.

1.	Introduction.....	35
2.	Matériaux utilisés :.....	35
2.1	Gravier :.....	35
2.2	La masse volumique du gravier :.....	35
2.2.1	La masse volumique apparente :.....	35
2.2.2	La masse volumique absolue :	36
2.2.3	Analyse granulométrique (NF P18-560) :.....	36
2.3	Sable :.....	38
2.3.1	Sable de dune :	39
2.3.2	Sable concassé.....	43
2.4	Les poudrettes de caoutchouc.....	44
2.5	Liant.....	45
2.6	Eau	45
3.	Formulation des BCR :	45
3.1	Fuseau granulométrique :	45
3.2	Détermination de la teneur en eau du béton	47
3.3	Détermination de la teneur en ciment du mélange	48
4.	Les essais :	49
4.1	La masse volumique a l'état frais.....	49
4.2	Résistance à la compression (NF P18-411).....	50
4.3	Résistance à la flexion :	50
4.4	Ultrason :	51
4.5	Essai d'absorption totale [NA EN 1097] :.....	51
4.5.1	Préparation des carottes de béton :.....	51
4.5.2	Mode opératoire	52

4.5.3	Expression des résultats :	52
-------	----------------------------------	----

CHAPITRE IV : Résultats et essais.

1.	Introduction.....	53
2.	L'influence du caoutchouc sur les BCR	53
2.1	Masse volumique à l'état durci.....	53
2.2	Resistance à la compression	54
2.3	Resistance à la flexion	55
2.4	Ultrason	56
2.5	L'absorption capillaire.....	57
3.	L'influence du traitement du caoutchouc sur les propriétés des BCR :.....	58
3.1	Masse volumique à l'état durci.....	58
3.2	Resistance à la compression	59
3.3	Resistance à la flexion	60
3.4	Ultrason	61
3.5	L'absorption capillaire.....	63

Listes des figures

<i>Figure 1. 1 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie pendant la construction (Forbes2007).</i>	12
<i>Figure 1. 2 : Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).</i>	13
<i>Figure 1. 3 : Rouleaux-compresseurs-compacteurs-tandems (www.directindustry.fr.)</i>	15
<i>Figure 1. 4 : Rouleau vibrant mono roue d'acier à pneus lisses (GARGOURI A et al 2007.)</i>	16
<i>Figure 1. 5 : Paramètres optimums d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).</i>	18
<i>Figure 1. 7 : Résistance à la compression par rapport au nombre de girations (Norbert Délatte 2003).</i>	23
<i>Figure 2. 1 : Latex naturel.</i>	26
<i>Figure 2. 2 : Pneumatiques usagésHABIB trouzinea et al 2011.</i>	27
<i>Figure 2. 3 : Coupe transversale d'un pneu Michelin.</i>	29
<i>Figure 2. 4 : Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression. (AMAR benazzouk).</i>	33
<i>Figure 2. 5 : Effet du caoutchouc sur la densité. MEDDAH et al2015.</i>	34
<i>Figure 3. 1 : Courbe granulométrique de gravier 3/8.</i>	37
<i>Figure 3. 2 : Courbe granulométrique de gravier 8/15.</i>	38
<i>Figure 3. 3 : l'analyse granulométrique d'un sable concassé.</i>	43
<i>Figure 3. 4 : Analyse granulométrique des poudrettes de caoutchouc.</i>	45
<i>Figure 3. 5 : Courbe combinée des agrégats utilisés par rapport au fuseau proposé par Piggot d'après (J. Marchand 1997).</i>	47
<i>Figure 3. 6 : La teneur en eau par rapport à la masse volumique sèche du béton.</i>	48
<i>Figure 3. 7 : mesure de la masse volumique.</i>	49
<i>Figure 3. 8 : Presse hydraulique.</i>	50
<i>Figure 3. 9: flexion 3 point.</i>	51
<i>Figure 4. 1 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR.</i>	54

Figure 4. 2 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours. ...	55
Figure 4. 3 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.	56
Figure 4. 4 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.	57
Figure 4. 5 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 28 jours.	57
Figure 4. 6 : Absorption totale des bétons par rapport aux pourcentages de caoutchouc.	58
Figure 4. 7 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR à 7, 14 et 28 jours.	59
Figure 4. 8 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours.	60
Figure 4. 9 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.	61
Figure 4. 10 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.	62
Figure 4. 11 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 28 jours.	62
Figure 4. 12 : Absorption totale des différents bétons avec du caoutchouc traité et non traité.	63

Listes des tableaux

Tableau 1 1 : Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).	23
---	----

Tableau 2. 1 : Composition générale des pneus tourisme et poids lourd (en %) httpfr.wikipedia.orgwikicaoutchouc (consulté en 2022).	28
Tableau 2. 2 : Composition chimique d'un pneu. http.wikipedia.orgwikicaoutchouc (consulté en 2022).	28
Tableau 2. 3 : Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie.	30

Tableau 3. 1 : La masse volumique apparente des gravier 3/8 et 8/15.	36
Tableau 3. 2 : La masse volumique absolue des gravier 3/8 et 8/15.	36
Tableau 3. 3 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.	37
Tableau 3. 4 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.	38
Tableau 3. 5 : Equivalent de sable visuel et piston.	40
Tableau 3. 6 : Nature et qualité du sable.	40
Tableau 3. 7 : Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF.	41
Tableau 3. 8 : Masse volumique absolue du sable d'OUED SOUF.	41
Tableau 3. 9 : Analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF.	42
Tableau 3. 10 : Equivalent de sable visuel et piston du sable concassé.	43
Tableau 3. 11 : Masse volumique apparente du sable concassé.	44
Tableau 3. 12 : Masse volumique absolue du sable concassé.	44
Tableau 3. 13 : Analyse granulométrique du sable concassé.	44
Tableau 3. 14 : Pourcentage des granulats.	47
Tableau 3. 15 : Les différentes proportions de mélange.	49
Tableau 3. 16: Les différentes proportions de mélange avec la substitution en caoutchouc.	49

Tableau 4. 1 : La masse volumique des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.	53
Tableau 4. 2 : Résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.	54
Tableau 4. 3 : Résistance à la flexion à 7, 14 et 28 jours des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.	55
Tableau 4. 4 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.	56
Tableau 4. 5 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR à 7, 14 et 28 jours.	58
Tableau 4. 6 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours.	59
Tableau 4. 7 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.	60
Tableau 4. 8 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.	61

Résumé

Les pneumatiques usagés représentent, de nos jours, un problème écologique et économique dans le monde. Leur accumulation pose beaucoup de problème aux dirigeants et au décideurs. De ce fait, leurs recyclages et leurs valorisations deviennent très urgent. Dans le domaine de génie civil, plusieurs recherches ont été mené sur la possible incorporation de ces déchets dans les bétons. Cependant, ces recherches se sont basées sur la substitution du gravier par le caoutchouc.

Dans la présente étude, les déchets de caoutchouc ont été ajoutés comme substitution du sable dans le béton compacté au rouleau. Trois pourcentages de substitution ont été choisi (10%, 20% et 30%). Un traitement du caoutchouc par le laitier a aussi été étudié.

Le résultat obtenu montre que les performances mécaniques et physiques diminuent proportionnellement avec l'augmentation du caoutchouc. Concernant les mélanges traités avec du laitier, les résultats indiquent une nette amélioration des caractéristiques mécaniques.

Mots clés : Béton compacté au rouleau, caoutchouc, traitement, laitier, résistance à la compression, résistance à la flexion et absorption.

Abstract

Used tires represent, nowadays, an ecological and economic problem in the world. Their accumulation poses many problems for leaders and decision-makers. As a result, their recycling and recovery become very urgent. In the field of civil engineering, several studies have been carried out on the possible incorporation of this waste into concrete. However, this research was based on the substitution of gravel by rubber.

In the present study, waste rubber was added as a substitution for sand in roller-compacted concrete. Three substitution percentages were chosen (10%, 20% and 30%). A treatment of rubber by the slag has also been studied.

The result obtained shows that the mechanical and physical performance decreases proportionally with the increase in rubber. Regarding the mixtures treated with slag, the results indicate a marked improvement in the mechanical characteristics.

Key words: Roller-compacted concrete, rubber, treatment, slag, compressive strength, flexural strength and absorption.

ملخص

الإطارات البلاستيكية المستعملة تعتبر في يومنا هذا مشكلة بيئية و اقتصادية في العالم فإن تراكم الإطارات البلاستيكية تطرح الكثير من المشاكل للمسيرين في إعادة تدويرها و استعادتها أصبحت ضرورية للغاية. في مجال الهندسة المدنية العديد من الأبحاث أجريت على إمكانية دمج النفايات مع الخرسانة بينما هذه الأبحاث تركز على استبدال الحصى بالبلاستيك.

في الدراسة الحديثة لنفايات البلاستيك تم استبدال الرمل بالبلاستيك في الخرسانة المضغوطة بالآلة. ثلاثة نسب اختيرت للاستبدال (10%، 20%، 30%) و كذا معالجة البلاستيك ببرادة الحديد الصلب أيضا تم دراسته.

النتائج المتحصل عليها تظهر أن الأداء الميكانيكي والفيزيائي يتناقص تدريجيا مع زيادة البلاستيك فيما يخص الاختلاط المعالج مع برادة الحديد الصلب فإن النتائج تبين تطور واضح في الخصائص الميكانيكية للخرسانة المضغوطة بالآلة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المضغوطة بالآلة ، المطاط ، المعالجة ، برادة الحديد الصلب ، قوة الانضغاط ، قوة الانحناء والامتصاص.

Introduction générale

Le béton compacté au rouleau est un matériau de confection constitué des mêmes matériaux qu'un béton classique (ciment, gravier, sable, eau). On peut utiliser le BCR pour la réalisation des autoroutes, routes et des ouvrages de masse comme les barrages. Le béton compacté au rouleau caractérisé par son faible volume de pâte (il contient peu d'eau et peu de matériaux cimentaires)

L'utilisation du béton compacté au rouleau dans la confection permet d'avoir des avantages, parmi ces avantages la rapidité d'exécution, la facilité de la mise en place, le faible coût et la durabilité.

Le BCR est amené sur le site à l'aide de camions à benne et il est ensuite mis en place à l'aide d'une paveuse traditionnelle normalement utilisée lors d'une confection routière fabriquée en enrobé bitumineux. Par la suite, le béton est compacté en utilisant des rouleaux compacteurs, car contrairement à un béton conventionnel, où la quantité de pâte est suffisante pour obtenir un bon compactage avec une simple vibration, le BCR doit recevoir un apport d'énergie substantiel de l'extérieur pour se mettre en place. Le compactage permet de réduire les vides au maximum et d'obtenir une compacité maximale. Une fois consolidé, le BCR possède une capacité portante permettant la circulation de véhicule sur sa surface.

L'utilisation de béton compacté au rouleau devient plus en plus fréquente dans la confection des barrages et des chaussées au monde (États-Unis, Canada, Japon et Allemagne). Une vaste étude sur le BCR a été réalisée par des chercheurs dans le domaine de génie civil pour améliorer les caractéristiques, les performances mécaniques et physiques et la durabilité.

Actuellement, autour du monde, Le pneumatique usagé représente un déchet très encombrant et très nocif pour l'environnement. En effet, l'accumulation de ce type de déchets augmente chaque jour et son effet nocif s'agrandit de jours en jours. La valorisation de ce matériau devient donc un sujet très urgent à traiter. Dans le domaine de la confection, l'ajout du caoutchouc a été étudié par plusieurs chercheurs. Cependant, ces études antérieures se sont basées sur la substitution du gravier par le caoutchouc. Dans la présente étude, on a confectionné un béton compacté au rouleau avec des poudrettes de caoutchouc en substitution du sable. On a aussi étudié l'effet du traitement du caoutchouc par une nouvelle méthode en utilisant du laitier afin d'améliorer l'adhérence du caoutchouc vis-à-vis de la matrice cimentaire.

Dans le cadre de cette étude, on a voulu comprendre l'effet de la substitution du pneumatique comme sable dans le béton compacté au rouleau.

Pour cela, on a réalisé ce mémoire qui résume les principaux résultats obtenus. Ce travail est composé en quatre chapitre ;

- ✓ Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le béton compacté au rouleau.
- ✓ Le second chapitre présente une étude statistique est environnementale sur le pneumatique en tant que déchet.
- ✓ Le troisième chapitre illustre les caractéristiques des matériaux utilisés, la formulation des BCR ainsi que les essais effectués.
- ✓ Finalement, le dernier chapitre est consacré aux résultats et leurs interprétations.

CHAPITRE I

1. Introduction

Ce premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le béton compacté au rouleau. On a détaillé plusieurs aspects de ce nouveau béton tel que son domaine d'application, ces avantages et inconvénients, compactage et les différentes méthodes de formulation.

2. Définition

Le béton de type compacté ou rouleau (BCR) est un nouveau type de béton composé de granulés (sable, gravier), de ciment Portland, de matériaux cimentaires et d'eau. Le BCR est composé des mêmes composants que le béton ordinaire, mais en quantités très différentes. Il diffère du béton ordinaire en ce qu'il n'a pas d'affaissement (un béton très ferme), une grande quantité de granules et une petite quantité de ciment. A l'aide d'engins de travaux publics, il est préparé comme un béton, puis mis en place et compacté comme un sol (rouleau compresseur vibrant, plaques vibrantes). La dose de ciment varie de (60 à 350 kg/m³), selon la destination du projet et l'intensité des sollicitations qui en seront faites. Le BCR est un mélange qui a plus de granulés et moins de pâte que le béton conventionnel ; il s'installe également sans coffrage, n'est pas armé, et a une plasticité nettement inférieure à celle du béton conventionnel. Un revêtement BCR, comme toute autre dalle béton structurale, est un assemblage rigide.

Le BCR est construit avec le même équipement qui est généralement utilisé dans la construction de structures en béton. Il est fabriqué dans une installation fixe ou mobile, transporté par un camion plateau, et installé à l'aide d'une épandeuse et d'un finisseur.

Le rouleau compacteur assure le compactage de la matière. Une épaisseur minimale de 15 cm est requise pour une dalle en BCR. Il est nécessaire de vérifier que la couche inférieure de la dalle a atteint un niveau de compactage suffisant.

Le BCR a évolué vers deux techniques distinctes : les barrages et ouvrages massifs, et les routes (pavages). Selon le type de BCR, la formulation, les méthodes de fabrication et les méthodes de mise en œuvre diffèrent.

3. DOMAINE D'UTILISATION DU BCR

Le BCR est un nouveau type de béton avec des économies de coûts significatives. Il est couramment utilisé dans la construction de routes, d'autoroutes et de ponts, ainsi que dans la construction de barrages et le resurfaçage des autoroutes. Cependant, il existe une distinction indéniable dans son utilisation dans chaque domaine, comme la nature des matériaux, leurs

proportions et leur mise en œuvre, ce qui fait une différence significative entre ces applications.

3.1 Les barrages :



Figure 1. 1 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie pendant la construction (Forbes2007).

Le BCR est une application utile pour les barrages en raison de sa rapidité de compactage en place et de compactage en service. Il permet la construction de pentes plus solides qu'avec l'utilisation de barrages en terre et de bassins de rétention. Comparativement à d'autres bétons, le BCR destiné aux barrages à une faible résistance à la traction.

3.2 Les routes



Figure 1. 2 : Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).

Le BCR peut également être utilisé comme matériaux routiers. Ce type d'application nécessite une plus grande quantité de ciment et un rapport E/C plus faible que pour un barrage, car les sollicitations tant mécaniques (passage des véhicules) que thermiques (cycles de gel-dégel, présences de sels fondants) y sont plus importantes (J. Marchand 1997). De plus, la teneur en particules fines de diamètre inférieur à 80 μm doit être assez élevée afin de faciliter la finition de la surface du béton.

Du point de vue de durabilité, le revêtement en BCR a montré de bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telles que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes (ERES 1998).

4. AVANTAGES DU BCR

Le BCR a une bonne résistance à la compression et est beaucoup plus rentable que le béton conventionnel ; le coût du BCR est d'environ 20 à 30 % inférieur à celui du béton conventionnel. Les revêtements BCR sont respectueux de l'environnement, et ils ont aussi d'autres avantages.

