

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

- **KHABABA Mohamed Assil.**
- **ALOUACHE Achraf.**

*Intitulé*

**Comportement physico-mécanique des BCR contenant du caoutchouc traité avec de la fumée de silice : Analyse expérimentale.**

*Soutenu le : Juin 2022*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<b>M. BECHICHE Said</b>	<b>MAB</b>	<b>Président</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M. BENOUADAH Abdelatif</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M. BELKADI AHMED ABDERAOUF</b>	<b>MCA</b>	<b>Co- Encadreur</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M. NOUI Ammar</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M. KESSAL Oussama</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Univ-BBA</b>

*Année Universitaire 2021/2022*

# Remerciement

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr **Abdelatif Benouada**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent à Mr **Ahmed Abderraouf Belkadi** Je le remercie aussi pour sa disponibilité, ses conseils précieux et constants, sa confiance et ses encouragements.*

*Notre remerciement s'adresse également à Mr **Benammar Abdelhafid** et Mr **Oussama KESSAL** pour l'aide pratique, le soutien moral et leurs encouragements.-*

*Nous tenons à remercier sincèrement Les ingénieurs de laboratoire génie civil, nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

*Enfin, on n'oserait oublier de remercier nos chers parents, et nos amis pour leur soutien moral.*

## Table des matières

Résumé .....	1
ملخص.....	2
Abstract.....	3
Introduction générale.....	4

### CHAPITRE I : revue bibliographique sur le BCR

1. Définition du BCR.....	5
2. Historique.....	7
3. Les Constituants Du BCR.....	8
3.1 Liant.....	8
3.2 Granulats.....	8
3.3 L'eau :.....	9
3.4 Les Adjuvants :.....	9
4. Applications Des BCR.....	10
4.1 Le BCR En Corps Des Barrages.....	10
4.2 Le BCR En Technique Routière.....	10
5. Avantages Du BCR :.....	10
6. Les Inconvénients Du BCR :.....	10
7. Formulation De BCR :.....	11
7.1 Méthode théorique :.....	11
7.2 Méthode semi-empirique ;.....	11
7.3 Méthode empirique :.....	12
7.3.1 Méthode de formulation respectant les limites de maniabilité.....	12
7.3.2 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique.....	13
8. Propriétés Du BCR :.....	15
8.1 A l'état frais :.....	15
8.2 A l'état durci :.....	15
9. Conclusion.....	16

### CHAPITRE II : Les déchets pneumatiques.

1. Introduction.....	17
2. L'origine de caoutchouc :.....	17
3. Principales zones de production du latex :.....	18
4. Historique et utilisation du caoutchouc :.....	18
4.1 Utilisation :.....	18
4.2 Historique :.....	18

5.	Valorisation des déchets de caoutchouc : .....	20
5.1	Classification des déchets :.....	20
5.2	Origines des déchets de caoutchouc : .....	21
6.	Les pneumatiques usagés :.....	21
6.1	Les pneumatiques usagés réutilisables (PUR).....	21
6.2	Les pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR).....	21
7.	Caractéristiques physiques et chimique des pneus .....	22
8.	Effet des déchets pneumatiques sur l'environnement :.....	23
9.	Propriétés de caoutchouc : .....	25
10.	Valorisation et domaine d'application des pneumatiques :.....	27
11.	Recyclage de caoutchouc .....	28
11.1	Valorisation originale des pneus usagés .....	28
12.	L'intérêt de poudrette de caoutchouc :.....	30
13.	Propriétés physico-mécaniques des bétons de déchets de caoutchouc : .....	31
13.1	Béton de déchets de caoutchouc :.....	31
13.1.1	Définition du béton de déchets de caoutchouc :.....	31
14.	Méthode de traitement du GC : .....	34

### **CHAPITRE III : matériaux, formulation et essais.**

1.	Introduction.....	36
2.	Matériaux utilisés.....	36
2.1	Gravier .....	36
2.1.1	Analyse granulométrique du gravier .....	36
2.2	Sable .....	39
2.2.1	Sable de dune .....	39
2.2.2	Sable concassé.....	39
2.3	Les poudrettes de caoutchouc.....	42
2.4	Liant.....	43
2.5	L'eau .....	44
2.6	Le caoutchouc (la poudrette de caoutchouc) .....	44
3.	Formulation du BCR.....	45
3.1	Paramètre de formulation .....	45
3.2	Pourcentage des granulats .....	47
3.3	Eau .....	48
3.4	Ciment .....	48
4.	Méthode de traitement du caoutchouc :.....	50

5. Coulage des éprouvettes : .....	51
------------------------------------	----

#### **CHAPITRE IV : Résultats et discussions.**

1. Introduction.....	53
2. L'influence du caoutchouc sur les BCR .....	53
2.1 Masse volumique à l'état durci.....	53
2.2 Résistance à la compression .....	54
2.3 Résistance 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 Résistance à la compression .....	59
3.3 Résistance à la flexion .....	60
3.4 Ultrason .....	61
3.5 L'absorption capillaire.....	63

## Liste des figures :

Figure 1. 1 : mise en place d'un BCR routier .....	6
Figure 1. 2 : barrage soubelle dans la commune de magra.....	6
Figure 1. 3 : : Paramètres optimums d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).....	13
Figure 1. 4 : : Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997). ....	14
Figure 1. 5 : Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).....	14
Figure 2. 1 : l'arbre tropical Hévéa (Arbre à caoutchouc).....	18
Figure 2. 2 : Les différents composants d'un pneu.....	23
Figure 2. 3: l'incendie d'Hager-ville (CANADA) .....	24
Figure 2. 4 : Les risque de feu dans les décharges des pneus usagés. ....	24
Figure 2. 5 : Incendie sur le site de stockage des pneus usagés Seniorforums,com. ....	25
Figure 2. 6 Différentes sollicitations mécaniquesdreamstime,com/photo-stock. ....	26
Figure 2. 7 : la production du caoutchouc en millions de tonnes G.Petit et al 2008. ....	27
Figure 2. 8 : Exemple d'intégration de poudrette dans l'asphalte Kurt Reschner .....	28
Figure 2. 9 : La préparation d'un chantier pneusol ( France 2019 ).....	29
Figure 2. 10 : Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recyclés. ....	30
Figure 2. 11 : les différentes formes disponibles.....	30
Figure 2. 12 : Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement.....	32
Figure 2. 13 : L'influence des GCR sur la masse volumique du béton.....	33
Figure 2. 14 : L'influence des GCR sur le retrait des mortiers de ciment. ....	33
Figure 2. 15 : Observations au MEB de la microstructure de mortier témoin (à gauche) et le mortier de caoutchouc (à droite) MGCR9 et mise en évidence de la zone d'interface. ....	34
Figure 3. 1 : Courbe granulométrique de gravier 3/8.....	37
Figure 3. 2 : Courbe granulométrique de gravier 8/15.....	38
Figure 3. 3 : Exemple d'une carrière de sable de dune. ....	39
Figure 3. 4 : exemple d'une carrière de sable concassé .....	39
Figure 3. 5 : l'analyse granulométrique d'un sable concassé. ....	42
Figure 3. 6 : Analyse granulométrique des poudrettes de caoutchouc. ....	43
Figure 3. 7 : Ciment portland CEM I /42.5R.....	43
Figure 3. 8 : Caractéristiques technique du ciment portland CEM I ( biskria).....	44
Figure 3. 9 : Courbe combinée des agrégats utilisés par rapport au fuseau proposé par Piggot d'après (J. Marchand 1997).....	47
Figure 3. 10 : La teneur en eau par rapport à la masse volumique sèche du béton. ....	48
Figure 3. 11 : les résistances obtenues à 7 jours pour les différents dosage de ciment. ....	49
Figure 3. 12 : traitement des poudrettes de caoutchouc par la fumée de silice. ....	51
Figure 3. 13 : des moules 10*10*10 cm. ....	51
Figure 4. 1 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR.....	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.....	63
Figure 4. 12 : Absorption totale des différents bétons avec du caoutchouc traité et non traité.....	63

**Liste des tableaux :**

<i>Tableau 1 1 : Caractéristiques d'un BCR pour barrage et d'un BCR pour chaussée (adapté de Quellet 1998).</i>	5
<i>Tableau 1 2 : distribution granulométriques idéale de granulats grossiers d'après (USACE 2000).</i>	9
<i>Tableau 1 3 : distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après (USACE 2000).</i>	9
<i>Tableau 1 4 : Différence entre un BCR et béton conventionnel.</i>	16
<i>Tableau 2. 1 : Composition chimique d'un pneu de véhicule léger en Europe d'après Ademe 2012.</i>	22
<i>Tableau 2. 2 : Caractéristiques physiques d'un pneu.</i>	22
<i>Tableau 3. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers utilisés.</i>	36
<i>Tableau 3. 2 : L'analyse granulométrique du gravier (3/8).</i>	37
<i>Tableau 3. 3 : L'analyse granulométrique du gravier (8/15).</i>	38
<i>Tableau 3. 4 : Caractéristiques physiques des deux sables utilisés.</i>	40
<i>Tableau 3. 5 : l'analyse granulométrique d'un sable de dune.</i>	40
<i>Tableau 3. 6 l'analyse granulométrique d'un sable concassé.</i>	41
<i>Tableau 3. 7 : Caractéristiques physiques des poudrettes de caoutchouc.</i>	45
<i>Tableau 3. 8 : Tamisât des différentes fractions d'agrégats.</i>	46
<i>Tableau 3. 9 : pourcentage des granulats.</i>	47
<i>Tableau 3. 10 : les composants du BCR pour 1m<sup>3</sup>.</i>	50
<i>Tableau 3. 11 : Les différentes proportions de mélange avec la substitution en caoutchouc.</i>	50
<i>Tableau 4. 1 : La masse volumique des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.</i>	53
<i>Tableau 4. 2 : Résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.</i>	54
<i>Tableau 4. 3 : Résistance à la flexion à 7, 14 et 28 jours des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.</i>	55
<i>Tableau 4. 4 : Vitesse ultrasonique à 7, 14 et 28 jours par rapport du pourcentage de caoutchouc ajouté.</i>	56
<i>Tableau 4. 5 : L'effet de l'ajout du caoutchouc sur la masse volumique des BCR à 7, 14 et 28 jours.</i>	58
<i>Tableau 4. 6 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours.</i>	59
<i>Tableau 4. 7 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.</i>	60
<i>Tableau 4. 8 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.</i>	62

## Résumé

La présente étude comporte sur l'incorporation des poudrettes de caoutchouc (considéré comme déchets) dans le béton compacté au rouleau. En effet, ce déchet très connu dans le monde représente un défi pour son recyclage et sa valorisation. Plusieurs recherches ont incorporé le pneumatique comme substitution du gravier. Dans ce travail, on a utilisé des poudrettes de caoutchouc (dimensions inférieure à 5 mm) comme substitution du sable. Le traitement du caoutchouc par la fumée de silice a aussi été entrepris.

Les résultats obtenus montrent une diminution des caractéristiques physiques et mécaniques proportionnelle au pourcentage de caoutchouc substitué. Cependant, cette diminution n'est pas flagrante surtout pour les mélanges contenant 10% de caoutchouc.

Pour les mélanges avec du caoutchouc traité avec de la fumée de silice, on remarque une augmentation par rapport aux mélanges avec du caoutchouc non traité. Les résultats obtenus nous indiquent qu'il est possible de recycler le caoutchouc en poudrettes (substitution du sable) dans le BCR pour des projets non exigeants.

**Mots clés :** Béton compacté au rouleau, caoutchouc, traitement fumée de silice, résistance à la compression, résistance à la flexion et absorption.