- ✓ Résistance au gel/dégel.
- ✓ Faible coût.
- ✓ La Rapidité de mise en place.
- ✓ Meilleure résistance à l'érosion.
- ✓ Imperméabilité.
- ✓ Par rapport à un ouvrage en béton, moins de matières cimentaires.
- ✓ Béton sans armateurs
- ✓ Durabilité de la chaussée pour plusieurs années.
- ✓ Utilisation en tout temps,
- ✓ Propriétés mécaniques élevées

5. INCONVENIENTS DU BCR

Le BCR connaît bien les inconvénients ainsi que d'autres matériaux ;

- ✓ Coût de transport des matériaux cimentaires vers des endroits éloignés Bien que la qualité et l'uniformité de surface des revêtements BCR puissent être adaptées aux différents types d'applications souhaitées, elles constituent l'inconvénient le plus important de la technique. La texture de la surface d'un revêtement est mesurée à l'aide d'un test au papier de verre. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macro-texture de la surface (ASTM E 965). Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le texturomètre et la stéréoscopie (BaCaRa, 1996).
- ✓ L'uni d'une chaussée est défini comme une variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. Ondulations longitudinales et transversales se distinguent. Celui (confort de roulement) d'un revêtement BCR est resté un problème, limitant les applications BCR où la vitesse du

véhicule est une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage (BaCaRa, 1996).

6. COMPACTAGE DU BCR

6.1 Matériels de compactage

Pour le compactage du BCR, l'utilisation des compacteurs à rouleaux tandem avec des cylindres lisses en aluminium peuvent être utilisés en mode statique et vibratoire :



Figure 1. 3 : Rouleaux-compresseurs-compacteurs-tandems (www.directindustry.fr.)

L'utilisation d'un rouleau compacteur brillant d'acier à l'avant et des pneus à l'arrière pour finir les surfaces sans couche de roulement.



Figure 1. 4 : Rouleau vibrant mono roue d'acier à pneus lisses (GARGOURI A et al 2007.)

6.2 Opérations

Le degré de compactage du BCR à l'état frais a un impact sur ses propriétés mécaniques à l'état durci, notamment sa résistance à la flexion.

Le processus de compactage consiste en deux passages (un passage étant un cycle complet en avant et en arrière) d'un compacteur rotatif sans vibration pour consolider le matériau, suivi de quelques passages avec vibration, généralement quatre ou plus, jusqu'à ce que la compacité souhaitée soit atteinte. La procédure de compactage est complétée par quelques passages du moteur pneumatique pour sceller les éventuelles lacunes ou fractures à la surface. En l'absence de compacteur pneumatique, quelques derniers passages d'un rouleau compacteur sans vibration peuvent être utilisés pour sceller la surface.

Le compactage des bords est également un problème délicat. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les pré-équiper avec des matériaux stables, tels que les limites de la ville ; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produiraient.

Les opérations de compactage doivent commencer au plus tard 10 minutes après l'installation du BCR. Le BCR frais doit être compacté dans un délai maximum de 60 minutes mesurer à partir de son malaxage à la centrale. Lors de toutes les opérations de compactage, la surface du BCR doit être maintenue humide en permanence par vaporisation d'eau de brume.

7. FORMULATION DE BCR

La formulation du béton est une science qui définit les nombreux constituants d'un béton en fonction des propriétés souhaitées. Lorsque ces propriétés changent, la méthode de fabrication d'un béton change également. Dans cette recherche, nous allons fabriquer un BCR à partir de matériaux locaux avec une formulation différente de celle du béton ordinaire. Des méthodes de formulation de mélanges de BCR sont présentées dans le document American Concrete Institute (ACI) Committee 325.10R-95 (ACI-325.10R-95 1995). Ils ont été créés en utilisant une variété d'approches et ont été mis en œuvre avec succès. Ils reposent le plus souvent sur des approches empiriques ou semi-empiriques qui nécessitent la réalisation d'un grand nombre d'essais afin d'obtenir les proportions idéales du mélange. Au cours des dernières années, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) a développé une méthode de formulation, qui a ensuite été adaptée par le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval à la formation de mélanges de BCR. Cette méthode est basée sur une meilleure compréhension des paramètres qui déterminent les propriétés du BCR dans les états libre et dur. Dans la grande majorité des cas, un seul essai gâché est nécessaire pour déterminer les caractéristiques du produit.

7.1 MÉTHODES EMPIRIQUES

Les premières procédures utilisées pour créer des mélanges BCR étaient connues sous le nom de procédures empiriques. Ils exigent qu'un certain nombre de gâchées soient effectuées en laboratoire avant de pouvoir obtenir un mélange BCR avec les caractéristiques souhaitées. Dans certains cas, plus de 25 lots d'essais sont nécessaires pour obtenir un mélange. De plus, des gâchées sont fréquemment requises sur le chantier pour ajuster la maniabilité de l'enrobé. Ces méthodes sont simples à utiliser et relativement efficaces, mais elles sont peu adaptables et demandent beaucoup de temps et d'énergie.

Les méthodes empiriques les plus utilisées pour produire des mélanges de BCR. Voici deux de ces méthodes :

- ✓ Formulation qui respecte les contraintes de maniabilité spécifiées.
- ✓ Des méthodes de simulation géotechnique ont été utilisées pour créer le modèle.

7.1.1 Méthode de formulation respectant les limites de maniabilité

De son nom, cette méthode de formulation, comme son nom l'indique, repose sur le principe d'atteindre une limite de maniabilité en combinant plusieurs mélanges de BCR. Elle est basée sur trois étapes où les proportions du BCR sont déterminées (J. Marchand 1997).

Pour déterminer le volume minimal de pâte, la première étape consiste à effectuer plusieurs essais de mélanges gâchés de mortier avec différents rapports eau/ciment et différents rapports Agrégats/ciment. Pour chaque mélange, la masse volumique est mesurée. Le rapport eau/ciment donné correspond au rapport sable/ciment, ce qui donne une masse volumétrique idéale. La deuxième étape consiste à sélectionner un rapport eau / liant adapté aux propriétés mécaniques recherchées.

Finalement, une phase d'ajustement des proportions de granulats fins et grossiers est effectuée pour obtenir la maniabilité désirée une fois les rapports eau/liant et sable/liant fixé (J. Marchand 1997).

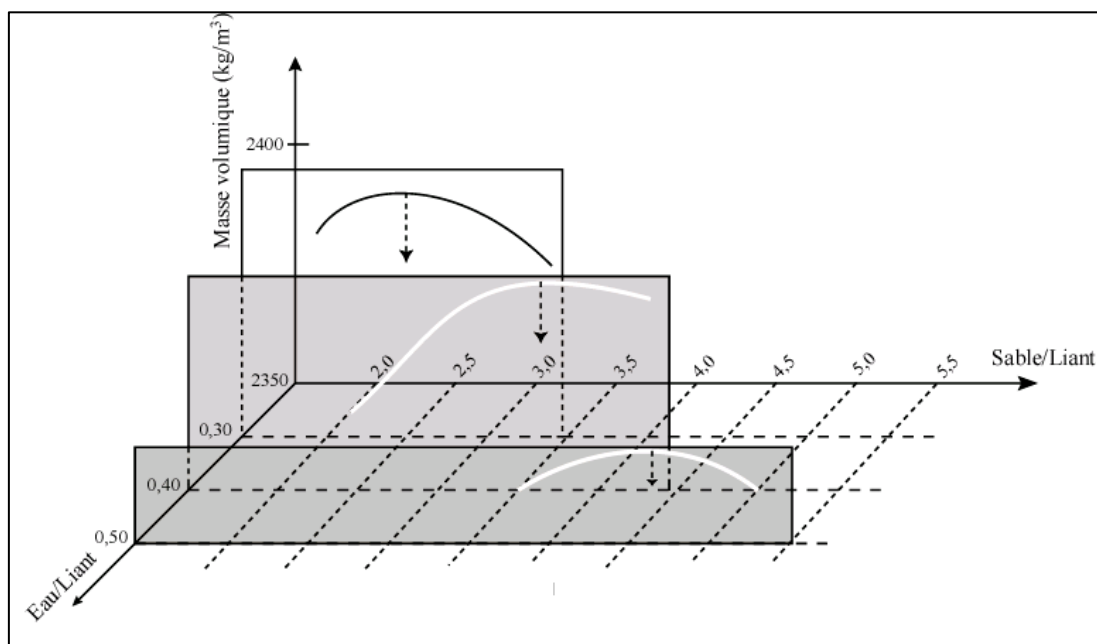


Figure 1. 5 : Paramètres optimaux d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).

7.1.2 Formulation basée sur des principes géotechniques

Cette méthode est basée sur la procédure de compactage des sols. Elle est basée sur la relation entre les agrégats secs et l'hydratation du BCR. Lors de l'utilisation de petits granulés et d'une forte teneur en matériaux cimentaires, cette méthode apparaît la plus appropriée.

En premier lieu, la proportion de granulas fins par rapport aux granulés grossiers est déterminée par des fuseaux granulométriques. Ensuite, une série de mélanges de béton avec différentes résistances à la compression sont confectionnés. La quantité de liant utilisée peut varier de 11 à 14 % de la masse totale des matières premières. Les mélanges sont réalisés à différentes teneurs en eau comprises entre 4 et 7 pour cent pour chaque série (c'est -à -dire

pour une teneur en liant donnée). Cette méthode permet de choisir la teneur en eau qui correspond à la masse sèche volumique maximale.

Chaque échantillon de béton est compacté dans un moule cylindrique avec une énergie de compactage spécifique. La masse du volume de béton compacté est mesurée et la masse sèche est calculée. Le graphique illustre la relation entre la masse sèche et la résistance à la traction de l'eau. La valeur maximale sur la courbe, comme le montre la figure (I.12), représente la teneur en eau nécessaire pour obtenir le meilleur mélange de masse sèche.

Normalement, la masse volumique humide varie très peu dans cette partie de la courbe. La masse volumique sèche calculée, en revanche, est significativement affectée. Enfin, des tests de résistance à la compression sont effectués sur des mélanges à teneur idéale dans l'eau. Le mélange ayant la teneur en liant la plus faible et les propriétés mécaniques requises est choisi.

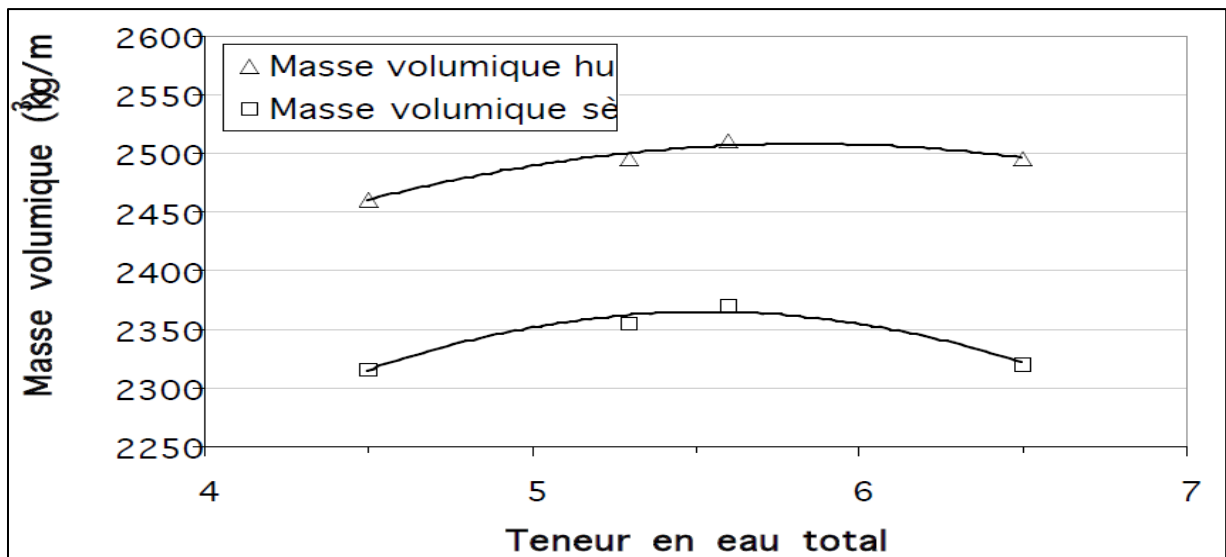


Figure 1. 6 : Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).

La méthode de formulation qui respecte les limites de maniabilité est la plus largement utilisée des deux méthodes empiriques mentionnées ci-dessus. En général, cette méthode donne de bons résultats dans la pratique. Dans la grande majorité des cas, il permet de créer des mélanges optimisés. Les formulations obtenues à l'aide d'une méthode basée sur des principes géotechniques, en revanche, sont souvent éloignées des valeurs optimales. Des courbes granulométriques prédéterminées ont été établies pour déterminer les proportions de granulés grossiers et fins à partir de valeurs moyennes déduites d'un grand nombre de mesures effectuées avec différents types de granulés. Ils ne conviennent plus pour préparer des mélanges contenant des granulés plus ou moins marginaux.

Plusieurs mélanges de laboratoire doivent être effectués en utilisant une ou plusieurs de ces méthodes de formulation avant de découvrir le mélange idéal. De plus, pour utiliser ces méthodes, vous devez avoir une expérience préalable dans le domaine des BCR. De plus, si les constituants sont uniques (nombreux matériaux granulaires), le temps de formulation sera long.

7.2 Méthode semi-empirique

Ce type de formulation nécessite une approche pratique d'une part, et quelques formules empiriques d'autre part. L'une des méthodes semi-empiriques utilisées pour fabriquer le BCR est la formulation optimale en volume de pâte. L'idée de base de cette méthode est de calculer le volume de pâte par rapport à un volume d'air. Comme il a été mentionné en haut, cette méthode nécessite des mélanges d'essais en laboratoires (J. Marchand 1997).

L'hypothèse principale qui sous-tend cette méthode est que le BCR nécessiterait un volume de pâte pour remplir les espaces intergranulaires restants une fois que le squelette granulaire a atteint sa densité maximale.

Cette méthode de formulation est également basée sur une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après compactage réduiront les propriétés mécaniques du béton tout en augmentant sa perméabilité. Une teneur excessive en pâte, en revanche, augmentera la chaleur d'hydratation ainsi que les coûts de fabrication sans augmentation significative des performances mécaniques.

Selon cette hypothèse, une faible dépense de pâte se traduira par la présence d'espaces intergranulaires, ce qui réduira les performances mécaniques et augmentera significativement la perméabilité. D'autre part, une dépense excessive de pâte amplifiera la chaleur d'hydratation et le coût, sans accroître significativement les propriétés physiques ou la diminution de la perméabilité (GAGNÉ 2000).

Cette méthode nécessite la réalisation de trois étapes afin de produire un BCR. Pour commencer, les proportions de granulats sont déterminées afin d'obtenir le mélange granulaire le plus compact possible. Le volume de granulés sous vide est calculé en mètres cubes après compactage. Deuxièmement, le dosage de la pâte doit être ajusté pour obtenir la maniabilité souhaitée. Enfin, le rapport eau/liant doit être établi afin d'obtenir une pâte répondant aux exigences mécaniques. Par rapport aux méthodes empiriques, cette méthode de formulation permet la production de mélanges de BCR avec une consommation d'énergie minimale.

7.3 Méthode théorique

L'introduction de méthodes théoriques a été l'une des méthodes les plus reconnues dans le domaine de la formation des mélanges de béton. Ces méthodes permettent de réduire la porosité (ou d'augmenter la compacité) d'un squelette de béton granulé en ajustant les proportions des différentes classes de granulés (sable, pierre, ciment et ajouts minéraux).

Ces méthodes théoriques ont l'avantage de prendre en compte l'impact d'un certain nombre de variables sur la rigidité et la durabilité du béton. Le modèle compressible (anciennement appelé Modèle de suspension solide) développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) est particulièrement bien adapté à la formulation de mélanges cimentaires à compacité granulaire optimale.

Ce modèle a été utilisé avec succès dans le développement d'un mélange de béton régulier, performant et auto nivelant. Par la suite, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval a adapté cette méthode à la construction des mélanges BCR. La performance de cette méthode de formulation a été démontrée à la suite de plusieurs études en laboratoire et de nombreuses applications de revêtement BCR sur la côte est du Canada et aux États- Unis. Cette méthode est programmable car elle est basée sur des relations mathématiques. De plus, un logiciel de calcul a été développé à cet effet.

8. PROPRIÉTÉS DU BCR

8.1 À L'ÉTAT FRAIS

La capacité du béton à être manipulé est un facteur critique dans sa production. En fait, la valeur de la maniabilité peut éclairer la méthode d'installation du béton. Le BCR, comme indiqué précédemment, est un béton sec avec un affaissement négligeable. Cette valeur apparaît plus essentielle dans le cas d'un BCR car elle a un impact direct sur la mise en place et le compactage du béton.

La maniabilité du BCR est mesurée à l'aide du test VEBE (ASTM-C1170/C1170M-08 2008). Le but de cette expérience est de déterminer combien de temps il faut au béton pour se solidifier sous l'influence d'une charge et d'une vibration spécifiques. Le temps VEBE est calculé depuis le début de la vibration jusqu'à l'apparition d'une couche de mortier sur le bord de la plaque contenant la surcharge.

La deuxième caractéristique à garder à l'esprit lorsqu'on est à l'état frais est le volume du corps. En effet, cette valeur a un impact significatif sur la résistance et les propriétés mécaniques du béton. Plusieurs recherches (Meddah, Beddar et al. 2014) ont conclu que la

densité a un rapport direct sur la résistance à la compression. La mesure de la masse volumique humide s'effectue suivant trois procédés : Proctor (ASTM-D1557-07 2007), vibro-compactage (ASTM-C1176/C1176M-08 2008) et marteau vibrant (ASTM-C-1435-99 1999).

Selon Pittman (Pittman 1989), le type de paveuse utilisé, le nombre de passages effectués par le rouleau compacteur, le temps passé jusqu'au premier compactage et l'épaisseur de la couche sont autant de facteurs qui influencent le volume du matériau humidifié.

Karimpour (Karimpour 2010) a étudié l'effet de l'intervalle de temps entre le malaxage et le compactage de deux types de béton, un béton conventionnel et un BCR comprenant du granulé et du broyé haut-fourneau laitier. Les résultats montrent qu'au fil du temps, les performances mécaniques et de perméabilité des deux bétons diminuent. Les résultats montrent qu'à mesure que le nombre de tours de temps augmente, les performances mécaniques et de perméabilité des deux bétons diminuent. En présence d'un haut fourneau laitier, cependant, l'effet du temps sur les performances mécaniques et de perméabilité est moins perceptible.

8.2 À l'état durci

À l'état durci, les performances mécaniques représentent le facteur le plus important pour estimer un béton. Un rapport servant à comparer un BCR avec un béton conventionnel a été entrepris par le service d'expertise en matériaux canadien (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005), les résultats obtenus ont montré que le BCR est plus performant que le béton conventionnel en termes de résistance mécanique et de perméabilité. Le tableau I.5 représente les différentes caractéristiques étudiées par les auteurs (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).

Tableau 1 1 : Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).

Essais	BCR	Béton conventionnel
Résistance à la compression (MPa)	66	44.8
Résistance à la flexion (MPa)	8.3	5.5
Absorption (%)	2.4	5.1
Porosité (%)	6.0	11.2
Perméabilité à l'eau (m/s)		
Essai 1	5×10^{-13}	14×10^{-13}
Essai 2	0.1×10^{-13}	9×10^{-13}

Délatte (Norbert Delatte 2003) à étudier l'effet du compactage par giration sur les performances mécaniques du BCR. Différents compactages ont été effectués sur plusieurs éprouvettes de BCR avec la même composition, les résistances à la compression et à la flexion ont été évaluées en fonction du nombre de girations. Les résultats montrent clairement que plus le compactage est dense, plus la résistance à la compression et à la flexion augmente. Les figures I.17 et I.18 montrent respectivement la relation entre la résistance à la compression et à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003)

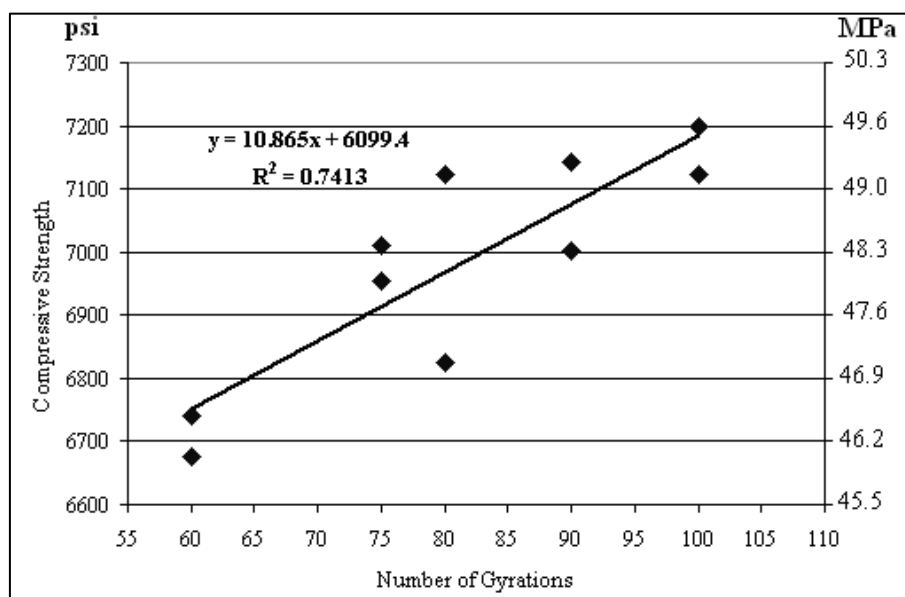


Figure 1. 6 : Résistance à la compression par rapport au nombre de girations (Norbert Délatte 2003).

CHAPITRE II

Recherche bibliographique sur le caoutchouc.

1. Introduction

Afin de répondre aux demandes toujours croissantes de ressources matérielles, ainsi qu'aux exigences et conditions environnementales, une vision de développement à long terme est nécessaire. Il est maintenant nécessaire et important d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels, en particulier dans le domaine du génie civil.

Le recyclage est une méthode de traitement des déchets industriels et ménagers qui permet de réintroduire les matériaux qui composent un produit dans le processus de fabrication. La réduction du volume des déchets et la préservation des ressources naturelles sont deux bénéfices environnementaux majeurs du recyclage. La réduction du volume des déchets et la préservation des ressources naturelles sont deux bénéfices environnementaux majeurs du recyclage. C'est une des activités économiques de la société de consommation.

Le béton de ciment Portland continuera d'être le matériau de construction le plus utilisé à l'avenir. Dans le domaine de la technologie du béton, comme dans d'autres industries, le besoin universel d'économiser les ressources, de protéger l'environnement et d'utiliser efficacement l'énergie doit se faire sentir. En conséquence, l'utilisation de déchets et de sous-produits dans le processus de fabrication du béton aura beaucoup de poids. L'utilisation des déchets et sous-produits dans l'industrie de la construction répond à la fois à la nécessité de conserver les ressources naturelles sous forme de granulés et à la responsabilité de limiter l'élimination des déchets aux seuls déchets ultimes.

2. TYPES DE DECHETS

Dans le cadre des projets de génie civil, trois types de déchets sont distingués : déchets non recyclables, déchets banals et déchets dangereux.

2.1 Déchets non recyclables :

Les déchets inertes sont les plus stables de tous les types de déchets. Ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique significative à la suite du stockage des décharges et ne constituent pas une menace pour l'homme ou l'environnement.

Voici des exemples de déchets inertes produits par le secteur de la construction :

- Béton,

- Briques,
- Parpaings,
- Tuiles et céramiques,
- Sols et granulés non pollués et non mélangés
- Caoutchouc

2.2 Déchets banals

Les déchets banals (DIB) sont des déchets non inertes et non dangereux produits par les activités commerciales, artisanales, industrielles et de services, qu'elles soient publiques ou privées. Ce sont des déchets qui ne présentent pas de risque particulier pour les personnes ou l'environnement et qui peuvent être éliminés de la même manière que les déchets dangereux, tels que les cartons, Papiers, plastiques, plâtre, verre, bois, métaux et autres matériaux.

2.3 Déchets dangereux

Les déchets dangereux, également appelés déchets industriels spéciaux (DIS), sont des déchets qui ont un caractère polluant ou toxique et doivent être éliminés dans un conteneur spécifique. En citant par exemple : pots de peinture, tubes décolle, certains déchets d 'amiante, etc.

3. Les déchets pneumatiques (caoutchouc)

Le mot "caoutchouc" vient du mot indien " caoutchouc" (qui signifie " bois agréable "), et il fait référence au caoutchouc naturel qui a été le précurseur des élastomères d'aujourd'hui.

A l' état naturel , le caoutchouc se présente sous la forme d' une suspension de latex sécrétée par les plantes à caoutchouc .Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, un arbre euphorbiacée , et d'autres espèces d'euphorbiacée .Les caoutchoucs, également appelés élastomères en termes scientifiques , sont un type de polymère appartenant à la famille des polymères .Ils sont uniques en ce qu'ils sont thermoplastiques (de l' ordre de 600 à 1 000 %).Ils peuvent être soumis à une déformation importante , et une fois la contrainte levée, ils reprennent leur forme d' origine .Ils ont une large plage de température de fonctionnement, allant de -50° à 150°C. Ils sont soit amortissant, soit résilients. Dans l'usage courant, le terme caoutchouc désigne à la fois les caoutchoucs naturels et synthétiques :

3.1 Le caoutchouc naturel

Il est issu de la sécrétion naturelle de latex par certaines plantes (par exemple, l'hévéa) ; dans ce cas, il s'agit d'une matière première agro-industrielle produite à un pourcentage élevé en Asie.



Figure 2. 1 : Latex naturel.

3.2 Le caoutchouc synthétique

Produit principalement dans les pays industrialisés à partir de dérivés du pétrole. Les contours sont beaucoup plus grands. L'industrie du caoutchouc industriel est extrêmement diversifiée, tant en termes de produits (plaques, courroies, gants, etc.) que de marchés. Ses propriétés d'élasticité, de résistance à la traction et de résistance à l'abrasion en font un matériau polyvalent pour une variété d'applications : agroalimentaire, médical, équipements industriels, BTP, mais aussi applications grand public, loisirs, etc.

Les déchets de caoutchouc proviennent de quatre sources différentes ;

- Pneumatiques de tous genres (véhicule léger, poids lourd, agricole et génie civil).
- Déchets de fabrication de pneumatiques neufs ou refaçonnés.

- morceaux de caoutchouc en fin de vie .
- les déchets générés par l' industrie du caoutchouc

4. LES PNEUMATIQUES :

Un pneumatique est composé de caoutchouc naturel et synthétique , d' adjuvants chimiques , de flexibles textiles et métalliques .Il est important de faire la distinction entre les pneus usagés non recyclables qui sont considérés comme des déchets et les pneus usagés réutilisables qui sont :

- rechapa blés.
- revendables au cas par cas.
- réparables.



Figure 2. 2 : Pneumatiques usagésHABIB trouzinea et al 2011.

La composition des pneumatiques est indiquée dans le tableau (II.1).Alors que la composition chimique est représentée dans le tableau (II.2), la figure (II.3) représente une coupe transversale d' un pneumatique dans laquelle les différents composants peuvent être vus.

Tableau 2. 1 : Composition générale des pneus tourisme et poids lourd (en %) <httpfr.wikipedia.orgwikicaoutchouc> (consulté en 2022).

Matériau	Véhicules légers (%)	Poids lourd (%)
Caoutchouc/élastomères	45	42
Noir de carbone et silice	23	24
Métaux	16	25
Textiles	6	
Oxyde de zinc	1	2
Soufre	1	1
Addition	8	

Tableau 2. 2 : Composition chimique d'un pneu. <http.wikipedia.orgwikicaoutchouc> (consulté en 2022).

Elément/composé	Teneur	Unité
Carbone	Env.70	%
Fer	16	%
Hydrogène	07	%
Oxygène	04	%
Oxyde de Zinc	01	%
Soufre	01	%
Azote	0.5	%
Acide stéarique	0.3	%
Halogènes	0.1	%
Alliage cuprifères	200	Mg/Kg
Cadmium	10	Mg/Kg
Chrome	90	Mg/Kg
Nickel	80	Mg/Kg
Plombe	50	Mg/Kg

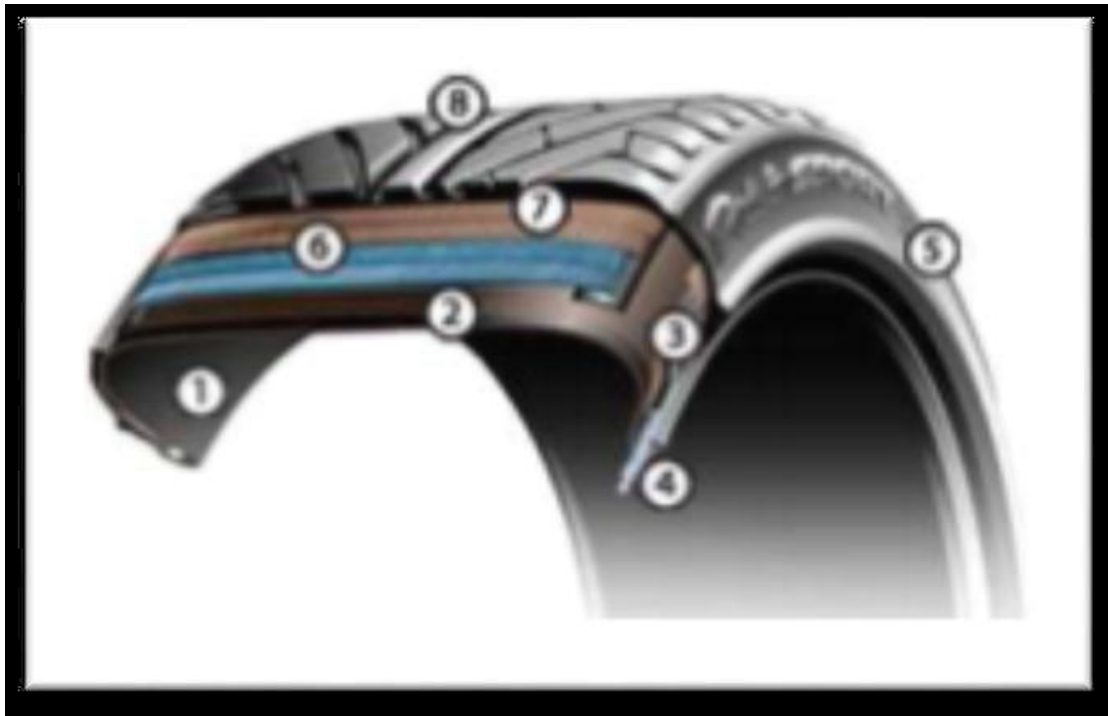


Figure 2. 3 : Coupe transversale d'un pneu Michelin.

1. Une feuille d'un caoutchouc synthétique.
2. La nappe carcasse.
3. Un bourrage zone basse.
4. Les tringles.
5. Les flancs.
6. Les nappes sommets.
7. La bande de roulement

5. PROBLEMATIQUE DES PNEUS

Actuellement, une partie importante de ces déchets, en particulier les pneus non utilisés, s'accumulent, posant un risque environnemental et économique important. Il est nécessaire de trouver une solution pour gérer ce type de déchets, notamment dans le domaine des matériaux de construction, afin de mieux protéger l'environnement et de suivre les évolutions en cours.

Chaque année, près de deux millions de pneus arrivent en fin de vie et sont mis au rebut. Ces déchets résultant du développement économique, en particulier dans les secteurs de l'industrie et des transports, peuvent être réutilisés plutôt que d'être déversés dans l'environnement. Lorsque le recyclage pollue moins l'environnement qu'un autre mode d'élimination, il est logique de valoriser ces déchets.

Reconnu comme matériau cimentaire, le béton présente une bonne résistance à la compression et est également sensible à la fissuration GRANJUJ.Let al 1995.Les projets de surf sont

encore les plus difficiles à prévoir .En effet, soumis à des contraintes telles que l' effet de retrait, les matériaux cimentaires ont une faible capacité de déformation [27, 28].En effet, l' enjeu principal est d' améliorer la déformabilité de ce matériau cimentaire sans entraîner une diminution significative de sa résistance.

L'environnement est un enjeu crucial et sa préservation est une responsabilité partagée. Le problème des pneus usagés n'est pas seulement mondial, mais aussi marocain et africain. L'Algérie a reconnu le problème dans le bassin méditerranéen et a développé des stratégies locales ou internationales de lutte contre la pollution. Plusieurs textes et lois ont été établis sur le plan réglementaire pour définir, gérer et éliminer les déchets.

Tableau 2. 3 : Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie.

Types de pneus	Quantités		
	Pneus/an	Tonne/an	Pneu/personne/an
Véhicules légers	1107410	7966.97	-
Poids lourds	332104	17951.53	-
Total	1439514	25918.50	0.0413

6. RISQUES POTENTIELS POUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT

Les éléments qui composent un pneu ne sont pas intrinsèquement nocif car ils n'ont pas de propriétés dangereuses. Cependant, s'ils ne sont pas correctement gérés et éliminés, ils peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'environnement.

Les pneus ne sont pas biodégradables dans le sens où le temps qu'il leur faut pour se décomposer est inconnu. Les pneus usagés sont des déchets volumineux et volumineux difficiles à broyer, à ramasser et à éliminer. Ils dégradent le paysage et peuvent obstruer les voies de circulation, les ruisseaux et les déversoirs d'orage, ce qui entraîne des changements dans la chimie de l'eau pouvant entraîner l'érosion, l'empiètement et l'inondation. Parce qu'ils retiennent la chaleur et ont une structure ouverte, les crevaisons de pneus augmentent le risque d'incendie en raison d'un acte involontaire ou d'un accident, tel qu'un incendie. Ce type d'incendie est difficile à contrôler et à éteindre, et il peut libérer des fumées toxiques, des huiles et d'autres produits qui polluent l'air, le sol et les cours d'eau pendant des moishealth protection agency 2003. Les pneus prennent beaucoup de place dans les rejets, présentent un risque potentiel d'incendie, ne se biodégradent pas et remontent fréquemment à la surface,

complicant la gestion de ces sites. C'est pour cette raison que l'Union européenne a interdit leur libération.