## ملخص

تتضمن هذه الدراسة دمج فتات المطاط (نفايات) وتثمين نفايات المطاط في الخرسانة المدكوكة. في الواقع، تمثل هذه النفايات المعروفة في العالم تحديًا لإعادة تدويرها واستعادتها. أدرجت العديد من الأبحاث لكن كبديل للحصى. في هذا العمل تم استخدام فتات المطاط (أبعاد أقل من 5 مم) كبديل للرمل. كما تم إجراء معالجة المطاط بغبار السيليكا. أضيفت حبيبات المطاط باستبدال جزئي للحجم الكلي للرمل بنسب مختلفة (10%، 20%، 30%). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها انخفاضًا في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية. ومع ذلك، فإن هذا الانخفاض ليس بالكبير، خاصة بالنسبة للخليط الذي يحتوي على 10% مطاط.

بالنسبة للمخاليط مع المطاط المعالج بأبخرة السيليكا، لوحظ زيادة مقارنة بالمخاليط مع المطاط غير المعالج. تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أنه من الممكن إعادة تدوير فتات المطاط (استبدال الرمل) في مشاريع الخرسانة المدكوكة.

كلمات البحث: الخرسانة المضغوطة الأسطوانية، المطاط، العلاج بغبار السيليكا، مقاومة للضغط، مقاومة الانحناء و الامتصاص

## **Abstract**

This study involves the incorporation of rubber crumbs (considered as waste) in roller-compacted concrete. Indeed, this well-known waste in the world represents a challenge for its recycling and recovery. Several researches have incorporated pneumatic tires as a replacement for gravel. In this work, rubber crumbs (dimensions less than 5 mm) were used as a substitute for sand. The treatment of rubber with silica fume has also been studied.

The results obtained show a decrease in the physical and mechanical characteristics proportional to the percentage of substituted rubber. However, this reduction is not obvious, especially for the mixture containing 10% rubber.

For mixtures with rubber treated with silica fume, an increase is noticed compared to mixtures with untreated rubber. The results obtained indicate that it is possible to recycle rubber crumbs (substitution of sand) in the RCC non-demanding projects.

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

## Introduction générale

Le béton compacté au rouleau est un matériau de construction 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 construction 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.

L'utilisation de béton compacté au rouleau devient plus en plus fréquente dans la construction 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.

Le pneu usagé représente de nos jours un déchet très nocif et dangereux pour l'environnement. L'accumulation de ce dernier, au fil du temps, devient très encombrante et son élimination est très compliquée vu le dégagement de fumée engendré. De ce fait, le recyclage et la valorisation de ces pneumatiques en fin de vie devient capitale. Le domaine du génie civil représente une chance unique pour ce débarrasser de ces déchets. En effet, plusieurs chercheurs ont travaillé sur la possibilité de substituer une partie des granulats par les pneus. Cependant, ces recherches se basent principalement sur la substitution du gravier.

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 chapitres ;

- ✓ Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le béton compacté au rouleau.
- ✓ Le second chapitre présente une étude statistique et 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 : revue bibliographique sur le BCR**

## 1. Définition du BCR

Le béton compacté au rouleau est un type de béton qui se distinguent des bétons ordinaires par leur affaissement nul, leur proportion importante de granulats et leur faible quantité de pâte de ciment (varié entre 60 à 300 kg/m<sup>3</sup>), ce type de matériau ayant une apparence très sèche et rapide. La mise en œuvre des BCR nécessite un matériel spécifique comme les finisseurs et les engins de travaux publics à haut pouvoir de compactage comme les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les plaques vibrantes, les bulldozers...

Lorsque le BCR est utilisé pour la réalisation d'ouvrages de masse comme les barrages, la quantité de ciment utilisée est la plus souvent faible et l'utilisation des ajouts minéraux tels que les cendres volantes est conseillée. Ceci permet de réduire le dégagement de chaleur lors des processus d'hydratation du ciment et de limiter de couts de production (marchand et al 1997).

Le BCR peut également être utilisé comme matériau routier. 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 de véhicules) que thermique (cycles de gel-dégel présence de sels fondants) y sont plus importantes (marchand et al 1997), de plus, la teneur en particules fines de diamètre inférieur a 80µm doit être assez élevée afin de faciliter la finition de la surface du béton.

Le tableau 1.1 résume les distinctions principales qui existent entre les deux types de BCR.

*Tableau 1 1 : Caractéristiques d'un BCR pour barrage et d'un BCR pour chaussée (adapté de Quellet 1998).*

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
Teneur en liant (kg/k <sup>3</sup> )	60-250	200-350
Rapport eau/liant	0.40-0.80	0.30-0.40
Résistance à la compression 28j (MPa)	15	45
Temps vebe (s)	10-25	30-60
Diamètre maximal des granulats (mm)	75	20



*Figure 1. 1 : mise en place d'un BCR routier*



*Figure 1. 2 : barrage soubelle dans la commune de magra.*

## 2. Historique

Les revêtements en BCR ne sont pas du tout une nouvelle technique pour la construction des chaussées. Le premier revêtement en béton connu fut construit en 1865 en Écosse, alors que le développement des béton vibrés ne s'initia que cinquante ans plus tard. De cette façon dans beaucoup de bays on compacta au rouleau le revêtement en béton avant et après la première guerre mondiale, durant les années trente, la vibration du béton fut introduite graduellement dans tous les domaines du génie civil parmi eux la construction des revêtements ou le compactage au rouleau fut abandonné puisque les matériels dont on disposait à cette époque n'assurent pas une qualité comparable à celle obtenue par pervibration. Néanmoins on continua à employer le compactage au rouleau pour la construction des couches de base traitées au ciment, les progrès dans ce domaine ont constitué une aide inestimable pour le développement moderne des revêtements en BCR pendant les années soixante-dix. Quand le coût croissant des produits pétroliers éveilla un intérêt renouvelé pour d'autres solutions permettant de réduire leur consommation.

Le béton compacté au rouleau a été pendant de nombreuses années utilisé comme sous-couche pour le revêtement des routes et des pistes d'aviation. Cette technique a été mise en œuvre avec succès sur un certain nombre de barrages dans le monde, dont la plupart à ce jour sont situés au Japon et aux États-Unis.

La première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du nord a été réalisée en 1942 par l'US Army Corps of Engineers.

C'est au Royaume-Uni, durant les années quarante, que le BCR a été utilisé comme couche de base d'épaisseur n'excédant pas les 20 cm, le premier barrage construit en BCR est celui des Alpes Gera en Italie entre 1961-1964.

Les premiers exemples modernes de revêtements en BCR connus furent construits en Espagne vers 1970 sur des voies à faible trafic. Pour leurs applications sous trafics lourds, une aire d'entreposage de billes de bois d'une surface de 52 000 m<sup>2</sup> a été construite sur l'île de Vancouver en Colombie britannique (Canada). Après 1980 au moins dix autres pays ont construit chacun plus de 100 000 m<sup>2</sup> de revêtements en BCR, alors que sept autres ont employé le BCR pour des chaussées expérimentales.

À la fin de l'année 1990, leur surface totale excédait 12 millions m<sup>2</sup> la moitié à peu près ont été construits en Espagne. Environ 1 500 000 m<sup>2</sup> ont été employés sur autoroutes et routes

principales, avec enrobé sur le BCR pour améliorer l'uni les 10 500 000 m<sup>2</sup> restants ont été appliqués sur des routes à faible vitesse.

### **3. Les Constituants Du BCR**

#### **3.1 Liant**

Le choix de type de liant et de son dosage est fonction des résistances requises des critères de durabilité exigés. De manière générale les mélanges de BCR sont formulés avec des teneurs variantes entre 250 à 350 kg/m<sup>3</sup>. La teneur en liant a de grandes influences sur les propriétés des bétons compactés au rouleau. Effectivement lorsque la teneur en liant augmente cela permet de réduire la friction entre les granulats et donc d'améliorer la maniabilité. Cependant, une teneur en ciment trop élevée peut induire des fissures de retrait plus rapprochées en plus d'augmenter significativement les coûts de production sans nécessairement augmenter les résistances mécaniques et prolonger la durée de vie du revêtement (Gauthier & Marchand, 2004).

#### **3.2 Granulats**

Les granulats ont une très grande influence sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci du BCR, puisqu'ils occupent généralement entre 75 et 80 % du volume totale du mélange. A l'état frais, le type et la nature des granulats peuvent influencer la maniabilité, compte tenu de leur teneur en eau et de leur absorption. Les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression et à la flexion de même que la durabilité des mélanges de BCR au cycle de gel-dégel et à l'écaillage sont grandement influencées par les propriétés intrinsèques des granulats utilisés (Gauthier & Marchand, 2002).

Le squelette granulaire doit être bien défini pour obtenir une bonne compacité afin d'attendre un compactage optimal. La mauvaise compacité du squelette granulaire entraîne des désagréments qui peuvent nuire à la qualité du béton comme l'apparition de la ségrégation, augmentation de la porosité et la propagation des microfissures provoquée par le retrait.



**Tableau 1 2 : distribution granulométriques idéale de granulats grossiers d'après (USACE 2000).**

Diamètre (mm)	Tamisât cumuler (%)		
	4.75-75	4.75-50	4.75-19
75	100	-	/
63	88	-	/
50	76	100	/
37.5	61	81	/
25	44	58	/
19	33	44	100
12.5	21	28	63
9.5	14	18	41
4.75	-	-	-

**Tableau 1 3 : distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après (USACE 2000).**

Diamètre (mm)	Tamisât cumuler (%)
9.5	100
100	95-100
2.36	75-95
1.18	55-80
0.6	35-60
0.3	24-40
0.15	12-28
0.075	6-18

### **3.3 L'eau :**

Le BCR est un béton sec à affaissement nul, sa teneur en eau doit donc être faible. Elle est de l'ordre de 4% à 6% fixé par laboratoire lors de l'essai de Proctor modifié. Quant à la teneur en eau au chantier on doit tenir compte des conditions atmosphériques et de transport

### **3.4 Les Adjuvants :**

Les trois types d'adjuvants actuellement utilisés dans la production des BCR sont les retardateurs de prise, les réducteurs d'eau et les agents entraîneurs d'airs.

## **4. Applications Des BCR**

### **4.1 Le BCR En Corps Des Barrages**

On peut utiliser le BCR dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces, l'utilisation du BCR dans la construction permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval, et permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide. Ce matériau caractérisé par un affaissement nul

La dimension maximale du granulat varie de 60 à 150 mm pour ces ouvrages les résistances à la compression varient de 7 à 20 MPa

### **4.2 Le BCR En Technique Routière**

Le mélange employé est rapide et ferme, il faut compacter avec un rouleau compacteur cylindriques ou pneumatiques, de plus une fois durci la résistance à la compression du BCR varie de 15 à 40 MPa et l'épaisseur varie de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour rues des villes, les aires de stationnement. Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse la dimension maximum du granulat est limitée à 20mm (site web association canadienne du ciment). Du point de vue durabilité, le revêtement en BCR a montré des bonnes performances.

## **5. Avantages Du BCR :**

- **La durabilité** : cette durabilité mène à une réduction des travaux de construction
- **Moins de travaux d'entretien** : ERES indique en outre dans son rapport que les travaux asphaltés exigent des travaux d'entretien tous les 2 à 5 ans, par contraste le BCR, les travaux d'entretien commence après 12 ans
- **Une meilleure adhérence** : les études ont démontré que le béton assure dans l'ensemble une meilleure adhérence.
- **Cout peu élevé** : le cout de mise en place du BCR est peu élevé, comma sa longévité excellente.
- Bonne résistance à compression et à la flexion.

## **6. Les Inconvénients Du BCR :**

1. La surface affiche des ondulations qui nuisent aux conducteurs.
2. Cout de transport des matières cimentaire en régions éloignées.
3. Le principal inconvénient pour les BCR est el débit de production qu'il est possible d'obtenir avec des équipements de production conventionnels.