7. FILIERES DE VALORISATION

Le parcours des pneus usagés s'organise de la manière suivante : après démontage, les pneus usagés sont stockés par des garagistes avant d'être collectés par des collecteurs qui trient les pneus pour trouver ceux qui peuvent être réutilisés ou rechapés. Les pneus usagés non réutilisables sont soit stockés entiers, soit décochés, soit broyés avant d'être livrés aux vaporisateurs.

7.1 Le rechapage

Il s'agit d'une technique pour prolonger la durée de vie d'un pneu usé (PU) en remontant la bande de rotor du pneu. Michelin a implanté la seule opération du groupe en Afrique, d'une capacité de 250 000 enveloppes PL chaque année, sur un marché algérien de 700 000 unités par an dominé par les produits chinois (environ 30 % du marché).ADEME2022

7.2 Valorisation énergétique

La capacité calorifique des pneus est importante : 3 tonnes de pneus peuvent remplacer environ 2 tonnes de carburant. L'industrie du ciment est le plus gros consommateur de PU. Les PU décochés sont introduits au tour de pré calcination, tandis que les PU entiers sont introduits aux quatre [34]. Les inconvénients de ces méthodes sont liés à l'utilisation d'installations fixes, au transport du PU et aux conditions d'émission dans l'air. Cette valorisation n'est pas réalisée en Algérie puisque l'utilisation du gaz naturel dans la fabrication du ciment est privilégiée.

7.3 La valorisation sous forme de matières premières

Les pneumatiques utilisés peuvent être en poudre ou constitués de granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en conjonction avec d'autres matériaux.

• Poudrettes :

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille inférieure à 2 mm. Le coût de son obtention est déterminé par sa finesse, son origine chimique et la présence ou non de corps étrangers. Les poudres sont utilisées comme charges dans des mélanges permettant de réaliser des pièces sans être soumises à de fortes contraintes mécaniques ou dynamiques. Comme exemple d'application, on peut citer la fabrication de bandages et de roues pleine longueur, ainsi que la modification de revêtements routiers (réduction du bruit), etc.HABIB trouzinea et al 2011.

- **Granulés :**

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle du sucre en poudre. Les granulés peuvent être agglomérés avec des résines colorées ou non colorées, et ils peuvent être facilement mis sous forme de feuilles ou de plaques par moulage. A titre d'exemple d'application, il y a les terrains de sport, les pavés antivibrants, et le resurfaçage des terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...)

D'autres formes de valorisation des matériaux par transformation chimique sont envisageables, comme la régénération (combinaison d'activités chimiques, mécaniques et thermiques) ou Pyrolyse – Thermolyse. Les produits de cette décomposition comprennent les huiles combustibles lourdes et légères, le carbone, etc. Le coût de mise en œuvre freine cependant le développement industriel de ces modes de valorisation. HABIB trouzine et al 2011.

8. EMPLOI EN DOMAINE GENIE CIVIL

Les pneus ont une variété de propriétés qui les rendent attrayants pour les ingénieurs civils et géotechniques : ductilité et faible conductivité thermique. Plusieurs approches d'utilisation du PU en génie civil sont bien connues dans le monde : Pneu-sol, etc. TROUZINE H et al 2008.

8.1 Le tapis de pneus anti-vibration

Le ruban pneumatique est intercalé entre le ballast et la couche de coffrage (ou placé sur les tabliers des ponts) pour amortir les vibrations causées par diverses machines, telles que les trains, les tramways et les béliers de métro MBOUBAKER et al 2009.

8.2 La construction de récifs artificiels

Les pneus, qui peuvent être immergés à une profondeur de dix ou vingt mètres et assemblés et gravés au laser avec des blocs de ciment, peuvent créer des récifs artificiels qui offrent des refuges sûrs à la vie marine. Entre 1974 et 1977, plus de 500.000 pneumatiques ont été immergés dans la Caroline du Nord, démontrant que le Japon et les Etats- Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel. Cinq récifs artificiels ont été construits en France.

8.3 Mur antibruit

L'ingénieur R. Beyler a proposé un mur anti-ecchymoses avec une structure absorbante constituée de pneus usagés enfermés dans un caisson métallique à face perforée. Des expérimentations menées en 1992 selon la norme AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées par la norme, faisant de ce mur antibruit l'un des plus intéressants M BOUBAKER et al 2009.

8.4 Le Pneu sol

Le Pneu Sol est composé de deux éléments différents : l'air et le sol. Le terme "pneus" désigne tous les composants d' un pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) ainsi que des pneus entiers reliés linéairement ou en nappes et capables de supporter des efforts de traction importants .Le terme "sol" fait référence à un large éventail de surfaces naturelles, artificielles et mises au rebut .La technologie du bandage pneumatique est critique car son principe relativement basique ne pourrait se développer et s'imposer dans le domaine du génie civil sans une analyse technique poussée des éléments technologiques permettant une standardisation des matériaux [25] .

9. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES DANS LES BETONS ET LES MORTIERS

De nombreuses études expérimentales ont été menées sur la possibilité de valoriser les déchets pneumatiques dans le béton sous agrégats. Ces études ont conclu que l'incorporation de déchets pneumatiques dans le béton affecte les propriétés physico-mécaniques du matériau tant à l'état frais qu'à l'état sec. Les principales conclusions tirées de ces études sont que l'inclusion de particules de caoutchouc réduit les paramètres de densité et de résistance du béton tout en augmentant la ductilité de ces matériaux (

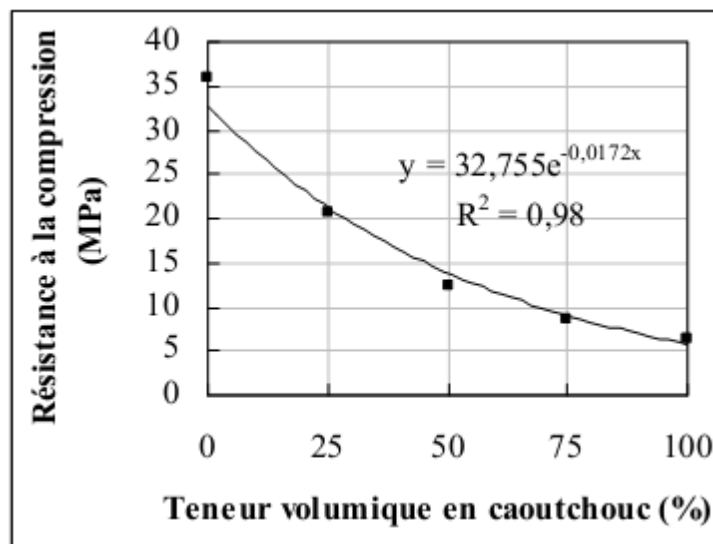


Figure 2. 4 : Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression. (AMAR benazzouk).

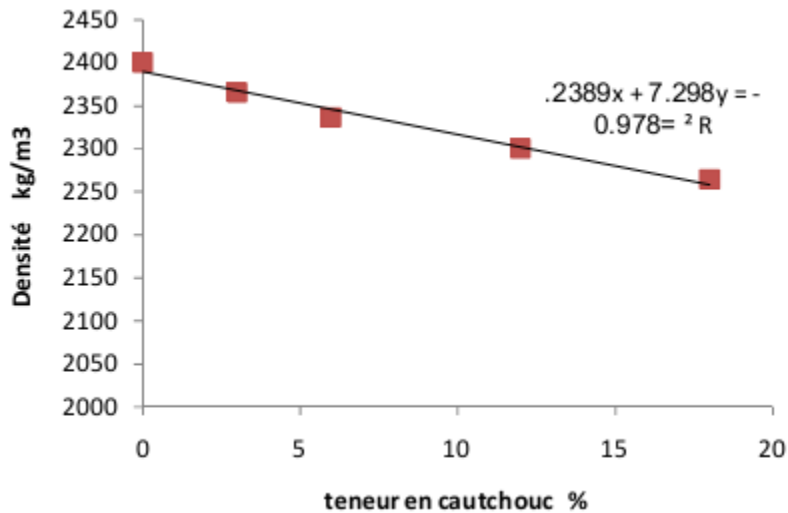


Figure 2. 5 : Effet du caoutchouc sur la densité. MEDDAH et al2015.

CONCLUSION

Le pneu usagé est un déchet encombrant car leur nombre augmente chaque année, les valoriser permet de réduire leur quantité et, par conséquent, de protéger l'environnement et les ressources naturelles. La valeur des déchets pneumatiques en génie civil est importante car les nombreuses applications de ces déchets en génie civil offrent à un ingénieur une infinité d'options pour obtenir un nouveau matériau. Le béton à base d'agrégats de caoutchoutière d'origine est un nouveau matériau qui nécessite, entre autres, des recherches expérimentales permanentes pour caractériser ses propriétés. L'autre élément est de trouver de nouvelles applications pour ce matériau composite.

CHAPITRE III : caractérisation des matériaux, formulation et essais.

1. Introduction

Les caractéristiques des matériaux entrant dans la composition d'un béton compacté au rouleau jouent un rôle critique dans ses propriétés et ses performances à long terme. En effet, les caractéristiques des constituants du BCR ont un impact significatif sur ses propriétés essentielles.

De ce fait, et on se conformant aux normes en vigueur, normaliser les modes d'essais et identifier les composants d'un BCR devient une nécessité pour obtenir un béton avec des résultats expérimentaux équivalents à ceux rapportés dans la littérature.

Ce chapitre décrit les différents matériaux utiliser dans la construction des éprouvettes de béton, ainsi que les essais à réaliser selon les normes et modes opératoires en vigueur.

Les matériaux utilisés dans nos recherches sont des matériaux locaux, et nous avons mené des tests expérimentaux sur leurs propriétés au Laboratoire de Génie Civil de l'Université EL BACHIR EL IBRAHIMI Bordj Bou Arreridj.

2. Matériaux utilisés :

Le BCR est un type de béton différent du béton traditionnel, bien que ses constituants soient les mêmes : ciment, gravier, sable et eau. Néanmoins, les essais effectués sur les matériaux sont les mêmes. La section suivante illustre les nombreuses caractéristiques des constituants.

2.1 Gravier :

Le gravier est un élément important dans la fabrication du béton ; néanmoins, pour le BCR, ce composant doit être irréprochable afin d'obtenir un béton durable à tous les niveaux. Deux fractions de gravier (3/8, 8/15) ont été utilisées pour fabriquer le BCR dans cette étude. Le BCR étant conçu pour une chaussé, le diamètre maximum a été fixé à 15 mm.

2.2 La masse volumique du gravier :

2.2.1 La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un gravier est la masse du gravier qui occupe une unité de volume. Le terme « volume apparent » est défini par la norme NF18-554.

- **Mode opératoire :**

Prendre un récipient de volume ($V=5000\text{ml}$) et de masse M_1 , le remplir d'un gravier, araser la surface du récipient puis le pesé (M_2). La masse volumique apparente est calculée selon la formule suivante.

$$\rho_{app}=(M_2-M_1)/V$$

Tableau 3. 1 : La masse volumique apparente des gravier 3/8 et 8/15.

Gravier	M ₁ (kg)	M ₂ (kg)	M ₂ -M ₁	V (l)	ρ _{app} (kg/l)
3/8	0.702	1.904	1.202	1	1.202
8/15	0.702	2.033	1.331	1	1.331

2.2.2 La masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est un terme utilisé pour décrire la masse d'un matériau divisé sur son volume réel (vide exclu). La norme NF18-554 définit la masse volumique du gravier comme le rapport d'une masse sèche sur le volume de matière solide sans aucune teneur en air dans les grains (volume absolu).

- **Mode opératoire :**

Selon la méthode de l'éprouvette graduée, le volume d'eau dans l'éprouvette a été fixé à V₁=400 ml. Chaque fraction gravière a une masse de M=300g. La masse M se retrouve dans l'éprouvette qui contient déjà V₁. Après reversement du gravier dans l'éprouvette, on déduit le volume de l'eau plus celui du gravier V₂.

Tableau 3. 2 : La masse volumique absolue des gravier 3/8 et 8/15.

Gravier	M(g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ _{abs} (kg/l)
3/8	300	400	514	2.63
8/15	300	400	515	2.60

2.2.3 Analyse granulométrique (NF P18-560) :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition d'un matériau en fonction de ses dimensions.

- **Mode opératoire :**

La masse M de l'échantillon à tester doit être supérieure ou égale à 0,2 D, avec M en kilogrammes et D la plus grande dimension indiquée en millimètres pour chaque fraction.

- On prépare une série de tamis de dimension décroissant de haut vers le bas de grande vers petite ouverture, tel que chaque gravier (3/8,8/15,) contient une série spécifique comme suite:
 - (3/8(8,6.3,5,4,3.15,2.5,fond).
 - (8/15(16,12.5,10,8,6.3,5,fond).

- Après avoir pesé chaque tamis, la masse de gravier est visible dans la colonne de tamis, et l'agitation se fait mécaniquement pendant 5 minutes

Tableau 3. 3 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis en (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	0	0	0	100
6.3	134.24	134.24	8.39	91.61
5	417.6	551.84	34.49	65.51
4	488.96	1040.8	65.05	34.95
3.6	386.56	1427.36	89.21	10.79
2.5	94.88	1522.24	95.14	4.86
1.25	43.68	1565.92	97.87	2.13
Fond	34.08	1600	100	0

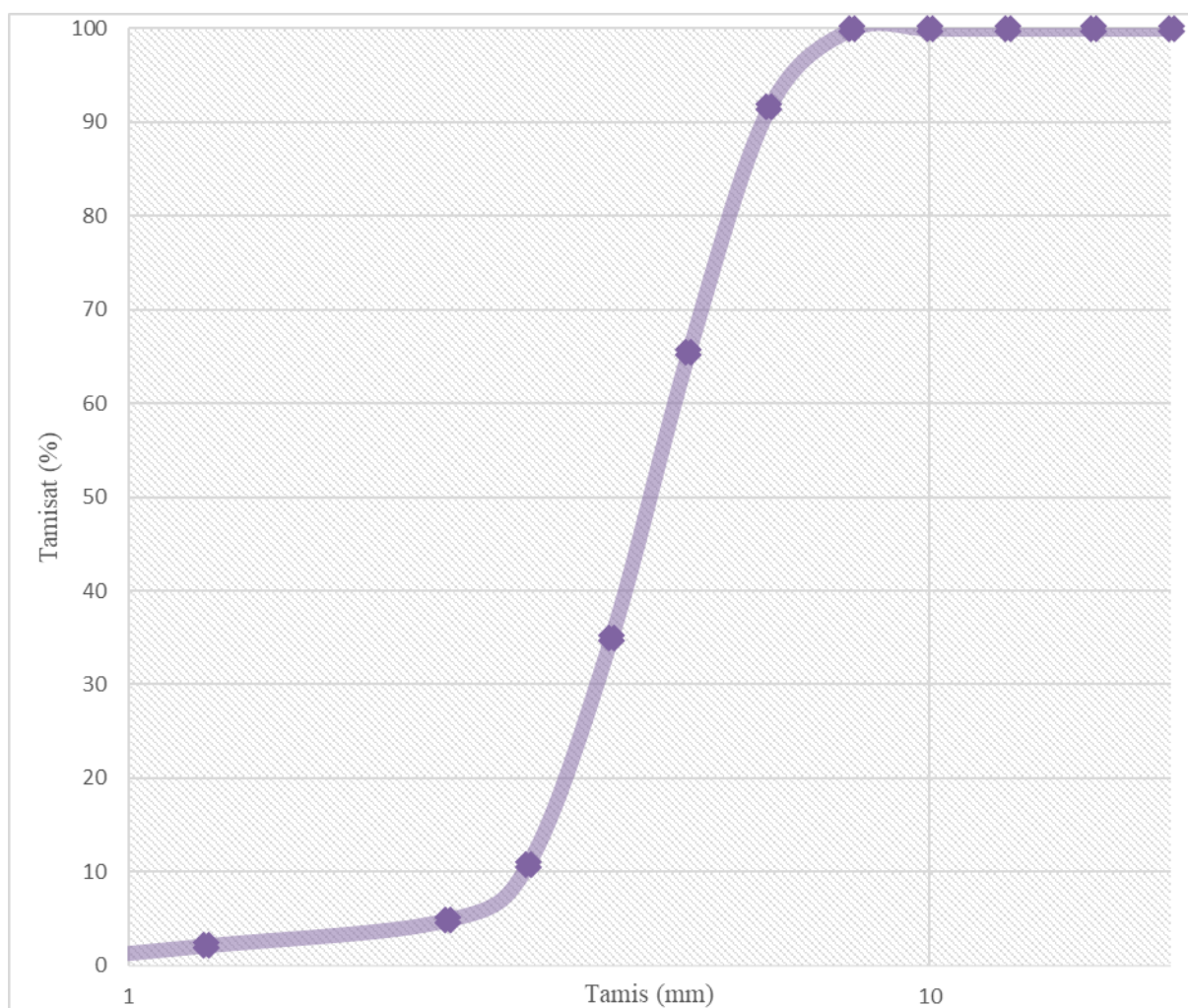


Figure 3. 1 : Courbe granulométrique de gravier 3/8.

Tableau 3. 4 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tamis en (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20	0	0	0	100
16	218.4	218.24	6.82	93.18
12.5	507.96	726.2	22.71	77.29
10	1110.6	1836.8	57.4	42.6
8	892.16	2728.96	85.28	14.72
6.3	389.76	3118.72	97.46	2.54
5	44.16	3162.88	98.84	1.16
Fond	37.12	3200	100	0

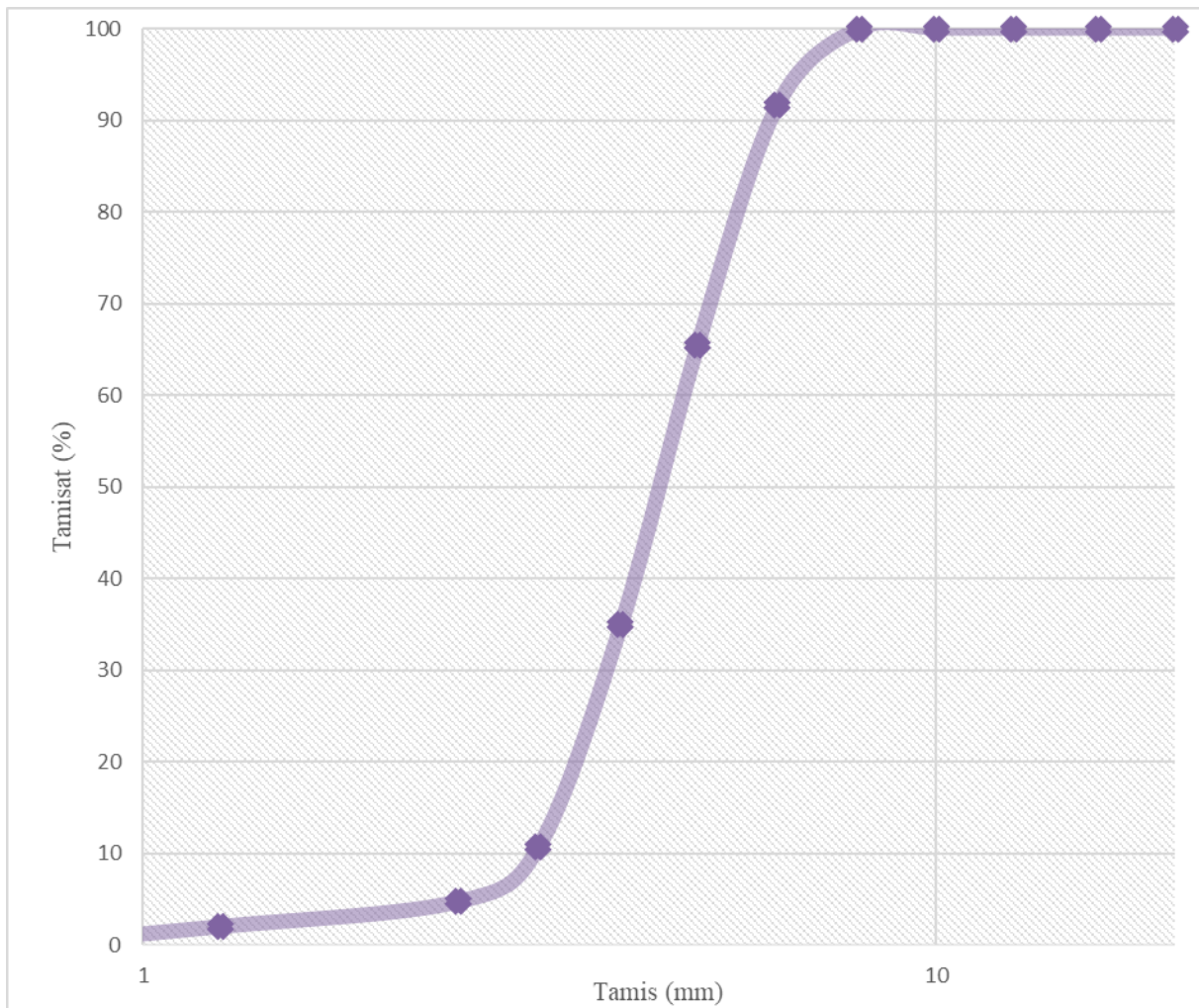


Figure 3. 2 : Courbe granulométrique de gravier 8/15.

2.3 Sable :

2.3.1 Sable de dune :

Le BCR possède un fuseau granulaire très sensible. Ses performances de compacité et de durabilité sont assurées non seulement par le compactage, mais aussi par la consistance de son squelette granulaire. L'utilisation de deux types de sable, comme dans cette étude, procure au béton un squelette granulaire très compacte. En effet, le premier sable (sable de dune) a un module de finesse plus faible (2,06) que le second sable (sable concassé=3,24), donc la combinaison des deux finesses donne un mélange BCR approprié.

2.3.1.1 Equivalent de sable :

L'essai de l'équivalent de sable est réalisé conformément à la norme NF P18-598. Le test consiste à agiter les sables, qui décantent, et les éléments fins, qui restent en suspension, dans une éprouvette à l'aide d'une solution lavante.

✓ Mode opératoire :

- Éléments suivants sont souvent nécessaires pour ce test : une balance, une éprouvette spécifique ES, une machine d'agitation, un chronomètre et une règle. Les matériaux utilisés étaient du sable et une solution lavante.
- Remplir l'éprouvette cylindrique avec une solution lavante jusqu'au premier trait, puis verser délicatement une quantité de sable sèche de masse 120 g dans l'éprouvette placée verticalement.
- Contre frapper à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air, puis laisser reposer le tout pendant 10 minutes.
- A la fin de la période de 10 minutes, placez le bouchon en caoutchouc sur l'éprouvette et placez l'ensemble sur l'agitateur, puis déclenchez l'agitation.
- Retirez le bouchon en caoutchouc et rincez avec de la solution lavante jusqu'au 2^{ème} trait.
- On laisse l'éprouvette reposer pendant 20 min \pm 10 s.

- A l'issue des 20 minutes, la hauteur H_1 du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette, ainsi que la hauteur H_2 du niveau supérieur de la portion, sont mesurées à l'aide de la règle.
- Descendez le piston taré dans l'éprouvette progressivement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant repose sur l'éprouvette. Bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston lorsque la base du piston repose au sol. Insérer le régulateur dans l'encoche du manchon, appuyer le zéro sur la face inférieure de la tête du piston, et mesurer la hauteur du sédiment H_2 en haut du manchon.

Les formules pour calculer E.S sont :

- ✓ Equivalent sable visuelle $E.S.V = H_2/H_1 * 100$
- ✓ Equivalent sable exprimé $E.S.P = H_2/H_1 * 100$

Tableau 3. 5 : Equivalent de sable visuel et piston.

E.S.V(%)	E.S.P(%)
84.56	80.36

Tableau 3. 6 : Nature et qualité du sable.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
E.S < 65	E.S < 60	Sable argileux, risquer de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < E.S < 75	60 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 < E.S < 85	70 < E.S < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité valeur optimale ($E.S.P = 75.09$ et $E.S.V = 77.14$).
E.S > 85	E.S > 80	Sable très propre, l'absence presque totale de fines argileuses risquerait d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Interprétation :

Sur la base des résultats, on peut conclure que le sable d'Oued Souf est un sable pur avec un faible pourcentage d'argiles fines, idéale pour un béton de haute qualité

2.3.1.2 La masse volumique :

2.3.1.2.1 La masse volumique apparente NF18-555 :

La masse volumique apparente d'un sable est la masse du sable qui occupe une unité de volume connu.

✓ **Mode opératoire :**

Nous prenons un récipient de 1 litre avec une masse (M_1) et le remplissons d'échantillons de sable. Une fois le conteneur plein, on nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit (M_2). La masse volumique apparente de sable est calculé par la formule suivante:

$$\rho_{app}=(M_2-M_1)/V$$

Tableau 3. 7 : Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF.

M(g)	V(L)	$\rho_{app}(g/cm^3)$
1.70	1	1.70

2.3.1.2.2 La masse volumique absolue NF18-555:

La masse volumique absolue est le rapport de la masse sèche d'un sable au volume de matière solide sans air inclus entre les grains.

✓ **Mode opératoire :**

On pèse une quantité de sable (Oued Souf) égale à M, puis remplir une éprouvette graduée de 1000 ml avec un volume d'eau égal à V_1 . Puis, et après avoir versé le sable dans l'éprouvette gradué, on mesure le nouveau volume (eau+ sable) et on le note V_2 . La masse volumique absolue est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_{abs} = M / (V_2 - V_1).$$

Tableau 3. 8 : Masse volumique absolue du sable d'OUED SOUF.

M(g)	$V_1(ml)$	$V_2(ml)$	$\rho_{abs}(g/cm^3)$
300	400	519	2.51

2.3.1.3 Analyse granulométrique (NF18 304) :

L'essai Permet de déterminer les pourcentages bruts et relatifs des différents grains composant l'échantillon. Il s'agit de mettre l'échantillon à l'épreuve sur une série de tamis décroissants, les uns après les autres, et de peser le refus dans chacun.

✓ **Mode opératoire :**

-La masse M de l'échantillon d'essai doit être supérieure ou égale à 0,2 D, avec M en kilogrammes et D la plus grande taille indiquée en millimètres. Cela signifie que nous devrions peser une masse M de 0,25. (1 Kg).

-Après avoir pesé chaque tamis, la masse de sable est visible dans la colonne de tamis, et l'agitation se fait mécaniquement pendant 5 minutes.

Tableau 3. 9 : Analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF.

Tamisen (mm)	Refuspartiel(g)	Refuscumulé (g)	Refuscumulé(%)	Tamisât(%)
6.3	0	0	0	100
5	7.5	7.5	0,3	99,7
4	12.5	20	0.8	99.2
3.15	5.5	25.5	1.02	98.98
2.5	17	42.5	1.7	98.3
1.25	115	157.5	6.3	93.7
0.63	400	557.5	22.3	77.7
0.315	1030	1587.5	63.5	36.5
0.16	792.5	2380	95.2	4.8
0.08	2.5	2382.5	95.3	4.7
Fond	117.5	2500	100	0

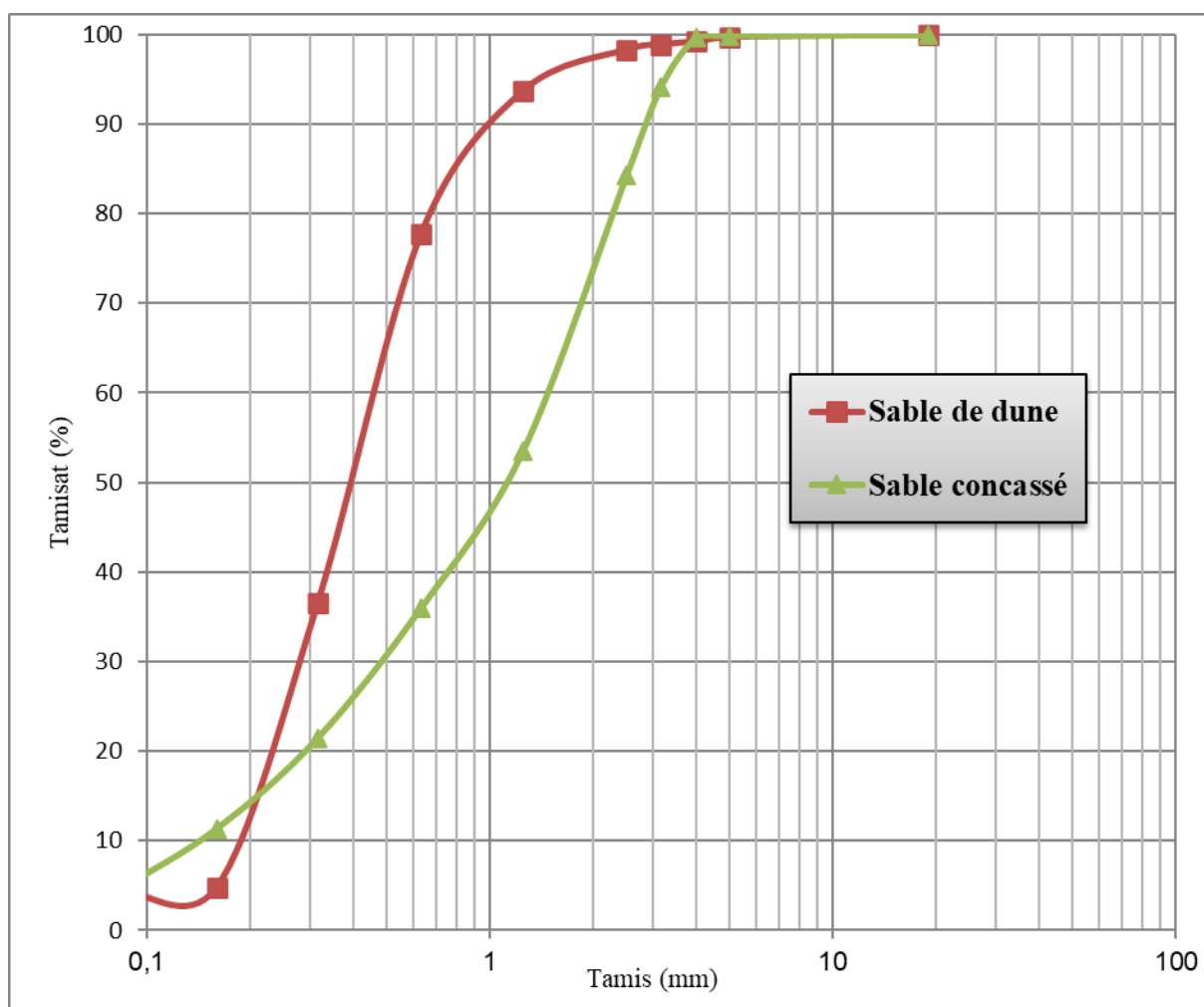


Figure 3. 3 : l'analyse granulométrique d'un sable concassé.

2.3.2 Sable concassé

Le sable concassé utilisé dans le cadre de cette étude provient de la carrière de SETIF. Ces différentes caractéristiques sont regroupées ci-dessous.

2.3.2.1 Equivalent desable :

Tableau 3. 10 : Equivalent de sable visuel et piston du sable concassé.

E.S.V(%)	E.S.P(%)
96.42	94.08

2.3.2.2 La masse volumique :

2.3.2.2.1 La masse volumique apparente :

La masse volumique apparent d'un sable qui occupe une unité de volume, toutes les autres variables étant égales. Il est conforme à la norme NF18-555.

Tableau 3. 11 : Masse volumique apparente du sable concassé.

M(g)	V(L)	$\rho_{app}(g/cm^3)$
1640	1	1.64

2.3.2.2.2 La masse volumique absolue :

Le rapport de la masse sèche d'un sable au volume de matière solide sans air inclus dans les grains est la masse "absolue" de sable.

Tableau 3. 12 : Masse volumique absolue du sable concassé.

M(g)	V1(ml)	V2(ml)	$\rho_{abs}(g/cm^3)$
300	400	553.25	2.61

2.3.2.3 Analyse granulométrique (NF18 304) :

Tableau 3. 13 : Analyse granulométrique du sable concassé.

Tamisen mm	Refuspartiel(g)	Refuscumulé (g)	Refuscumulé(%)	Tamisât(%)
6.3	0	0	0	100
5	1,76	1,76	0,11	99,89
4	3,2	4,96	0,31	99,69
3.15	88,16	93,12	5,82	94,18
2.5	158,72	251,84	15,74	84,26
1.25	492,16	744	46,5	53,5
0.63	280,48	1024,48	64,03	35,97
0.315	232,48	1256,96	78,56	21,44
0.16	161,92	1418,88	88,68	11,32
0.08	115,52	1534,4	95,9	4,1
Fond	65,6	1600	100	0

2.4 Les poudrettes de caoutchouc

Le caoutchouc utilisé, dans le cadre de cette étude, provient d'une usine de recyclage des pneumatiques basée au niveau de la wilaya de BOUIRA. Sa masse volumique absolue est égale à 0.91 kg/l.