## **7. Formulation De BCR :**

La plupart des méthodes de formulation des mélanges généralement utilisé pour le béton conventionnel ne sont pas applicables au BCR. Des méthodes de formulation de mélanges de BCR sont présentées dans le document American Concrete Institute (ACI) commite 325.10R-95. Elles ont été développées en utilisant différentes approches et ont été employées avec succès. Elles sont pour la plupart basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques qui requièrent la réalisation d'un grand nombre de gâchées d'essais afin d'obtenir le mélange aux proportions optimales. Par ailleurs ces dernières années une méthode de formulation a été développée au laboratoire central en France (LCPC) pour être par la suite adaptée par le centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB° de l'Université Laval à la formulation de mélange BCR. Cette méthode repose sur une meilleure compréhension des paramètres affectant les propriétés à l'état frais et durci du BCR. Dans la grande majorité des cas, un seul gâchée d'essai est requise pour déterminer les caractéristiques du mélange optimum.

Les méthodes de formulation des BCR peuvent être classé en trois catégories :

Méthode empirique / méthode semi-empirique / méthode théorique

### **7.1 Méthode théorique :**

La méthode théorique adoptée dans notre travail à maximiser la compacité du squelette granulaires. Le laboratoire Centrale des ponts et chaussées en France (LCPC) a développé une méthode appelée le modèle d'empilement compressible pour la confection de différents mélanges tels que le béton ordinaire et le béton à haute performance. Par la suite le centre de recherche interuniversitaire sur le béton de l'Université Laval a développé cette méthode de façon à confectionner le BCR. Plusieurs travaux ont été effectués de cette méthode, les résultats obtenus montrent que cette technique donne amplement satisfaction (J. Marchand 1997).

### **7.2 Méthode semi-empirique ;**

Par définition une méthode semi-empirique est basée à la fois sur des données expérimentales et sur quelques formules empiriques. Un exemple de méthode semi-empirique est celui du volume de pate optimale, les mélanges BCR sont formulées en se basant sur un calcul de volume de pate par rapport à un volume de vides. Cette approche requiert la réalisation de quelques gâchées d'essais en laboratoire.

### **7.3 Méthode empirique :**

Au début de la conception du BCR. Des méthodes de formulation empiriques ont été mise en place, Ces méthodes reposent sur la réalisation de plusieurs gâchées en laboratoires afin d'obtenir le mélange adéquat pour un tel projet. Ces techniques prennent de temps et d'énergie, car dans certains cas plus de 25 mélanges sont nécessaires pour atteindre les caractéristiques voulus du BCR. En plus des gâchées réajustement sur chantier sont nécessaires pour obtenir un béton de bonne qualité (J. Marchand1997).

D'après le comité 325.10R-95 de l'American Concrete Insitue (ACI) (ACI-325.10R-95 1995) on a deux méthodes les plus efficaces :

Formulation respectant certaines limites de maniabilité.

Formulation selon les méthodes utilisées en de géotechniques.

#### **7.3.1 Méthode de formulation respectant les limites de maniabilité**

De son nom. Cette méthode de formulation a pour principe d'atteindre une limite de maniabilité en effectuant plusieurs mélanges de BCR. Elle est basée sur trois étapes ou les proportion du BCR sont déterminées (J.Marchand 1997).

La première étape comporte la réalisation de plusieurs gâchées d'essais de mélanges de mortier avec différent rapport eau/ciment et différent rapport sable/ciment pour déterminer le volume de pate minimum. La masse volumique est mesurée pour chaque mélange. La figure (1.3) montre le rapport e/c donné correspondant au rapport s/c qui mène à une masse volumique optimale.

La seconde étape consiste à choisir un rapport eau/liant adéquat aux exigences des propriétés mécanique voulues.

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

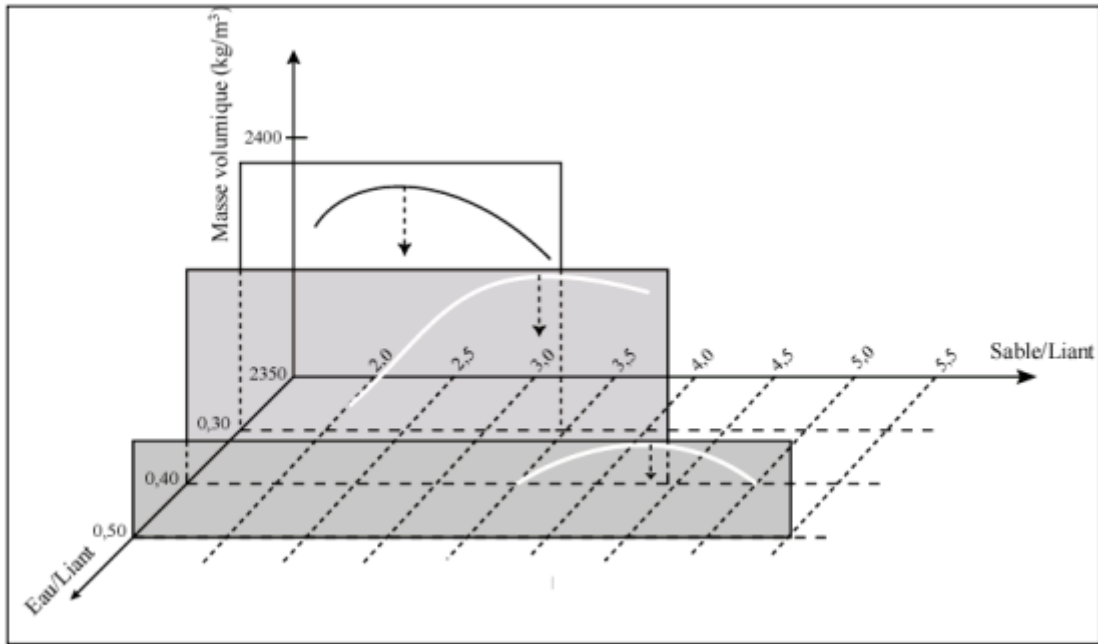


Figure 1. 3 : Paramètres optimaux d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).

### 7.3.2 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique

La comité 325.10R-95 de l'American Concrete Institute (ACI) a aussi proposé cette méthode de formulation qui se base sur les principes de la géotechnique. Cette méthode suit la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau du BCR.

L'utilisation de cette méthode est plus adéquate dans les cas des granulats de petites dimensions et d'une grande quantité de liant (J.Marchand 1997)

La première étape consiste à déterminer la proportion de granulat fin par rapport au granulat grossier à l'aide d'un fuseau granulaire présenté dans la figure (1.4). En deuxième lieu plusieurs gâchés de béton avec différents teneurs en liant sont réalisés. La teneur en liant pour ces gâchés varie entre 12 et 14 % de masse totale des matériaux secs.

L'étape suivante consiste à réaliser pour chaque teneur en liant des mélanges avec différentes teneurs en eau par, la suite et l'aide de la méthode citée par la norme ASTM C1557-Méthode. (ASTM-d1557-07 2007). On peut déterminer la teneur en eau optimale.

Les éprouvettes de BCR sont mises puis compactées dans des moules cylindriques avec une énergie de compactage spécifique, après la fin du compactage l'éprouvette est rasée, nettoyée puis mesurée et la masse volumique sèche est calculée. Ainsi un graphe comportant la masse volumique sèche d'un côté et la teneur en eau de l'autre peut être dressé.

D'après la figure (1.5). On peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau qui permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale. La masse volumique sèche varie considérablement dans l'intervalle de la teneur en eau optimale, par contre la masse volumique humide resté insensible dans cette partie de la courbe. La phase finale de cette méthode consiste à déterminer la quantité de liant nécessaire pour avoir un béton avec des performances données.

Cela s'effectue en réalisant différents mélanges avec différente teneur en liant avec une teneur en fixée (teneur en eau optimale). Le mélange disposant de la teneur en liant la plus faible et les performances mécaniques requises est choisi (J.Marchand 1997).

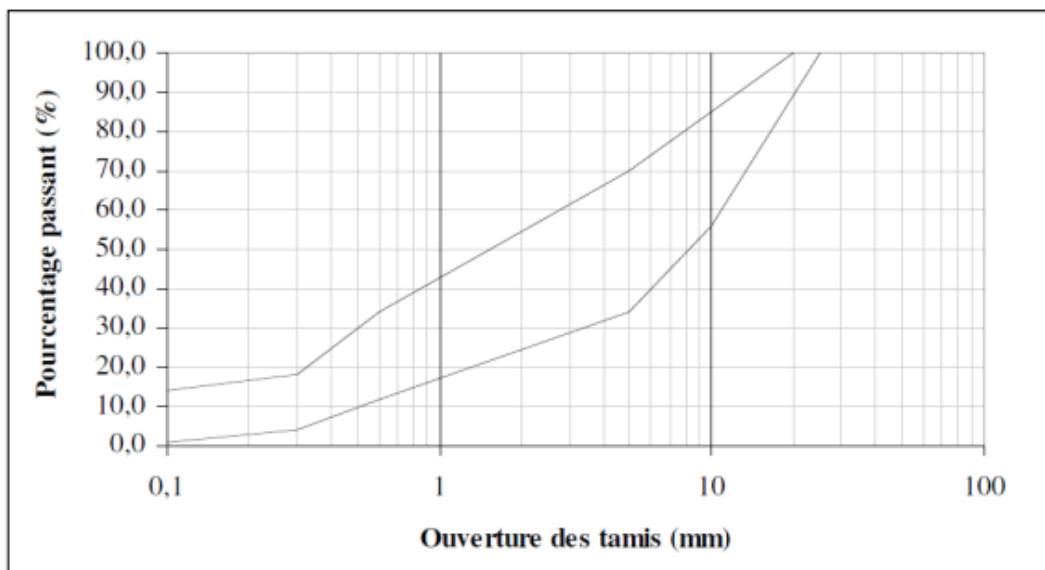


Figure 1. 4 : : Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).

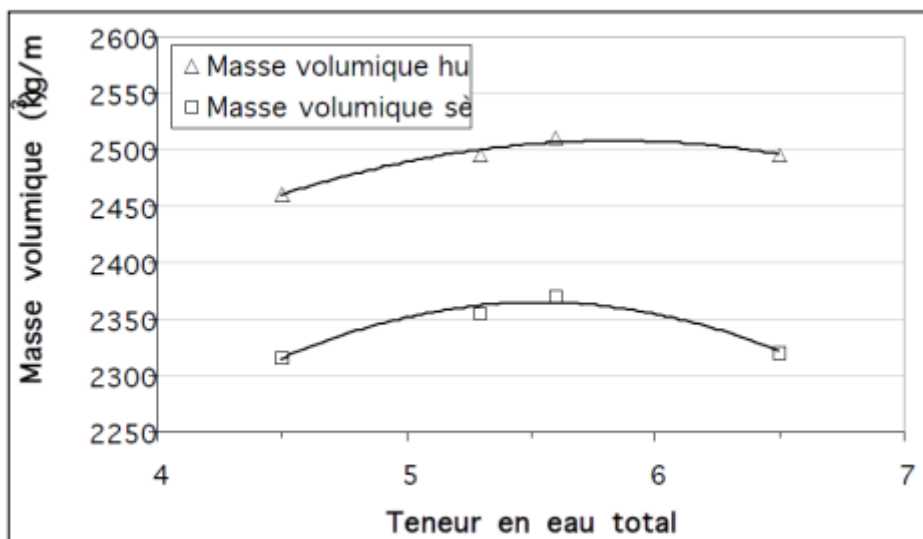


Figure 1. 5 : Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).

## **8. Propriétés Du BCR :**

### **8.1 A l'état frais :**

Les principales propriétés du BCR à l'état frais sont :

1) La maniabilité est une propriété importante du BCR à l'état frais. Elle détermine la facilité de mise en place et fournit une indication de l'uniformité de la production du BCR.