L'analyse granulométrique des poudrettes de caoutchouc est présentée dans la figure ci-dessous.

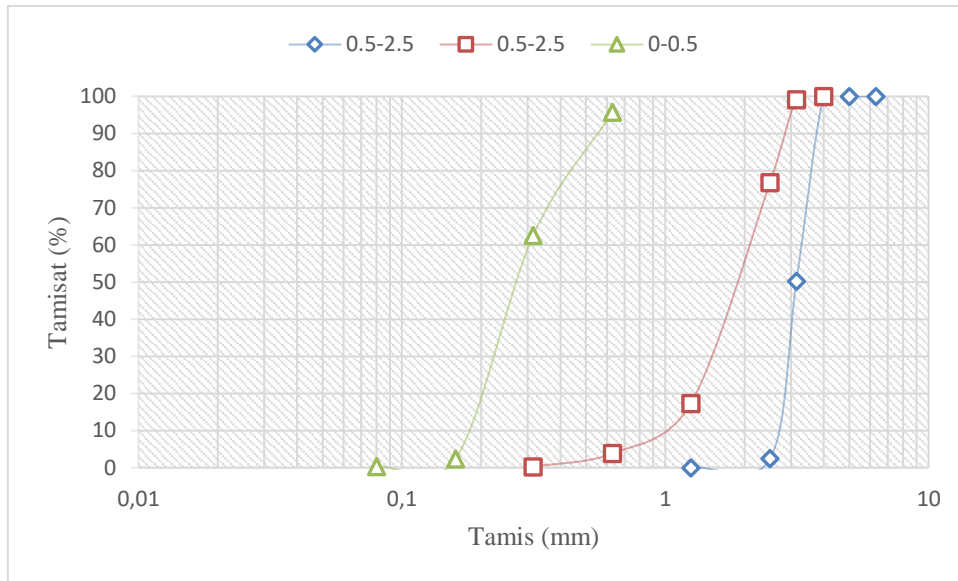


Figure 3. 4 : Analyse granulométrique des poudrettes de caoutchouc.

2.5 Liant

Le type de ciment utilisé dans la préparation du BCR a un impact significatif sur la vitesse d'hydratation et le taux de développement de la résistance, et a donc un impact significatif sur la résistance aux jeunes âges. Toute forme de ciment peut être utilisée pour faire un mélange BCR. Cependant, le type de ciment utilisé est en grande partie déterminé par les exigences de performance liées aux critères de résistance et de durabilité ou, pour le dire autrement, il est déterminé par la destination et l'importance du projet.

2.6 Eau

L'eau utilisée dans la fabrication du béton pourrait avoir un impact significatif sur les performances futures. La présence d'un élément nocif dans la composition chimique de l'eau doit être déterminée avant le gâchage. L'eau utilisée dans cette étude provient d'un robinet du laboratoire de l'Université BBA.

3. Formulation des BCR :

3.1 Fuseau granulométrique :

Pour sélectionner les pourcentages des différentes fractions d'agrégats, la courbe combinée doit être située à l'intérieur du fuseau ; les résultats sont affichés dans le tableau.3.13 et la figure 1

Tableau 3. 13 : Tamisât de différentes fractions d'agrégats.

Diamètre	Gravier 15/20	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable		Combinée
				Dune	Concasse	
20	0	100	100	100	100	100
16	0	93,18	100	100	100	97,613
12,5	0	77,29	100	100	100	92,0515
10	0	42,6	100	100	100	79,91
8	0	14,72	100	100	100	70,152
6,3	0	2,54	91,61	100	100	64,6305
5	0	1,16	65,51	99,7	99,89	60,168
4	0	0	34,95	99,2	99,69	55,063
3,15	0	0	10,79	98,89	94,18	48,944
2,5	0	0	4,86	98,3	84,26	43,561
1,25	0	0	2,13	93,7	53,5	29,0795
0,63	0	0	0	77,7	35,97	20,0715
0,315	0	0	0	36,5	21,44	11,473
0,16	0	0	0	4,8	11,32	5,334
0,08	0	0	0	4,7	4,1	2,08
Fond	0	0	0	0	0	0

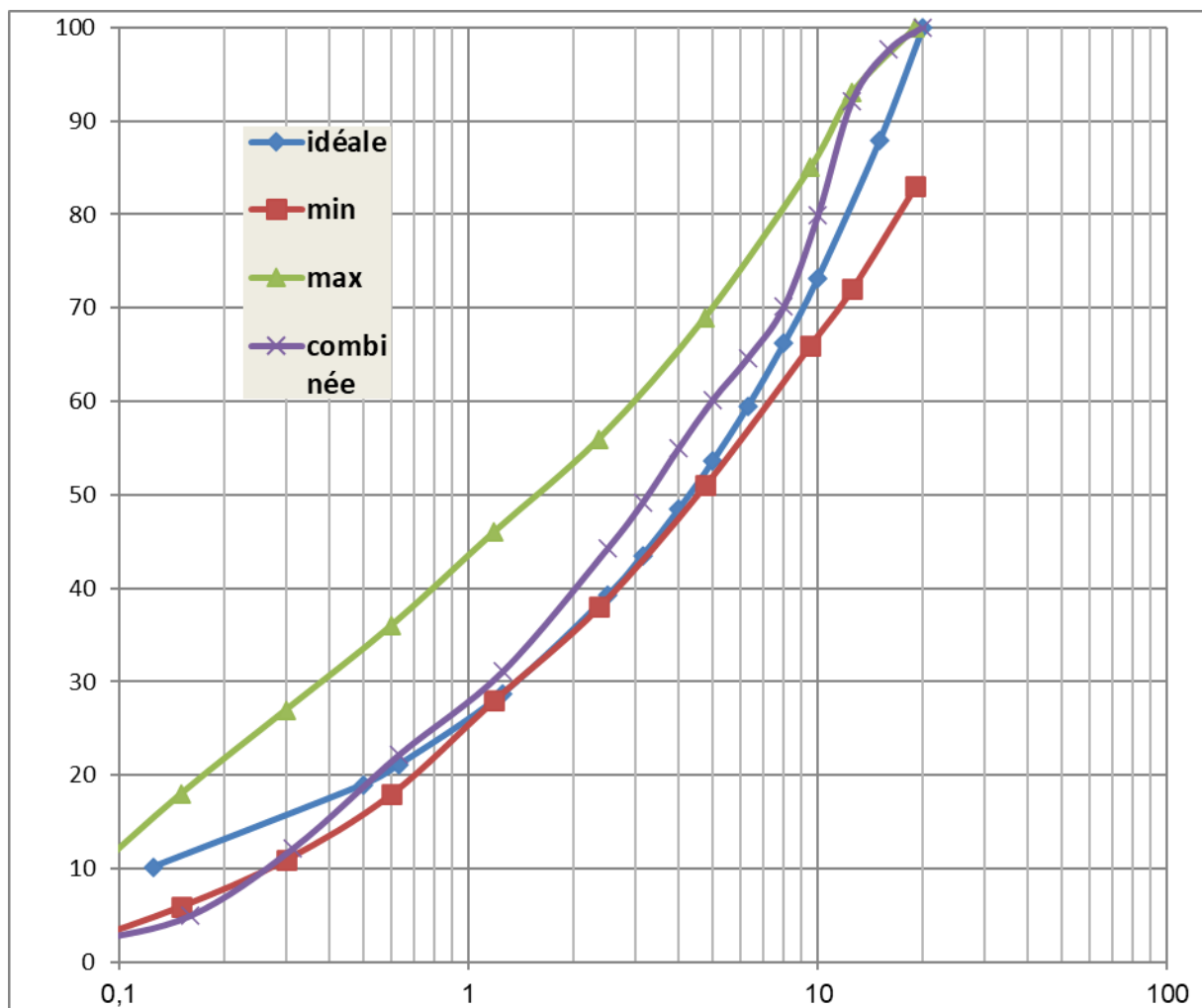


Figure 3. 5 : Courbe combinée des agrégats utilisés par rapport au fuseau proposé par Piggot d'après (J. Marchand 1997)

Nous avons calculé les pourcentages des différentes fractions de granulat à l'aide du fuseau granulair correspondant au mélange, comme indiqué sur la figure .3.7

Tableau 3. 14 : Pourcentage des granulats.

Granulats	Pourcentage
Sable de dune	45%
Sable concassai	5%
Gravier 3/8	15%
Gravier 8/15	35%

3.2 Détermination de la teneur en eau du béton

Le dosage en eau a une importance cruciale dans le béton compacté au rouleau. La détermination de cette valeur est basée sur le principe de la géotechnique, en effet, la relation entre la densité sèche et la teneur en eau suivant le mode opératoire de l'essai Proctor

modifier est nécessaire pour connaître la quantité d'eau adéquate pour avoir un béton qui présente des propriétés voulues ; c'est-à-dire une densité maximale avec une quantité d'eau minimale et une maniabilité convenable pour un BCR routier.

Les éprouvettes ont été préparées suivant le mode opératoire de la norme (ASTM-D1557-07 2007). Pour chacun des dosages en ciment (11, 12, 13 et 14 %), la densité du BCR est mesurée à différentes teneurs en eau (4, 5, 6 et 7 %), puis la courbe de variation des densités en fonction de la teneur en eau est tracée (Figure III.5).

La densité sèche du BCR ($\gamma_{d\gamma\omega}$) est calculée par la formule suivante ;

Avec :

(γ_h/γ_ω) : la densité humide ;

ω : la teneur en eau.

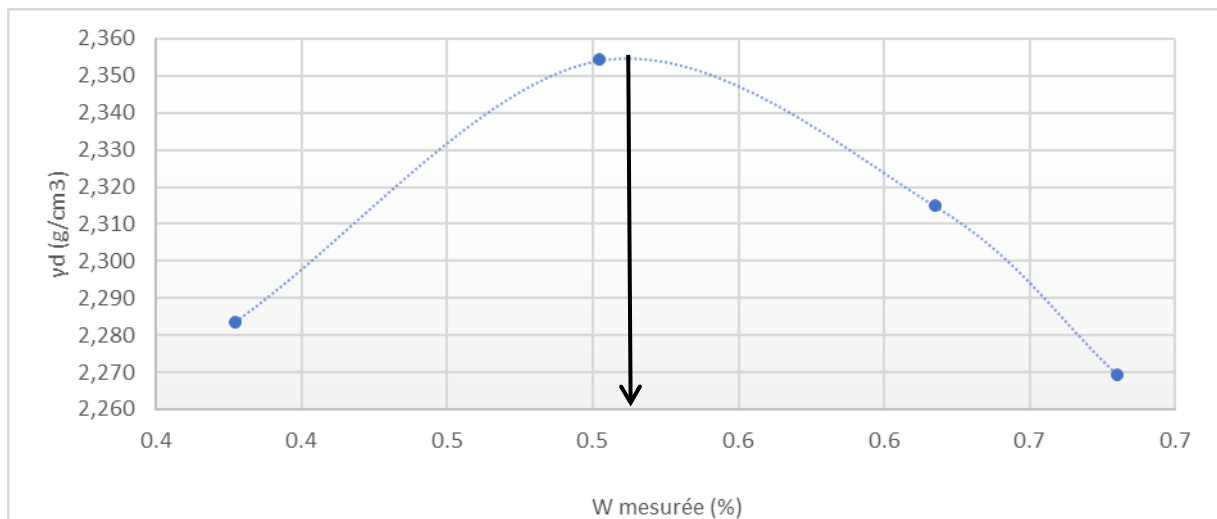


Figure 3. 6 : La teneur en eau par rapport à la masse volumique sèche du béton.

3.3 Détermination de la teneur en ciment du mélange

Cette partie va nous permettre de choisir la quantité de ciment pour notre étude. Habituellement, cette étape prend en compte plusieurs facteurs pour confectionner un BCR sur chantier ; en effet, le côté économique doit être pris en considération sans influencer les propriétés mécaniques. Selon le rapport ACI325 (ACI Comimittee 2001), une résistance finale à la compression de 27 MPa est nécessaire pour une route en BCR. Cependant, cette valeur n'est qu'à titre indicatif, car la détermination de l'épaisseur d'une route en BCR est basée sur les caractéristiques de chargement (intensité du trafic), les caractéristiques du sol (portance) et les propriétés mécaniques du BCR (Gauthier P. 2000). Dans notre étude, la

résistance voulue doit être comprise entre 27 et 30 MPa à 7 jours. La figure III.6 montre qu'avec 14 % de ciment, la résistance obtenue est de l'ordre de 29 MPa à 7 jours.

Tableau 3. 15 : Les différentes proportions de mélange.

Constituants (kg/m ³)					
Gravier		Sable		Ciment	Eau
3/8	8/16	Sable de dune	Sable concassé		
394,5	910	125,5	1215	370,300	154,383

Tableau 3. 16: Les différentes proportions de mélange avec la substitution en caoutchouc.

	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Sable de dune	Sable concassé	Ciment	Eau	Caoutchouc
Témoin	394.5	910	125.5	1215	370.0	154	0
10%	394.5	910	121	1089	370.0	154	46.88
20%	394.5	910	116.5	963	370.0	154	93.76
30%	394.5	910	112	711	370.0	154	140.64

4. Les essais :

4.1 La masse volumique a l'état frais

La masse volumique a l'état frais est calculé juste après le coulage. En effet, le moule vide est pesé et noté M_1 avant la mise en œuvre du béton. En second lieu, le moule rempli avec du béton est pesé et noté M_2 . Finalement la différence entre M_1 et M_2 et divisé sur le volume de l'éprouvette.



Figure 3. 7 : mesure de la masse volumique.

4.2 Résistance à la compression (NF P18-411)

La résistance à la compression est un terme utilisé pour décrire la capacité d'un matériau à résister à la compression (NF P18-411) Pendant longtemps, la résistance a été considérée comme la qualité la plus importante, sinon la plus importante, à rechercher dans un béton. La résistance à la compression est l'une des qualités les plus typiques du BCR. En effet, la capacité du BCR à supporter des charges lourdes et concentrées est due à sa haute résistance à la compression. Un BCR correctement formé peut avoir une résistance à la compression de 40 à 60 MPa après 28 jours. Cette expérience a été réalisée sur des éprouvettes cubiques (1010 10 cm).

Le but de l'expérience était de casser entre les plateaux d'une presse hydraulique d'une capacité de 3000KN, à une vitesse constante de 0.25KN /S, un ensemble d'éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm. Pour éviter l'apparition de moments dus à l'excentricité de la charge de compression, ils doivent être bien centrés entre les plateaux.



Figure 3. 8 : Presse hydraulique.

On calcule la résistance à la compression par la relation :

$$R_c = F/S$$

R_c: résistance à la compression (MPa).

F : la charge de rupture (N).

S : section de l'éprouvette (mm²).

4.3 Résistance à la flexion :

Ce test a été effectué conformément à la norme EN 12390-5, qui spécifie un test de résistance à la flexion en quatre points. Cette expérience a été réalisée à l'aide d'une éprouvette prismatique BCR. Les prismes mesuraient 280 mm de long, 70 mm de haut et 70 mm de large. L'essai de résistance à la flexion a été réalisé sur tous les mélanges de BCR. L'essai a été réalisé à 7, 14 et 28 jours. La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante

$$f_{cf} = F \cdot l / d_1 \cdot d_2^2$$



Figure 3. 9: flexion 3 point.

F_{cf} : est la résistance en flexion, en mégapascals (newtons par millimètre carré) ;

F : est la charge maximale, en newtons ;

L : est l'écartement entre les rouleaux d'appui, en millimètres ;

d_1 et d_2 : sont les dimensions latérales de l'éprouvette, en millimètres.

4.4 Ultrason :

L'ultrason est la mesure de la vitesse à laquelle les impulsions ultrasonores se propagent dans une matrice de béton sans causer de dommages irréversibles. Cette méthode non destructive peut être utilisée pour évaluer la qualité du béton.

L'idée de base de cette méthode est d'utiliser un générateur et un récepteur pour mesurer le temps nécessaire à une onde ultrasonore pour se propager à travers le béton. Les expériences peuvent être réalisées en laboratoire ou en situation réelle.

4.5 Essai d'absorption totale [NA EN 1097]

Cette norme a pour objet d'exposer la technique pour mesurer le coefficient d'absorption d'eau des éprouvettes de bétons et de mortiers (à base de ciment et de géopolymère).

4.5.1 Préparation des carottes de béton

Les éprouvettes utilisées pour cet essai sont des éprouvettes de mortiers cubiques (2.5*2.5*2.5 cm).

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105°C jusqu'à une masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesées effectuées à une heure d'intervalle est au plus égal à 1/1000 (généralement, il suffit de 15 heures à l'étuve pour éteindre cette masse).