La maniabilité représente l'énergie de compactage nécessaire pour consolider adéquatement le matériau frais [Gauthier & marchand 2002]. Contrairement à un béton traditionnel où la maniabilité est mesurée lors de l'essai du cône d'Abrams, la maniabilité d'un BCR est mesurée lors de l'essai VEBE selon les spécifications de la norme ASTM C 1170. L'essai consiste à déterminer le temps requis afin d'attendre la compacité maximale. Le devis technique 3VM-30 indique que la consistance du mélange devrait se situer entre 60 et 90 secondes [ville de Montréal 2010]

2) La masse volumique dépend principalement de la densité des granulats et de la quantité de vides. Contrairement aux bétons traditionnels, les BCR contiennent très peu vides et ils ont une quantité plus importante de matières solides. Ainsi, la masse volumique des BCR est légèrement supérieure à celle des bétons usuels. Des masses volumiques supérieures à 2400 kg/m<sup>3</sup> ne sont pas rares pour les BCR [lepage,1996].

### **8.2 A l'état durci :**

Les méthodes de formulation des BCR développées récemment permettent de produire des mélanges BCR à compacité optimale. Un mélange de BCR correctement formulé possède des propriétés à l'état durci supérieures à celles d'un mélange de béton plastique pour une même quantité de liant et pour un même rapport eau / liant.

A 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).

*Tableau 1 4 : Différence entre un BCR et béton conventionnel*

<b>Essai</b>	<b>BCR</b>	<b>Béton conventionnel</b>
Résistance à la compression (MPa)	66	44.8
Résistance à la flexion (MPa)	8.3	5.5
Absorption (%)	2.4	5.1
Porosité (%)	6	11.2
Perméabilité (m/s)		
Essai1	5*10-13	14*10-13
Essai 2	0.1*10-13	9*10-13

## **9. Conclusion**

Le béton compacté au rouleau représente de nos jours une alternative très avantageuse pour la construction des barrages et des routes. Ces nombreux avantages font de lui un matériau incontournable dans les pays développés.

Ce premier chapitre regroupe une étude bibliographique sur le BCR et ces applications, on a illustré une définition générale sur le BCR ainsi que son historique au fil du temps. On a aussi parlé de ces constituants et de ces domaines d'application. Finalement, on a conclu ce chapitre par les différentes méthodes de formulation des BCR.



# **CHAPITRE II**

## **Les déchets pneumatiques.**

## **1. Introduction**

Les déchets sont l'un des meilleurs indicateurs de la vitalité économique et du mode de vie d'une société. La croissance de la production et le développement, toujours plus rapide, de biens de consommation ont marqué en profondeur la structure socio-économique des pays industrialisés. L'accroissement de la population et l'augmentation de la production aussi la consommation des matériaux et le changement du mode de vie sont la cause de multiplication quantitative et qualitative et de la nocivité de ces déchets. En Afrique l'urbanisation rapide et sauvage de ces pays a causé la détérioration de l'environnement. L'une de ces conséquences les plus inquiétantes dans le monde en développement, et particulièrement en Afrique, réside d'ailleurs dans les problèmes de gestion des déchets solides, liquides et toxique. En Algérie, de fortes pressions sur l'environnement ont été enregistrées surtout ce que concerne les déchets des moyennes de transport précisément les pneus, contrairement aux pays développés l'algérien doit changer les pneus de son véhicule en taux de 2 fois ou plus par an à cause de l'état catastrophique des routes ce que résulte des tonnes de pneus non réutilisable, un véritable problème qui menace l'environnement dans ce pays ,d'un autre coté la ville de Bordj Bou Arreridj est connue par la consommation des pneus et du caoutchouc en général.

## **2. L'origine de caoutchouc :**

Le latex, ou le caoutchouc, résine naturelle provient de la sève de l'arbre tropical Hévéa. Le mot caotchu, est issu de la langue quechua (Cao = bois, tchu = qui pleure). Ce nom est dû à la manière dont est récolté le latex, puisqu'il s'écoule après l'incision de l'écorce des troncs. On récolte cette résine en pratiquant une encoche sur le tronc de l'arbre, d'où s'écoule alors un liquide de couleur blanchâtre. Au contact de l'air, ce liquide durcit et noircit, il craquelle et devient vite trop rigide. Cet état de fait limite son utilisation à l'état brut. Cependant, si on le fait bouillir à 110°C pendant plus d'une heure avec du soufre, ses caractéristiques changent : il devient dur et résistant mais il garde son élasticité. Mais les chimistes ont découvert le moyen de le synthétiser, vers le début du 20ème siècle, grâce à (la synthèse du poly-isoprène par l'enchaînement ou la polymérisation de molécules d'isoprène), ainsi la fabrication du caoutchouc a-t-elle commencé. Ses caractéristiques techniques à savoir l'étanchéité, l'élasticité, la souplesse, l'absorption de chocs, l'isolation phonique et électrique en font un produit phare pour l'industrie. Faraday, quant à lui, a montré qu'on peut fabriquer du caoutchouc à partir du pétrole. Selon l'association des fabricants du caoutchouc aux états unis. Le caoutchouc (Le latex) est actuellement la plupart du temps synthétique (représente 60% de la production mondiale de caoutchouc).



*Figure 2. 1 : l'arbre tropical Hévéa (Arbre à caoutchouc).*

### **3. Principales zones de production du latex :**

À l'époque précolombienne, le latex provenant de différentes plantes d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud était utilisé pour la fabrication de balles et autres produits en caoutchouc. Avec l'invention de la vulcanisation par Charles Goodyear en 1839 apparaît l'utilisation technique moderne du latex naturel.

### **4. Historique et utilisation du caoutchouc :**

#### **4.1 Utilisation :**

Si le caoutchouc est si largement utilisé aujourd'hui, c'est grâce à ses propriétés spécifiques (élasticité, étanchéité, amortissement) conservées dans de larges plages de température et dans des milieux agressifs. Dans le monde, les principaux débouchés de la transformation du caoutchouc sont l'automobile et le transport, l'équipement industriel, le BTP (le Bâtiment et les Travaux Publics), l'hygiène médical et les colles et adhésifs.

#### **4.2 Historique :**

La véritable histoire du caoutchouc commence bien avant la fin du 15<sup>e</sup> siècle, quant à la suite des grandes découvertes, les Européens commencent à observer, en Amérique centrale et en

Amérique du Sud, l'usage séculaire que font les populations autochtones d'une matière alors inconnue en Europe.

Les premiers explorateurs de l'Amérique sont les premiers à porter des échantillons à l'Europe, mais ils sont relégués dans les cabinets des curiosités (sont des pièces, ou parfois des meubles, où sont entreposées et exposées des choses rares, nouvelles, singulières), faute d'applications, car le latex :

- Est collant lorsqu'il est exposé au soleil ;
  - Fond à température élevée ;
  - Devient cassant à basse température ;
  - Brunit et se coagule lorsqu'il est maintenu à l'air.
- 
- ❖ 1770 : le chimiste anglais Joseph Priestley découvre que l'on peut effacer des marques d'encre en les frottant avec du caoutchouc. Cette découverte sera à l'origine des premières gommes à effacer.
  - ❖ 1783 : le chimiste français Jacques Charles, lancé dans une compétition avec les frères Montgolfier pour réaliser le premier vol habité, fait construire un ballon, on disait alors un « globe » fait d'une étoffe de soie imperméabilisée par un vernis à base de caoutchouc.
  - ❖ 1790 : Samuel Peal, un industriel britannique, brevète une méthode permettant, en mélangeant de la térébenthine avec du caoutchouc, d'imperméabiliser des tissus.
  - ❖ 1811: l'Autrichien Johann Nepomuk Reithoffer fabrique les premiers produits en caoutchouc (tissus, lacets).
  - ❖ 1820 : l'Anglais Thomas Hancock découvre que la plasticité du caoutchouc est augmentée à la suite de son broyage (dans sa machine, le « masticator ») et son pressage, ce qui permet la mise en forme du produit ultérieurement.
  - ❖ 1823 : la découverte du procédé d'imperméabilisation des tissus par dissolution du caoutchouc dans un solvant (du naphte porté à ébullition) permet au chimiste écossais Charles Macintosh de confectionner les premiers imperméables. La matière brevetée prend le nom de son inventeur et devient même en Grande-Bretagne synonyme du mot « imperméable ».
  - ❖ 1835 : Charles Dietz invente un « remorqueur à chaudière » dont il garnit les roues d'une couche de liège puis de caoutchouc boulonné sur la jante. Il invente sans le savoir l'ancêtre du pneumatique.

- ❖ 1842 : Charles Goodyear découvre la vulcanisation, qui permet de stabiliser le caoutchouc afin qu'il résiste mieux aux écarts de température (il fond à température haute et devient cassant à température basse).
- ❖ 10 décembre 1845 : l'Écossais Robert William Thomson invente la roue aérienne (le premier pneu) qui, ne s'adaptant pas aux chariots lourds, tombe dans l'oubli.
- ❖ 1853 : l'Américain Hiram Hutchinson achète les brevets de Charles Goodyear et adapte le caoutchouc aux bottes.
- ❖ 1854 : Hiram Hutchinson ouvre la première usine utilisant le caoutchouc en France, dans l'usine de Langlée, à Châlette-sur-Loing (Loiret).
- ❖ 23 juillet 1888 : John Boyd Dunlop dépose un brevet qui permet d'utiliser le caoutchouc pour la fabrication de pneus. C'est la naissance du pneu à valve. L'invention des pneus (appuyée plus tard par l'explosion de la production automobile) et le succès des bicyclettes provoquent le boom de la production du caoutchouc à la fin du 19<sup>e</sup> siècle.
- ❖ 1892 : les frères Michelin présentent les premiers pneus démontables pour vélos et autos.
- ❖ 1907 : synthèse de caoutchouc par l'Allemand Fritz Hofmann.
- ❖ 1915 : l'Allemagne produit environ 2 500 tonnes de caoutchouc synthétique.
- ❖ 1958 : entrée de la France dans la production synthétique.
- ❖ 2003 : Amerityre Corporation développe les pneus increvables (no flat, air no air), basés sur le polyuréthane.

## **5. Valorisation des déchets de caoutchouc :**

### **5.1 Classification des déchets :**

Dans la réglementation algérienne, la loi 01-19 du 12 Décembre 2001 définit le déchet comme un résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et de manière générale comme une substance, produit ou bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire ou qu'il est obligé de s'en défaire ou de l'éliminer. Avec la croissance du parc automobile, un gisement énorme de pneus usagés s'est constitué à travers tout le territoire du pays. Bien que la loi autorisant la création d'unité de recyclage de ce produit considéré comme déchet dangereux existe, L'article 5 du même décret suggère une classification des déchets comme suit :

- ❖ Déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux ;
- ❖ Déchets ménagers et assimilés ;

- ❖ Déchets inertes.

Plus tard, le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 classe le caoutchouc et les pneus comme déchets spéciaux.

## **5.2 Origines des déchets de caoutchouc :**

Les déchets de caoutchouc ont quatre origines :

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

## **6. Les pneumatiques usagés :**

L'Algérie importe 7 millions de pneus par ans, destinés pour le besoin du parc automobile national. C'est qu'a fait savoir, jeudi 21 juin 2018 à Alger, le Premier Ministre Ahmed Ouyahia.

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

D'après faten sadaka, les pneus usagés peuvent être classés en deux catégories :Faten, S2010

### **6.1 Les pneumatiques usagés réutilisables (PUR)**

Les experts contrôlent l'état de solidité des pneus après une certaine durée de service et s'ils sont encore solides, ils peuvent être encore vendus au marché d'occasion. On les recharge avec une bande de roulement, ce qui permet de leur offrir un nouveau cycle de service.

### **6.2 Les pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR)**

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

En Algérie la quantité de pneus usagés non réutilisables produits annuellement est estimée à environ 1.5 millions de tonnes. Ces déchets ne bénéficient encore d'aucune structure de valorisation et sont stockés dans des décharges à l'air libre constituant ainsi une gêne pour l'environnement.

## 7. Caractéristiques physiques et chimique des pneus

Le tableau 1 donne la composition d'un pneu pour véhicule léger (VL) :

*Tableau 2. 1 : Composition chimique d'un pneu de véhicule léger en Europe d'après Ademe 2012.*

Matière	Pneu
Elastomères	43% à 47a%
Noir de carbone	21%
Acier	16% à 27%
Textile	0% à 5,5%
Oxyde de Zinc	1%
Soufre	1%
Additifs	6% à 7,5%

Le tableau 2.2 présente aussi d'autres caractéristiques des pneus telles que :

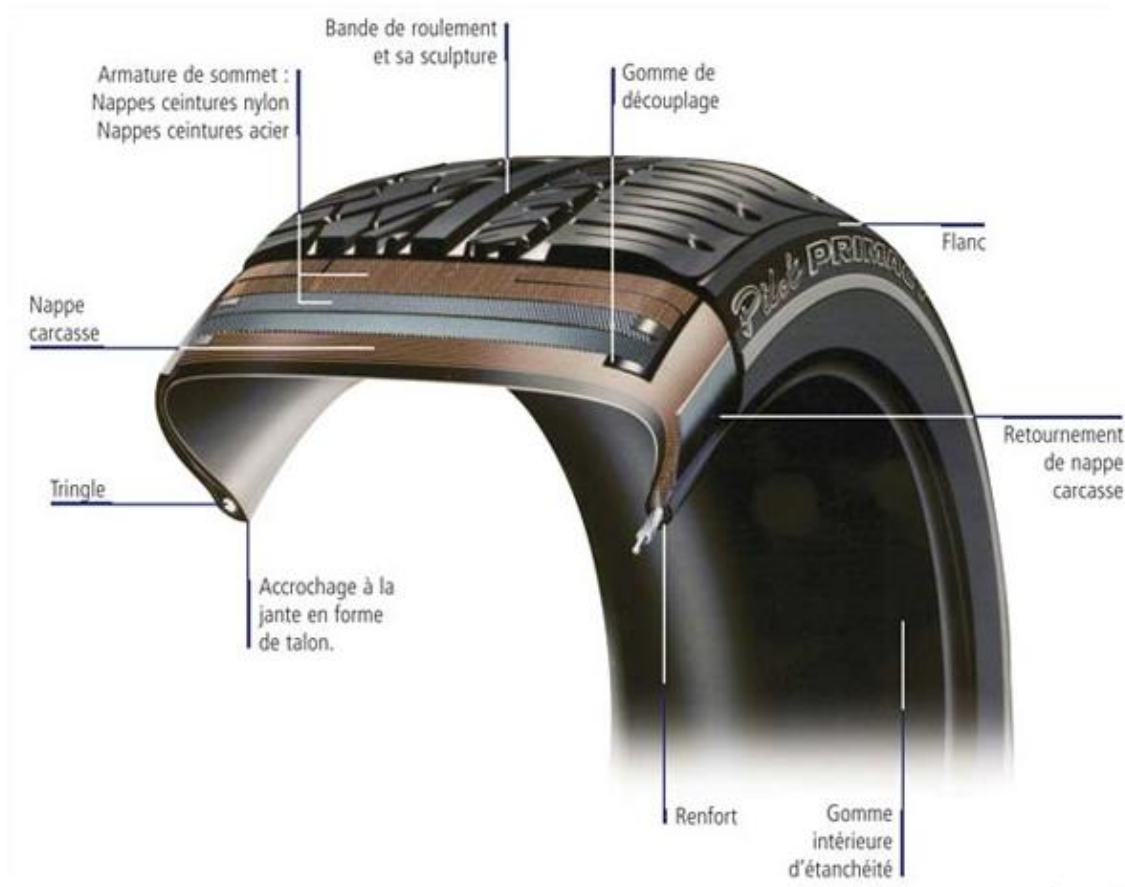
Tableau 2. 2 : Caractéristiques physiques d'un pneu.

Caractéristique	Véhicule léger (VL)	Poids lourds (PL)
Poids moyen	7kg	50kg
Densité moyenne	0,2 entier	0,4 décheté
Présente de métal	15%	25%

L'enveloppe du pneu est décomposable en quatre éléments principaux : Malek K,B 2008

- a) **La carcasse** Elle constitue le squelette du pneu, l'ossature du pneu est composé de couches de câble de différent types (nylon, acier, rayonne, polyester, aramide,...).
- b) **Le talon** Est l'élément rigide de la liaison entre la jante et le pneu. Il est composé d'une tringle de câble d'acier à haute adhérence.
- c) **La bande de roulement** Elle est composée d'un mélange de caoutchouc devant résister aux chocs, aux coupures, aux échauffements, à l'abrasion...

**d) Le flanc** Il est constitué de plusieurs types de caoutchouc ; son rôle est double : il doit, dans sa partie supérieure protéger la carcasse contre les échauffements et l'abrasion, et dans sa partie inférieure (plus épaisse) protéger la carcasse des contacts avec le rebord de la jante.



*Figure 2. 2 : Les différents composants d'un pneu.*

## **8. Effet des déchets pneumatiques sur l'environnement :**

La mise en décharges, des pneus usagés, n'est pas sécurisée en cas d'incendie criminel ou naturel (foudre). De plus, Le brûlage des déchets de caoutchouc dans les décharges publiques présente une gêne environnementale et économique extrêmement dangereuse pour la nature, il menace non seulement les ressources naturelles en eau et en air (CO<sub>2</sub>), mais aussi la santé publique. Un exemple concret, relatant cette situation, est celui de l'incendie d'Hager-ville (Canada) qui a fallu 17 jours pour l'éteindre et a fait des dégâts estimés à environ de 12.6 millions de Dollars (figure3), la température de combustion n'est pas assez élevée pour qu'il y



ait incinération complète, et des composés toxiques sont libérés dans l'air (figure 2.3 et 2.4), le sol et les cours d'eau, provoquant une contamination de ces milieux (Figure 2.3 et 2.4).



*Figure 2. 3: l'incendie d'Hager-ville (CANADA)*

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



*Figure 2. 4 : Les risque de feu dans les décharges des pneus usagés.*



*Figure 2. 5 : Incendie sur le site de stockage des pneus usagés (Seniorforums.com).*

### **9. Propriétés de caoutchouc :**

Pour qu'un matériau soit mécaniquement reconnu comme un caoutchouc, il doit être souple, c'est-à-dire de faible rigidité (quelques mégapascals) hautement déformable, c'est-à-dire capable de supporter de très grandes déformations sans se rompre ou d'atteindre des allongements (rupture) de plus de 100 p.

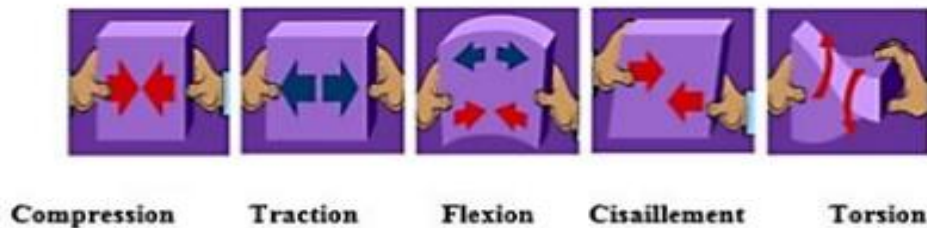
La masse volumique du caoutchouc naturel est de  $0,93 \text{ g/cm}^3$ . Le caoutchouc naturel non chargé et vulcanisé a une bonne résistance à la traction, avec une force à la rupture de l'ordre de 20 MPa et plus.

Le caoutchouc naturel est un excellent matériau pour l'élaboration d'articles souples très rigides et très fins, par exemple des gants de chirurgien ou des ballons.

La résistance à la propagation de la déchirure est très bonne. Seule celle des polyuréthanes réticulés aux isocyanates est supérieure. La résistance à la propagation de la déchirure a cru (non vulcanisé) est meilleure avec des charges renforçantes, propriété très importante pour la fabrication des pneumatiques.

Du fait de ses faibles propriétés hystérétiques, la génération de chaleur (donc, pour les pneus, la résistance au roulement) est faible avec le caoutchouc naturel en comparaison de celle des caoutchoucs synthétiques. Cela explique son utilisation dans les bandes de roulement des pneus poids lourds. Le caoutchouc naturel est par contre peu utilisé en bande roulement de pneus tourisme car ses propriétés ne lui permettent pas d'atteindre les exigences d'adhérence nécessaires.

Le caoutchouc n'a pas une bonne résistance à la température et aux contacts avec les solvants. Cela limite ses applications dans le domaine de l'étanchéité et du transport de liquide, ainsi bien sûr que dans toutes les applications nécessitant une bonne tenue à la température.



*Figure 2. 6 Différentes sollicitations mécaniques (dreamstime.com/photo-stock).*

### Chiffres :

- On produit 11.8 millions de tonnes de caoutchouc par an dans le monde, soit 374 kilos de caoutchouc par seconde ; essentiellement produit par les hévéas et consommé par l'industrie automobile pour les pneumatiques (2014).
- La production mondiale de caoutchouc naturel est estimée à 13,7 millions de tonnes en 2019 (source International Rubber Study Group - IRSG), dont 90 % proviennent du continent asiatique. G. Petit et al 2008
- Le caoutchouc naturel représente 30% du marché du caoutchouc en 2016, contre 70% pour le caoutchouc synthétique.
- Le caoutchouc naturel fait vivre 30 millions de personnes, dont une majorité de petits producteurs.
- La production mondiale de caoutchouc naturel est de 15.16 millions de tonnes en 2018, contre 7,58 millions de tonnes en 2000, 3,86 millions de tonnes en 1980 et 2,12 millions de tonnes en 1961. G. Petit et al 2008