4.5.2 Mode opératoire

On note la masse M_1 (en gramme) de chaque éprouvette sèche.

- Au temps t_0 , on place les éprouvettes dans l'eau potable jusqu'à immersion totale.
- À $[t+24$ heures], les éprouvettes sont sorties de l'eau, rapidement essuyée à l'aide d'un chiffon ou d'une peau de chamois humide, puis pesées, soit M_2 la masse (en grammes) de chaque éprouvette saturée d'eau à la pression atmosphérique.

4.5.3 Expression des résultats

L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est $M_2 - M_1$.

Alors le taux d'absorption sera calculé à partir cette formule :

$$A (\%) = (M_2 - M_1) / M_1$$

A : taux d'absorption.

M₁ : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M₂ : masse d'éprouvette saturée d'eau.

CHAPITRE IV

1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, on a présenté les résultats et leurs interprétations effectués au cours de cette étude. On a commencé notre chapitre par le comportement des BCR à l'état frais (masse volumique à l'état frais) et le comportement à l'état durci (compression, flexion et ultrason). En second lieu, on a détaillé les résultats obtenus après le traitement du caoutchouc par le laitier.

2. L'influence du caoutchouc sur les BCR

2.1 Masse volumique à l'état durci

La masse volumique à l'état durci a été effectuée sur des éprouvettes de 10*10*10 cm. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau et figure ci-dessous.

Tableau 4. 1 : La masse volumique des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.

	7 JOURS	14 JOURS	28 JOURS
Témoin	2358,99333	2363,37	2366,95333
10% NT	2345,56333	2351,15	2347,78333
20% NT	2238,93667	2244,01	2245,79333
30% NT	2103,58333	2108,38	2142,32333

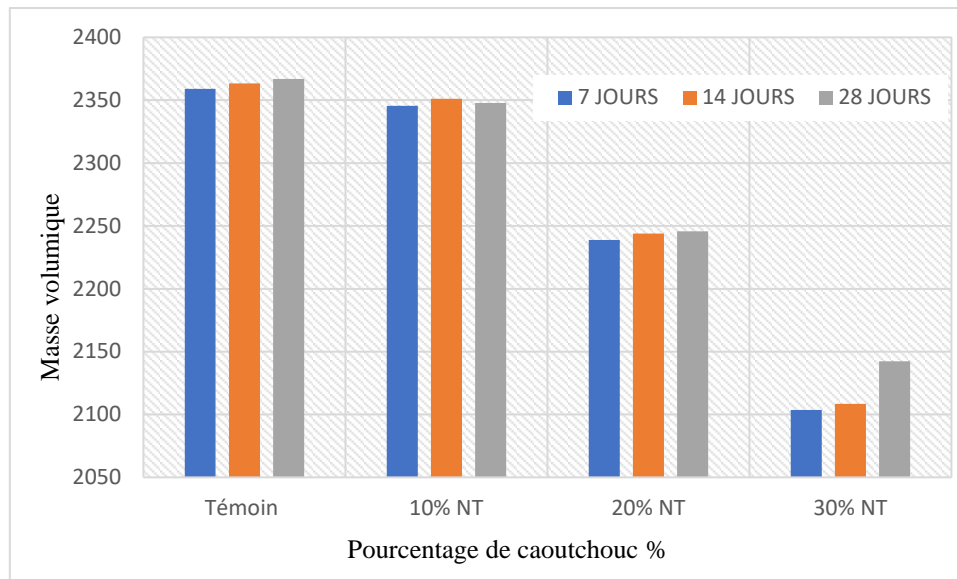


Figure 4. 1 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR.

D'après les résultats ci-dessus, on peut remarquer que le caoutchouc a eu un effet significatif sur la masse volumique du BCR. Cela est dû principalement à la faible masse volumique du caoutchouc (0.91) par rapport à celle du sable (2.5 pour le sable de dune et 2.61 pour le sable concassé).

2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes de 10*10*10 cm au niveau du laboratoire de génie civil BORD BOU ARRERIDJ. Le tableau Et la figure ... présente les résultats obtenus.

Tableau 4. 2 : Résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.

Résistances	7 jours	14 jours	28 jours
Témoin	28,54	39,57	43,89
10%NT	21,16	29,29	34,24
20%NT	11,02	13,41	17,044
30%NT	6,23	6,93	7,81

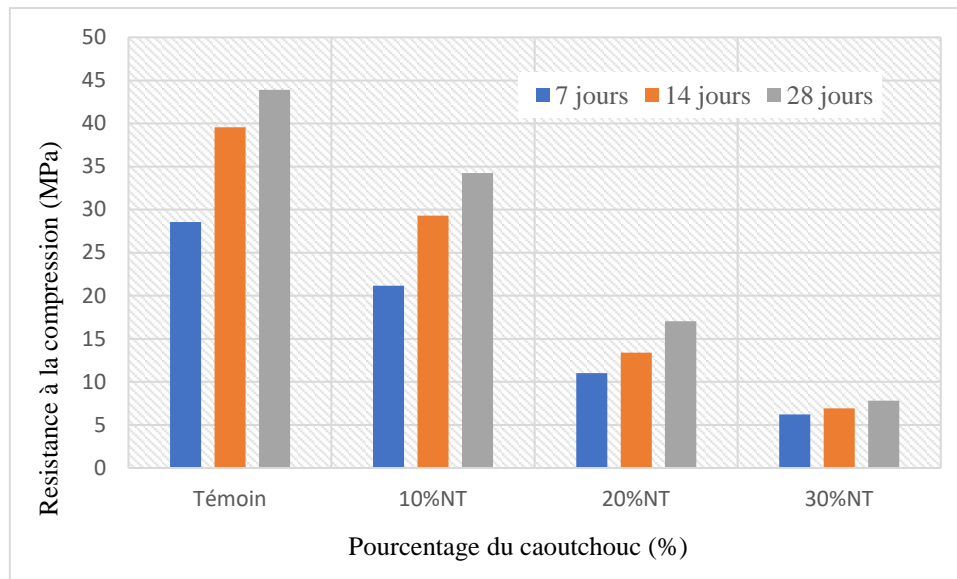


Figure 4. 2 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours.

On peut constater clairement que la résistance à la compression a diminué avec l'augmentation du pourcentage du caoutchouc.

2.3 Résistance à la flexion

Tableau 4. 3 : Résistance à la flexion à 7, 14 et 28 jours des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.

Résistance	7 jours	14 jours	28 jours
Témoin	4,795	6,8035	7,105
10%NT	5,141	5,989	6,6815
20%NT	3,499	4,7045	4,982
30%NT	3,388	3,678	4,549

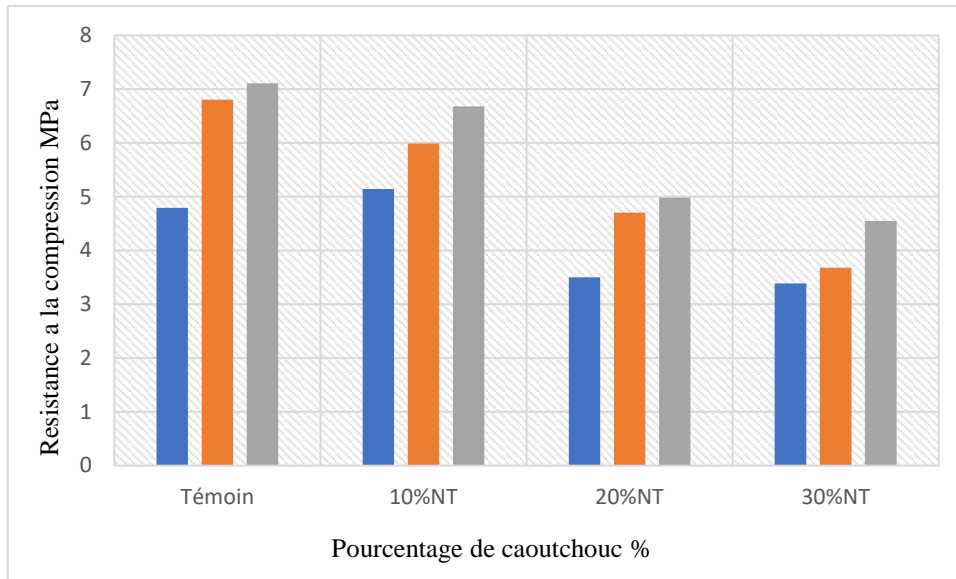


Figure 4. 3 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.

On peut constater clairement que la résistance à la flexion a diminué avec l'augmentation du pourcentage du caoutchouc.

2.4 Ultrason

Tableau 4. 4 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

	7 jours	14 jours	28 jours
Témoin	4750,59	4514,67	4604,76
10% NT	4447,74	4369,99	4198,74
20% NT	4018,75	4115,27	3978,78
30% NT	3701,49	3701,42	3750

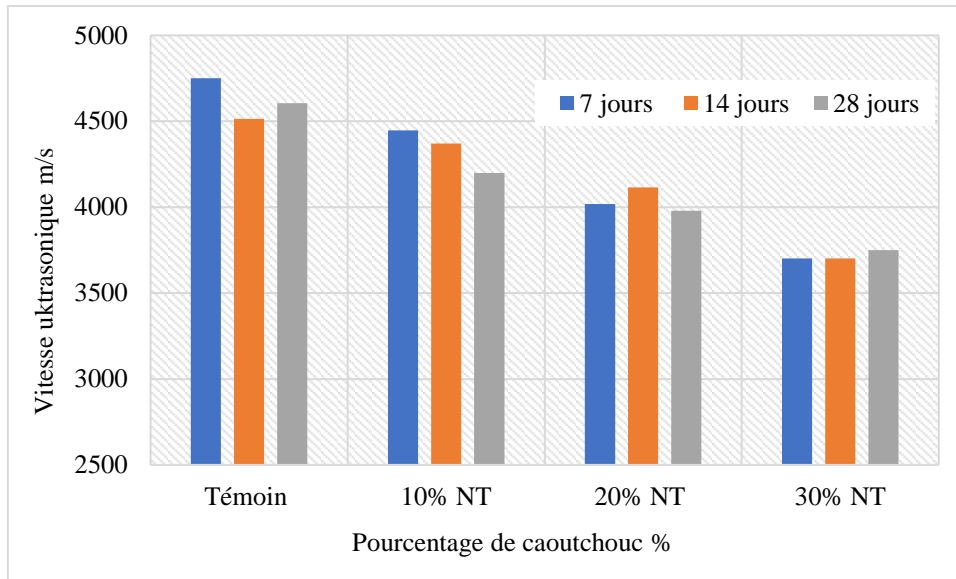


Figure 4. 4 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

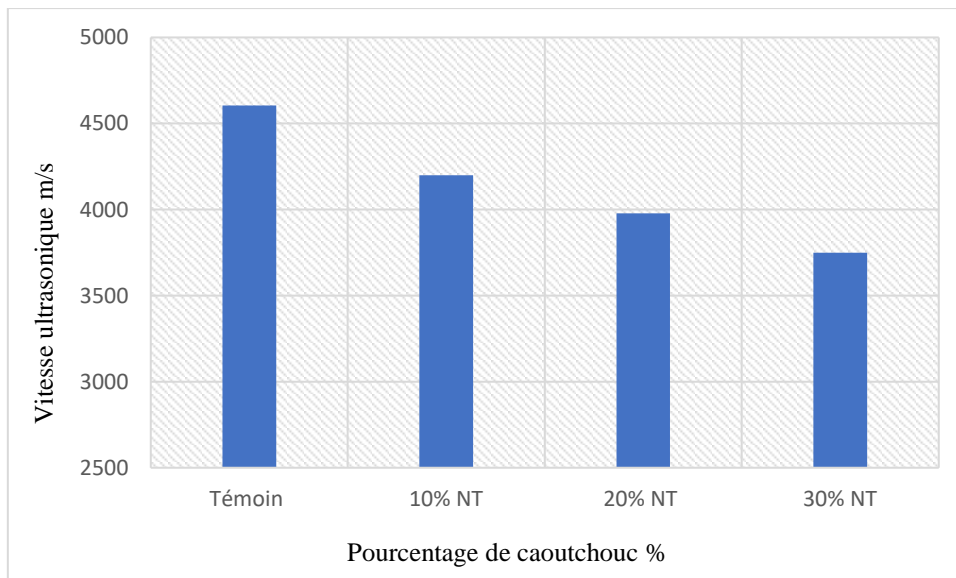


Figure 4. 5 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 28 jours.

Les résultats représentés sur les figures ci-dessus montrent que l'incorporation du caoutchouc a eu un effet négatif sur la vitesse ultrasonique. En effet, la vitesse diminue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. Cela peut être dû par la création d'une porosité supplémentaire causé par le caoutchouc.

2.5 L'absorption totale

Les résultats de l'absorption totale sont résumés dans la figure 4.6. On remarque, d'après les résultats obtenus, que l'augmentation du pourcentage du caoutchouc influe sur l'absorption du béton.

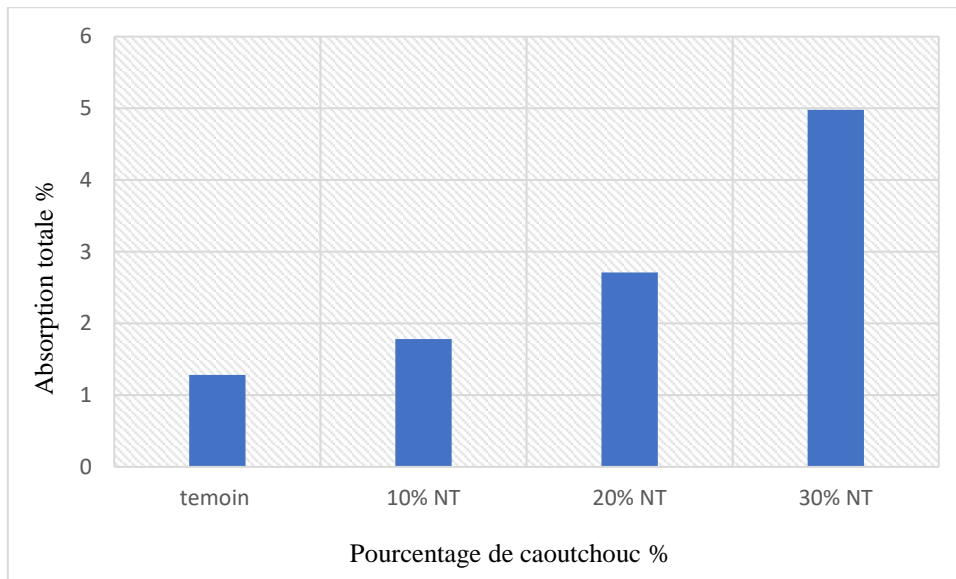


Figure 4. 6 : Absorption totale des bétons par rapport aux pourcentages de caoutchouc.

3. L'influence du traitement du caoutchouc sur les propriétés des BCR :

3.1 Masse volumique à l'état durci

Les résultats de la masse volume a l'état durci sont regroupé dans le tableau 4.5 et la figure 4.7.

Tableau 4. 5 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

	7 JOURS	14 JOURS	28 JOURS
Témoin	2358,99	2363,37	2366,95
10% NT	2345,56	2351,15	2347,78
20% NT	2238,93	2244,01	2245,79
30% NT	2103,58	2108,38	2142,32
10% T	2322,99	2328,48	2331,22
20% T	2294,43	2300,87	2309,84
30% T	2216,22667	2222,77667	2233

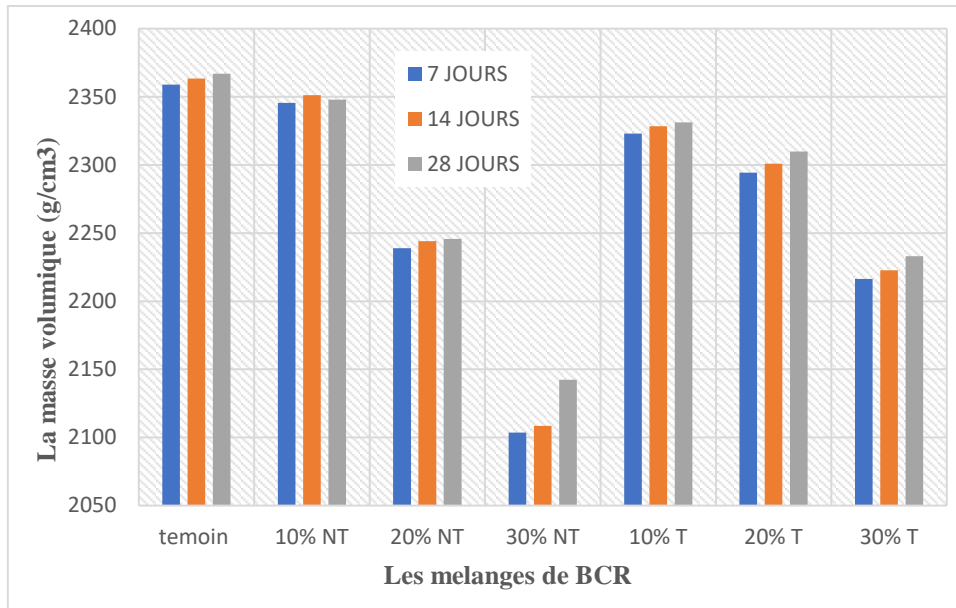


Figure 4. 7 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

On peut voir clairement que les échantillons avec du caoutchouc traité présente une meilleure masse volumique par rapport au mélange avec du caoutchouc non traité.