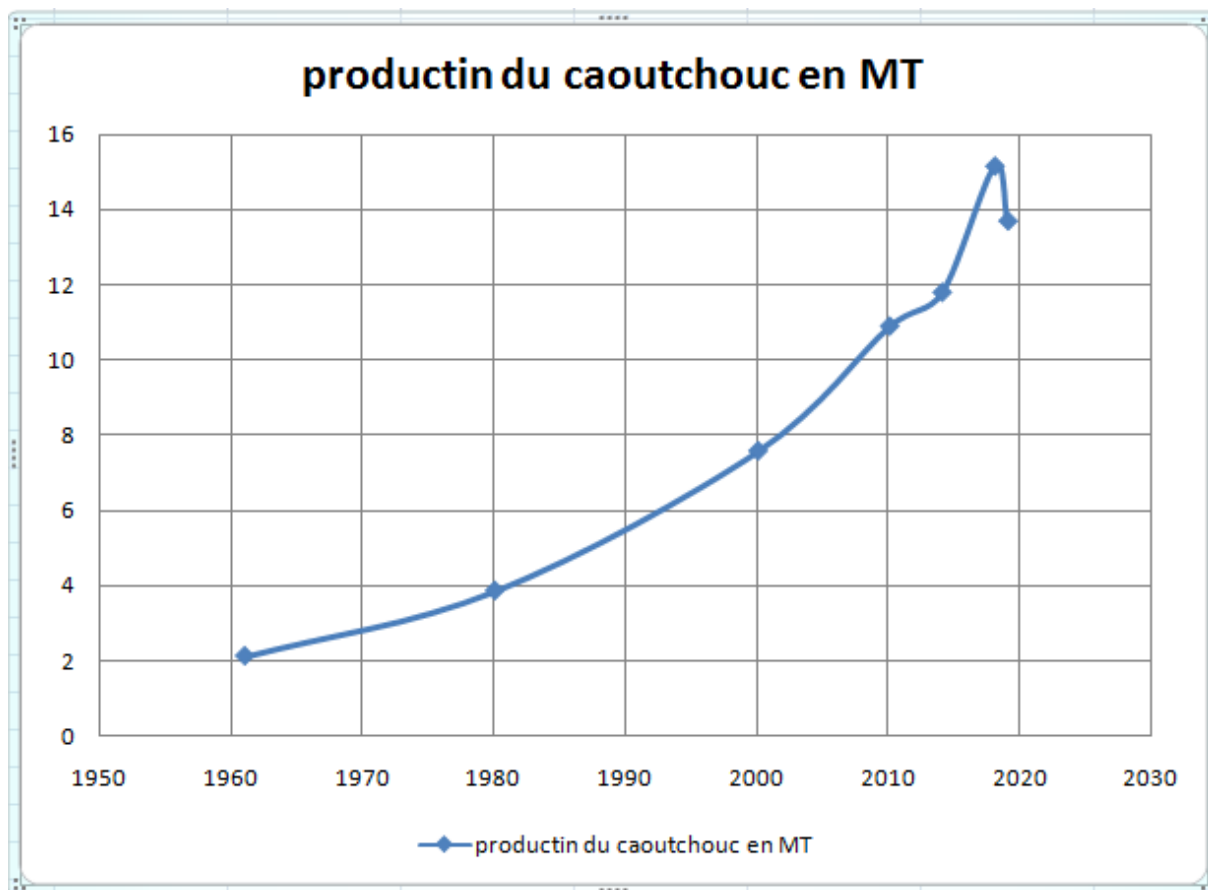


Figure 2. 7 : la production du caoutchouc en millions de tonnes G.Petit et al 2008.

## 10. Valorisation et domaine d'application des pneumatiques :

Les problèmes engendrés par la dispersion de déchets de pneus rendent difficiles leur collecte et leur valorisation. Ces déchets constituent alors une menace pour notre environnement : dépôts sauvages, émission de fumées toxiques dues au brûlage ; la mise en décharge constitue un gaspillage de matière et d'énergie. Cependant les pneus usagés peuvent suivre différentes filières de valorisation : CONSTANT E 1998

**a) Le réemploi Rechapage**, revente d'occasion, réutilisation en ensilage par les agriculteurs.

**b) La valorisation énergétique** Le caoutchouc a un pouvoir calorifique élevé. Les déchets de pneus peuvent donc servir de combustible de qualité dans les cimenteries et chaudières industrielles. CONSTANT E 1998

**c) La valorisation en matière** Broyage en poudre pour une utilisation en revêtement de sol. CONSTANT E 1998

**d) La valorisation en travaux publics et dans le domaine de génie civil** Le broyage de pneus utilisés comme : remblais, confortement de digue et le recyclage sous forme de déchiquetés, granulats dans les applications du type enrobés, etc. Utilisation de granulats en

caoutchouc issus de broyage de pneus usagés, en substitution volumique des granulats naturels dans la confection du béton. SANDRA B et al 2004.

**e) les fibres métalliques** Peuvent être utilisées comme renfort.

### **11. Recyclage de caoutchouc**

L'environnement est un enjeu très important, et sa préservation est une responsabilité commune. Les pneus usagés représentent un déchet abondant et très préoccupant. Avant d'être considérés comme un déchet, un certain pourcentage des pneumatiques usagés peut faire l'objet d'une valorisation qui peut se présenter sous une des formes suivantes ; valorisation énergétique, rechapages, valorisation sous forme de matières premières, et procédés innovants dans le domaine du génie civil tel que le 'Pneu sol' ainsi que dans le domaine routier : l'Asphalte caoutchouté obtenu à partir de la poudrette de pneumatique (traitement des fissures des chaussées routières).



*Figure 2. 8 : Exemple d'intégration de poudrette dans l'asphalte Kurt Reschner*

#### **11.1 Valorisation originale des pneus usagés**

Dans le processus de valorisation matière, le pneu usagé est employé sous différentes formes :

##### **a - Pneus entiers**

- ❖ Pneu sol qui consiste à superposer des couches de pneus reliés entre eux et remplis de matériaux de remblai. Cette technique permet la réalisation d'ouvrages de soutènement, de remblais légers, d'ouvrages absorbant l'énergie comme protection contre les chutes de blocs, et les répartiteurs de contraintes au-dessus des conduites enterrées.
- ❖ Arma pneu sol associe pneus, remblai et armatures en nappes de treillis soudés. Pneu tex associe pneus et membranes en géotextile.

- ❖ Pneu résil consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes et à empêcher le sol courant de remplir les vides créés à l'intérieur et entre les pneus ; cette structure, a une masse volumique très faible et peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement.
- ❖ Drainage l'utilisation de pneus ligaturés entre eux et mis en place sous forme de tube, permet le drainage de fossés et de parcelles.
- ❖ Protection de quai des pneus entiers sont couramment utilisés comme absorbeurs de chocs le long de quais et de jetées.
- ❖ Ensilage certaines techniques agricoles utilisent des pneus pour le maintien des bâches d'ensilage.



*Figure 2. 9 : La préparation d'un chantier pneusol ( France 2019 )*

### **b - Pneus découpés et déchiquetés :**









La bande roulement des pneus découpés peut être utilisée comme tapis support de voie ferrée pour réduire les bruits et les vibrations. Les propriétés drainantes, la compressibilité, la masse volumique faible du produit permettent aux déchiquetât de pneus d'être utilisé comme remblai léger dans la construction de routes ou comme sous couches drainantes de centres d'enfouissement technique.

Aussi les pneus déchiquetés sont réutilisés sous forme des granulats de construction, déchiquetés ou broyés, à différentes tailles, selon le type d'application. Les autres constituants des pneus (aciers, fibres), sont séparés et peuvent être valorisés aussi à part. La poudrette est

utilisée en combinaison avec des liants pour réaliser des murs anti-bruit, des dalles de sol pour les aires de jeux et des pistes d'athlétisme, comme montre (la Figure 2.10).



*Figure 2. 10 : Piste d'athlétisme en granulats de pneus usagés recyclés.*

			
Pneus entiers	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Granulats 7/15 mm
			
Granulats 2/7 mm	Granulats 0,5/2 mm	Poudrettes 0/0,5 mm	Poudrette < 50 µm

*Figure 2. 11 : les différentes formes disponibles.*

## 12. L'intérêt de poudrette de caoutchouc :

- ❖ Amélioration de la cohésion.
- ❖ Diminution de la susceptibilité thermique.
- ❖ Augmentation des capacités d'allongement.
- ❖ Amélioration des caractéristiques viscoélastiques.

- ❖ **Amélioration de l'adhésivité passive** (meilleure résistance aux dés enrobage sur la chaussée) Les propriétés physiques de la poudre de caoutchouc qui les rendent moins susceptibles aux températures élevées et moins fragiles aux basses températures se traduisent aussi par des cohésions élevées, des retours élastiques, une bonne résistance en traction et aux essais de cisaillement. Ces propriétés ont des effets intéressants sur les performances.
- ❖ **Résistance à l'orniérage** est améliorée par l'utilisation des polymères qui augmentent la cohésion à haute température et élève la recouvrance élastique lorsque la contrainte disparaît, ce qui est surtout valable pour les poudres de caoutchouc.
- ❖ **Rigidité** : La réduction de la susceptibilité thermique permet d'augmenter la rigidité d'un mélange à température élevée.
- ❖ **Résistance à la fatigue** : L'augmentation de la rigidité aux températures élevées et la diminution de la fragilité du liant aux basses températures permettent d'améliorer la tenue en fatigue des mélanges.
- ❖ **Résistance à la fissuration à basse température** : La poudre de caoutchouc permet d'obtenir un mélange plus souple qui diminuera le risque de fissuration.
- ❖ **Résistance à la propagation des fissures** : Cette propriété requise pour les couches surmontant des couches d'assises traitées aux liants modifiés aux élastomères employés à des taux relativement élevés, mais des combinaisons liantes modifiées-fibres ont donné aussi des résultats positifs en laboratoire.
- ❖ **Durabilité** : l'adhésivité de la poudre de caoutchouc sur le granulat est un facteur important.
- ❖ **Résistance au vieillissement** : La possibilité d'augmenter l'épaisseur de la poudre de caoutchouc contribue à améliorer cette propriété même s'il n'y a pas d'essai pour la mesurer clairement.

Toutes les propriétés sont particulièrement intéressantes dans les techniques d'enrobés où les sollicitations mécaniques et métrologiques sont particulièrement agressives.

### **13. Propriétés physico-mécaniques des bétons de déchets de caoutchouc :**

#### **13.1 Béton de déchets de caoutchouc :**

##### **13.1.1 Définition du béton de déchets de caoutchouc :**

Il est obtenu en incorporant dans la masse de béton des éléments qui sont les déchets plastiques composés de forme et de nature diverses.



### 13.1.1.1 Propriétés à l'état frais :

#### A) L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est la propriété essentielle des matériaux cimentaires à l'état frais. Selon la nature du matériau à étudier, elle est estimée par l'essai d'affaissement ou d'étalement, elle révèle le degré de fluidité de la pâte du béton et sa facilité de mise en œuvre. Les travaux réalisés par Khatib & al 1999 sur la faisabilité des bétons de caoutchouc, ont montré la chute graduelle de leur ouvrabilité avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc (Figure 2.12). Ce comportement est expliqué par la forme rigoureuse des granulats de caoutchouc. Des récentes études, ont confirmé la même tendance pour des composites cimentaires.

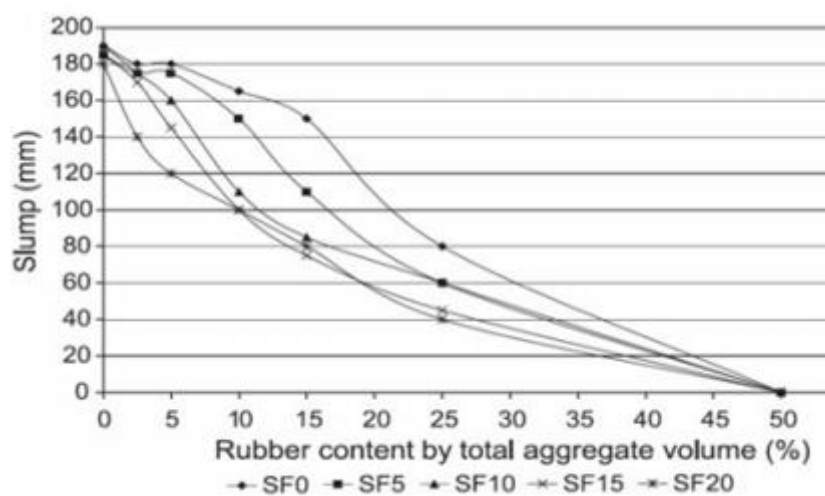


Figure 2. 12 : Effet des granulats de caoutchouc sur l'affaissement

#### B) La masse volumique à l'état frais :

Les travaux de recherches, menés par Bravo et al 2012, sur l'évolution de la masse volumique des bétons de caoutchouc obtenus par substitution partielle des granulats classiques silico-calcaires de densités relativement élevées, avec des granulats de caoutchouc de densité faible, ont révélé que les densités fraîches de ceux-ci sont diminuées avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc dans la masse du béton. Cette tendance est expliquée par la légèreté des granulats de caoutchouc (Figure 2.13).

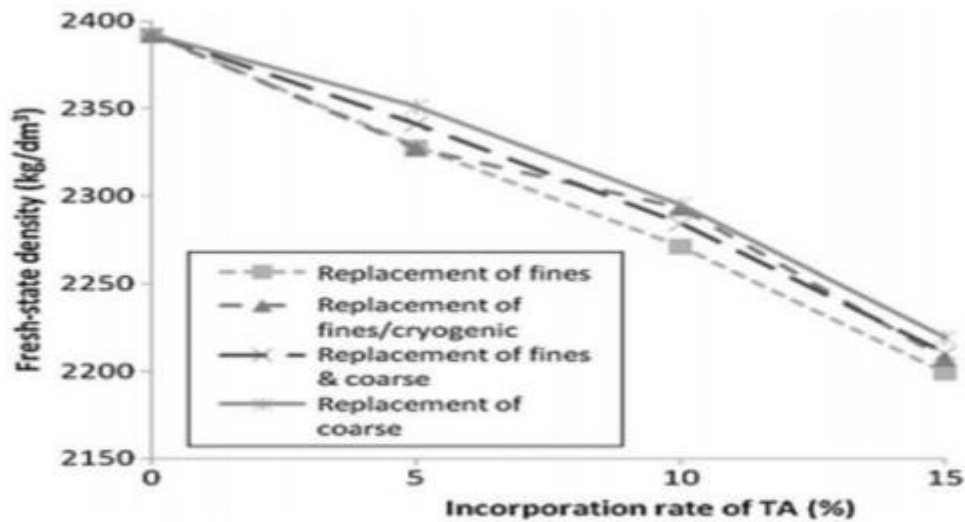


Figure 2. 13 : L'influence des GCR sur la masse volumique du béton.

### C) Retrait

La maîtrise des variations dimensionnelles, dues aux retraits et/ou gonflements, des matériaux cimentaires, améliore leurs résistances aux différentes agressions physicochimiques. L'influence des granulats de caoutchouc sur le retrait et/ou gonflement, des matériaux cimentaires, a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. La plupart des auteurs ont rapporté que l'inclusion des GCR dans les matériaux cimentaires augmente son retrait, en raison de la faible rigidité des particules de caoutchouc. La Figure 14 montre que le retrait des mortiers, incorporant les granulats de caoutchouc, est plus élevé que celui du mortier de référence sans granulats de caoutchouc.

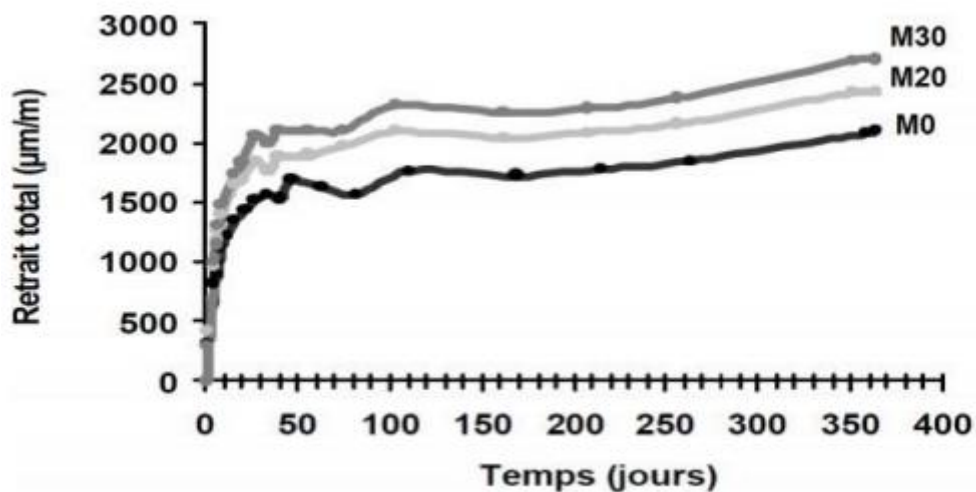


Figure 2. 14 : L'influence des GCR sur le retrait des mortiers de ciment.

### 13.1.1.2 12.3-Propriétés à l'état durci

#### A) Résistance en compression

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

Des observations à la vidéo microscope montrent un défaut d'adhérence manifeste et une auréole de transition plus étendue entre la matrice cimentaire et les grains de caoutchouc. La photographie de la Figure 15 montre cet état qui contribue sans doute aussi à l'augmentation de la porosité globale du composite et à la chute de la résistance en compression.

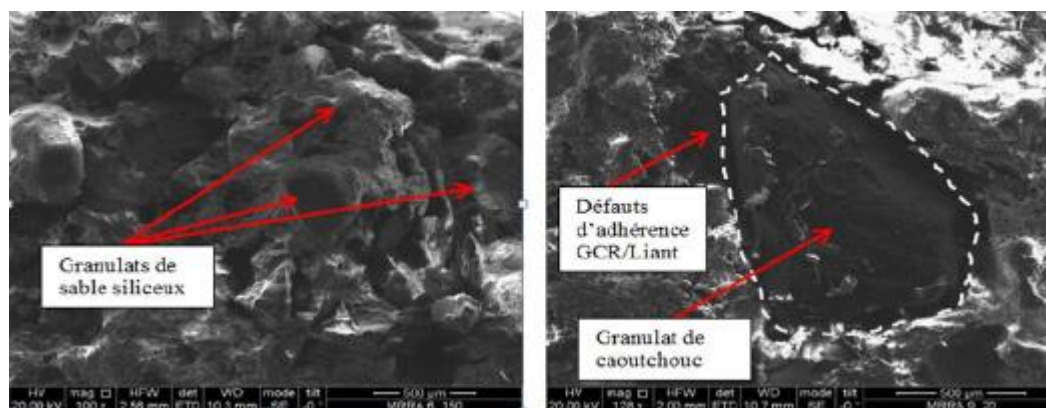


Figure 2. 15 : Observations au MEB de la microstructure de mortier témoin (à gauche) et le mortier de caoutchouc (à droite) MGCR9 et mise en évidence de la zone d'interface.

#### 14. Méthode de traitement du GC :

Au fil des années, plusieurs chercheurs ont travaillé sur la possibilité d'améliorer l'adhérence du caoutchouc par un traitement adéquat. Meddah et al 2015 a travaillé sur le traitement du caoutchouc par le NaOH et par la résine (MEDAPOXY AL). Le résultat obtenu montre une

amélioration conséquente des propriétés physico-mécaniques des BCR avec du caoutchouc non traité.

### **Conclusion :**

Plusieurs actions de valorisation des déchets, de pneus usagés, ont été menées dans le monde, particulièrement dans le domaine des matériaux de construction. Ce secteur, grand consommateur de granulats, peut en effet résorber une quantité importante de ces déchets et pallier ainsi les contraintes économiques et environnementales particulièrement dans les régions qui ont souffert du problème d'épuisement des granulats naturels.

Nous avons posé, ainsi, dans ce chapitre la problématique des pneumatiques usagés et leur valorisation, notamment, sous forme de granulats dans les composites à base cimentaire. Cette incorporation dans une matrice cimentaire a un effet négatif sur l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques, d'une part. D'autre part, elle améliore certaines propriétés comme la ductilité, la résistance au développement des fissures et la conductivité thermique. Les effets de cette incorporation ont été étudiés à grande échelle sur les propriétés du béton ordinaire, ce qui n'est pas le cas pour le BCR pour lequel les résultats ne sont pas clairs.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui porte sur les potentialités d'utiliser les déchets pneumatiques sous forme de granulats dans un BCR.

**CHAPITRE III :**  
**matériaux,**  
**formulation et essais.**

## 1. Introduction

L'importance des constituant est très grand pour un BCR, a cause son influence sur la durabilité et les performances d'un BCR.

Dans ce chapitre on va déterminer les types et les caractéristiques des matériaux utilisé dans notre travail.

## 2. Matériaux utilisés

### 2.1 Gravier

Le gravier est parmi les éléments essentiel des constituants du béton, dans nos cas le BCR, ce constituant doit être sans reproche afin d'obtenir un béton performant sur tous les niveaux.

Dans notre travail deux fractions de gravier (3/8 et 8/15) ont été utilisées, les graviers proviennent de la carrière d'EL EUCH. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau (3.1)

*Tableau 3. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers utilisés.*

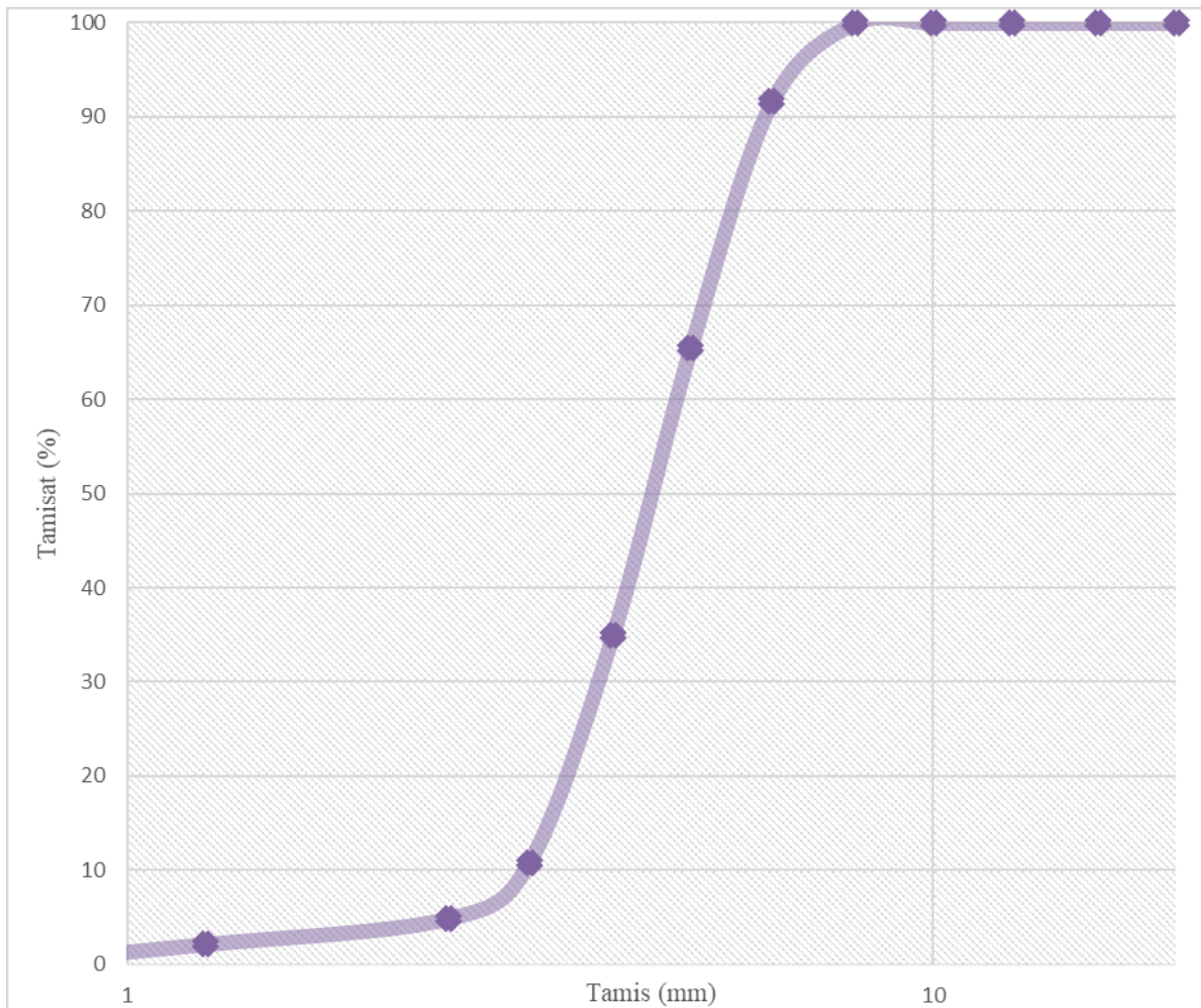
Propriétés	3/8	8/15
Masse volumique apparente(g/cm <sup>3</sup> )	1.48	1.47
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.77
L'indice de vide (e)	0.77	0.88
Porosité (%)	43.73	46.94
Compacité (%)	56.27	53.06

#### 2.1.1 Analyse granulométrique du gravier

L'analyse granulométrique du gravier (3/8) et (8/15) est présenté dans les tableaux (3.2) et (3.3).