3.2 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des différents mélanges sont montrés dans le tableau 4.6 et la figure 4.8.

Tableau 4. 6 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours.

Résistances	7 jours	14 jours	28 jours
Témoin	28,547	39,57	43,89
10%NT	21,1575	29,294	34,2355
20%NT	11,022	13,4103333	17,044
30%NT	6,2305	6,9275	7,81166667
10%CT	25,833	29,9936667	35,258
20%CT	15,3556667	18,889	25,567
30%CT	8,31733333	14,0285	15,867

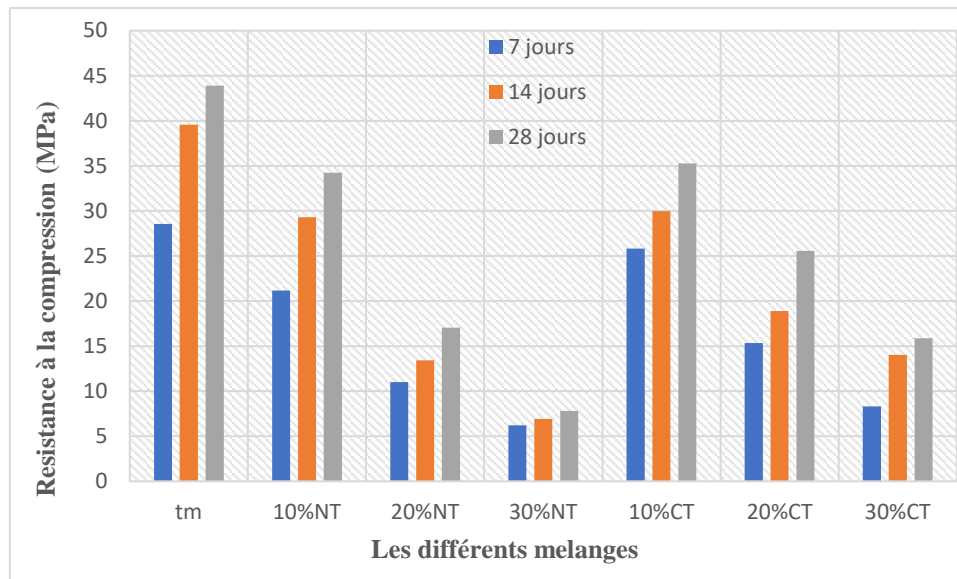


Figure 4. 8 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours. On constate, d'après la figure 4.8, que les mélanges avec du caoutchouc traité avec du laitier présente une meilleure résistance à la compression. On note une augmentation de plus de 100 % pour le mélange avec 30% de caoutchouc à 28 jours. Cette amélioration peut être expliquée par l'effet pouzzolanique du laitier sur l'adhérence du caoutchouc avec la matrice cimentaire.

3.3 Résistance à la flexion

D'après les résultats représentés ci-dessous, on remarque que le traitement du caoutchouc par le laitier a eu un effet négatif à 7 et 14 jours.

Tableau 4. 7 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.

Résistance	7 jours	14 jours	28 jours
Témoin	4,795	6,8035	7,105
10%NT	5,141	5,989	6,6815
20%NT	3,499	4,7045	4,982
30%NT	3,388	3,678	4,549
10%CT	4,889	5,076	5,856
20%CT	4,206	4,6095	5,057
30%CT	3,0275	3,388	4,306

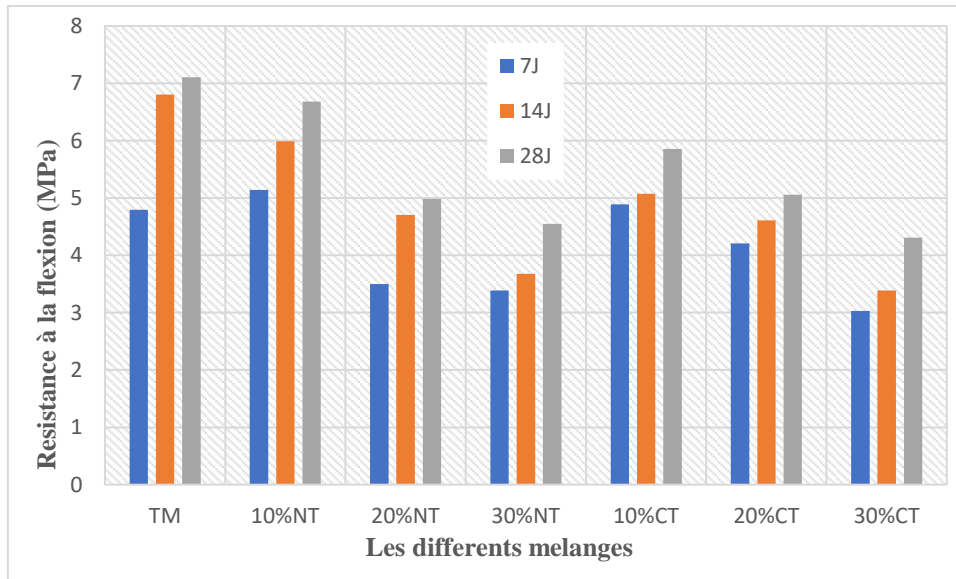


Figure 4. 9 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.

3.4 Ultrason

Tableau 4. 8 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

	7 jours	14 jours	28 jours
Témoin	4750,59	4514,67	4604,76
10% NT	4447,74	4369,99	4198,74
20% NT	4018,75	4115,27	3978,78
30% NT	3701,49	3701,42	3750
10% CT	4507,89	4258,34	4436,56
20% CT	4207,57	3966,15	4255,32
30% CT	4187,02	4024,14	3937,01

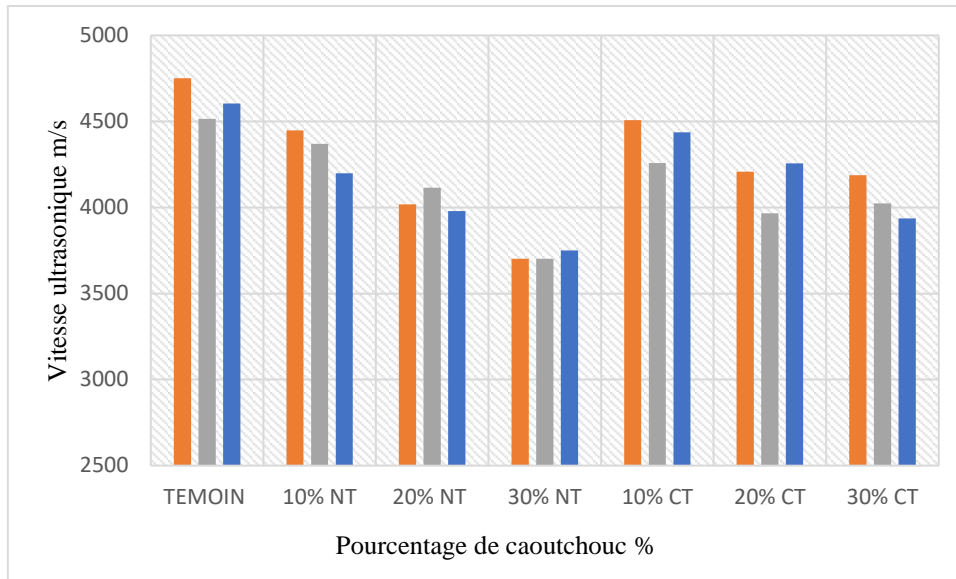


Figure 4. 10 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

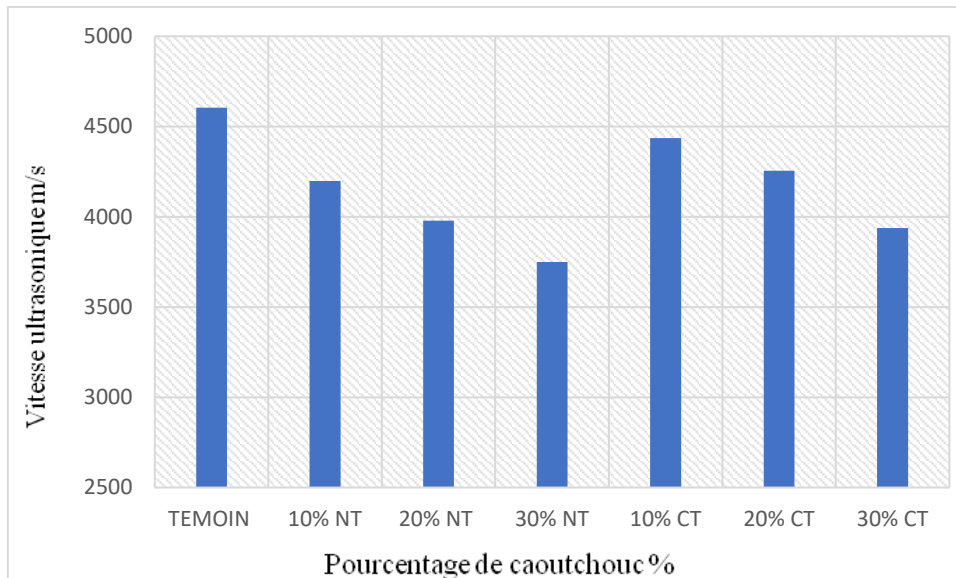


Figure 4. 11 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 28 jours.

Les ondes ultrasonores qui se propagent dans le béton subissent une divergence géométrique due à la morphologie microstructurale des bétons ainsi qu'aux différents constituants (granulats, matrice cimentaire et dans notre cas les poudrettes de caoutchouc). La figure 4.10 montre les valeurs de la vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage de caoutchouc. Une réduction proportionnelle à l'ajout de caoutchouc a été observée. Cette diminution est due principalement à la faible connectivité sonore des poudrettes de caoutchouc qui empêche la propagation des ondes dans le béton.

3.5 L'absorption capillaire

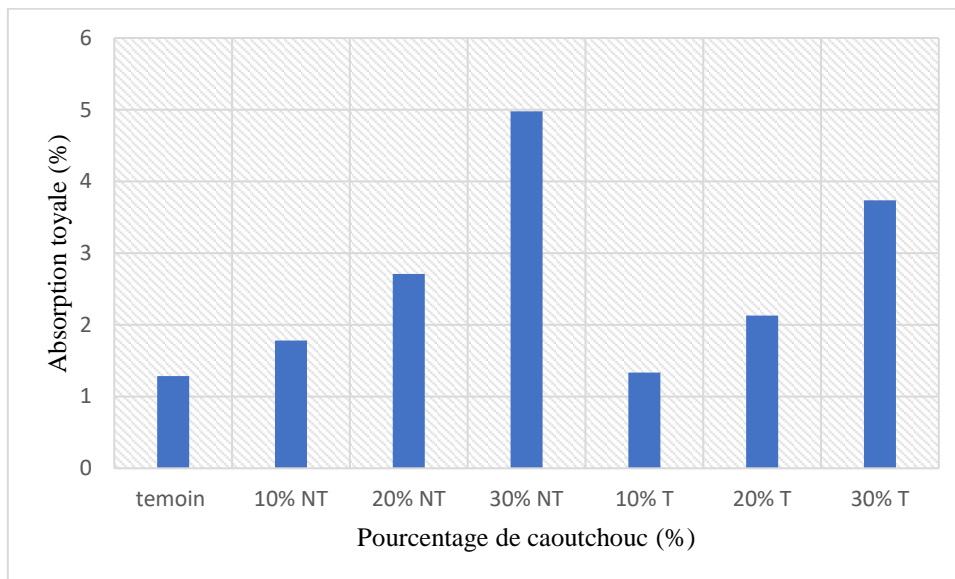


Figure 4. 12 : Absorption totale des différents bétons avec du caoutchouc traité et non traité.

On remarque d'après la figure 4.12 que l'absorption capillaire augmente avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. On peut aussi noter que les mélanges avec du caoutchouc traité avec du laitier présente une meilleure absorption par rapport aux mélanges avec du caoutchouc non traité.

CONCLUSION GENERALE

Le béton compacté au rouleau représente de nos jours une technique très appréciée par les entrepreneurs et les décideurs. En effet, ces nombreux avantages font de lui un matériau très durable et très facile à mettre en place. Sa confection et sa mise en place sont très faciles et très rapide.

Actuellement, autour du monde, Le pneumatique usagé représente un déchet très encombrant et très nocif pour l'environnement. En effet, l'accumulation de ce type de déchets augmente chaque jour et son effet nocif s'agrandit de jours en jours. La valorisation de ce matériau devient donc un sujet très urgent à traiter. Dans le domaine de la construction, l'ajout du caoutchouc a été étudié par plusieurs chercheurs. Cependant, ces études antérieures se sont basées sur la substitution du gravier par le caoutchouc.

Dans la présente étude, on a confectionné un béton compacté au rouleau avec des poudrettes de caoutchouc en substitution du sable. On a aussi étudié l'effet du traitement du caoutchouc par une nouvelle méthode en utilisant du laitier afin d'améliorer l'adhérence du caoutchouc vis-à-vis de la matrice cimentaire.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer plusieurs conclusions telles que :

- ✓ La masse volumique des BCR a diminué avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.
- ✓ La résistance à la compression a diminué avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.
- ✓ La résistance à la flexion a diminué avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.
- ✓ La vitesse ultrasonique a diminué avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.
- ✓ Le traitement du caoutchouc par du laitier a donné des résultats meilleurs par rapport au caoutchouc non traité.

L'utilisation du caoutchouc comme substitut de sable peut être considérée à l'avenir. Cependant, les performances mécaniques vont diminuer surtout pour des pourcentages avancés de caoutchouc.

L'utilisation du laitier comme matériau de traitement a donné des résultats satisfaisants. Cela est très encourageant pour une possible utilisation comme produit de traitement et d'amélioration de l'adhérence.

Références

ADEME, agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, <http://www2.ademe.fr/>, consulté le 25 mai 2022.

ADEME, L'agence nationale de développement de la petite et moyenne entreprise . Rapport de l'industrie du plastique et du caoutchouc. <http://www.andpme.org.dz/>, consulté le 11/05/2022.

AMAR benazzouk, Omar douzane , (effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de), laboratoire des technologies innovantes (EA3899) , Université de Picardie Jules Verne.

Disponible sur :www.directindustry.fr (consulté en 2022).

GARGOURI A , YAICH Sami , BOULILA a et MAKNI M (valorisation des pneus usagés non réutilisables dans le béton) : colloque (sols et matériaux a problème) 9-11 février 2007 _ Tunisie pp 315-322.

GRANJUJ.L' CHAUSSON H, (serviceability or fiber - reinforcedthinoverlays : relation between cracking and de bonding) proceeding of the conches international exhibition and conférence , Bruxelles , novembre 1995 (Verlag, 1995) pp 133-142.

HABIB trouzinea ,b, AISSA ASROUNA ,FARID BEL ABDELOUAHABE , Nguyen than long ,problématique des pneumatiques usages enAlgérie revue (nature et technologies) .n 05/06/2011.

Health protection agency (Royame_uni) , chemical Hazard and poisons report 8 (2003) (,UK_ chemical Hazard report ,).

MEDDAH et Al ., (effet de l'incorporation des des granulats de caoutchouc sur la réponse mécaniques d'un béton compacté au rouleau). Guelma, Algérie 2012.

MOUSSAI BOUBAKER. SEGHIRI MOHAMED.(béton compact avec des ajouts granulats caoutchoucs) mémoire de fin d'études . Université de m'sila , juin 2009.

TROUZINE H., AsrounA ., Long N. T ., (pneus usés et sols gonflable) Actes orgagec 08 organicmaterls for construction . Technologie and environnement performances .Paris , le 27 , 28 et 29 août 2008.

BaCaRa, P. N. (1996). "Le béton compacté au rouleau." Presse ENPC, Paris : 17-25.

Forbes, B. B. a. B. A. (2007). A High RCC Dam with Low Grade Aggregates. 5th International Symposium on RCC Dams.

disponible sur :http://fr.wikipedia.org/wiki/caoutchouc_%28mat%C3%A9riau%29(consulté en 2022).