**Tableau 3. 2 : L'analyse granulométrique du gravier (3/8).**

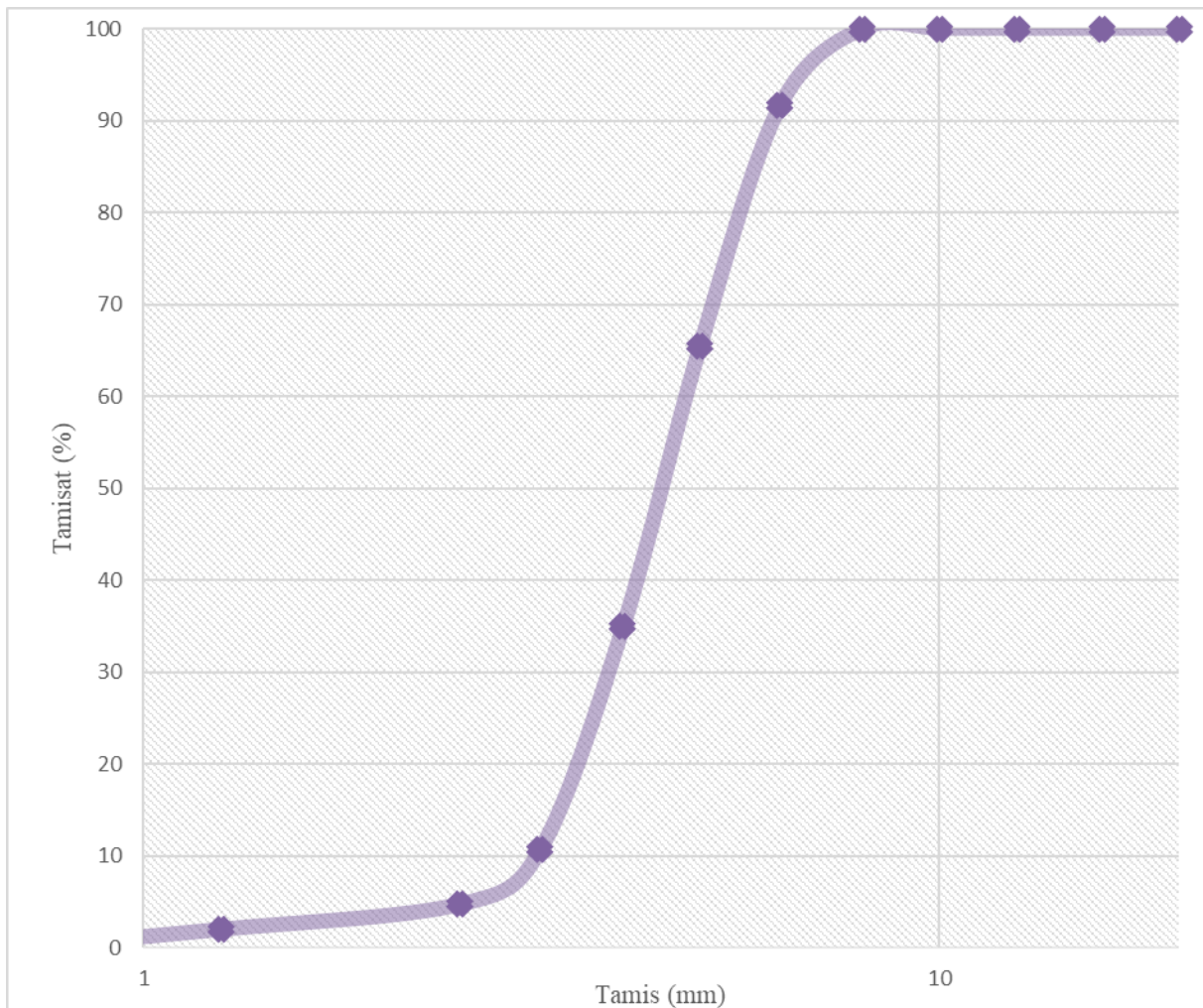
Tamis	Refus Parciel (g)	Refus Cumul(g)	Refus Cumulé (%)	Tamis %
8	0	0	0	100
6.3	134,24	134,24	8,39	91,61
5	417,6	551,84	34,49	65,51
4	488,96	1040,8	65,05	34,95
3.15	386,56	1427,36	89,21	10,79
2.5	94,88	1522,24	95,14	4,86
1.25	43,68	1565,92	97,87	2,13



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

**Tableau 3. 3 : L'analyse granulométrique du gravier (8/15).**

Tamis	Refus Partiel (g)	Refus Cumul(g)	Refus Cumulé (%)	Tamis %
16	0	218,24	6,82	93,18
12.5	508,48	726,72	22,71	77,29
10	1110,08	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.**



## 2.2 Sable

Le sable est une matière solide granulaire constituée de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale ou organique. Pour notre travail on a utilisé deux types de sable. (Sable de dune et sable concassé)

### 2.2.1 Sable de dune

Le sable de dune utilisé pour cette étude provient de la région d'OUED SOUF, ce sable possède un faible module de finesse (2.6 MF).



*Figure 3. 3 : Exemple d'une carrière de sable de dune.*

### 2.2.2 Sable concassé

Le sable concassé qu'on a utilisé provient de la carrière d'EL EUCH avec un module de finesse (3.24MF).



*Figure 3. 4 : exemple d'une carrière de sable concassé*

L'utilisation de deux types de sable dans notre essai procure au squelette granulaire du béton une compacité maximale, et le cumulé des deux types deux modules de finesses donne un mélange adéquat pour la confection du BCR.

L'analyse granulométrique et les caractéristiques des deux sables sont présentées dans les tableaux (3.4), (3.5) et (3.6)

**Tableau 3. 4 : Caractéristiques physiques des deux sables utilisés.**

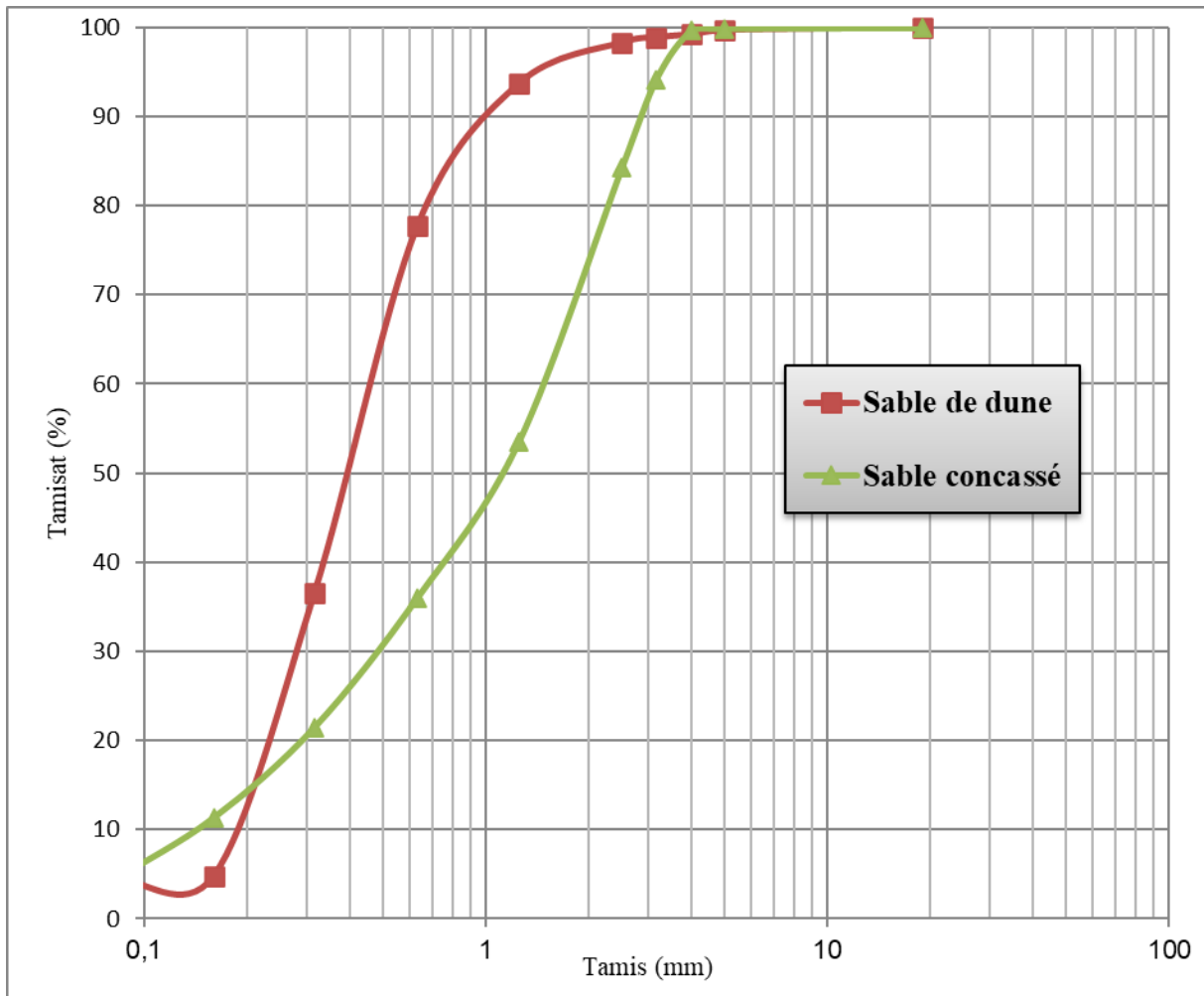
Propriétés	Sable de dune	Sable concassé
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.70	1.53
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.50	2.7
Equivalent de sable E.s.p moy (%)	84.26 %	95.14%
Compacité (%)	68	56.66
Porosité (%)	32	43.33
L'indice de vide (e)	0.47	0.76

**Tableau 3. 5 : l'analyse granulométrique d'un sable de dune**

Tamis	Refus Partiel (g)	Refus Cumul (g)	Refus Cumulé (%)	Tamis %
5	3	3	0,3	99,7
4	5	8	0,8	99,2
3.15	3,1	11,1	1,11	98,89
2.5	5,9	17	1,7	98,3
1.25	46	63	6,3	93,7
0.630	160	223	22,3	77,7
0.315	412	635	63,5	36,5
0.16	317	952	95,2	4,8
0.08	1	953	95,3	4,7
FOND	47	1000	100	0

*Tableau 3. 6 l'analyse granulométrique d'un sable concassé*

Tamis	Refus Partiel (gr)	Refus Cumul(g)	Refus cumulé (%)	Tamisas (%)
5	1,1	1,1	0,11	99,89
4	2	3,1	0,31	99,69
3.15	55,1	58,2	5,82	94,18
2.5	99,2	157,4	15,74	84,26
1.25	307,6	465	46,5	53,5
0.63	175,3	640,3	64,03	35,97
0.315	145,3	785,6	78,56	21,44
0.2	101,2	886,8	88,68	11,32
0.08	72,2	959	95,9	4,1
Fond	41	1000	100	0



*Figure 3. 5 : l'analyse granulométrique d'un sable concassé.*

### **2.3 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.

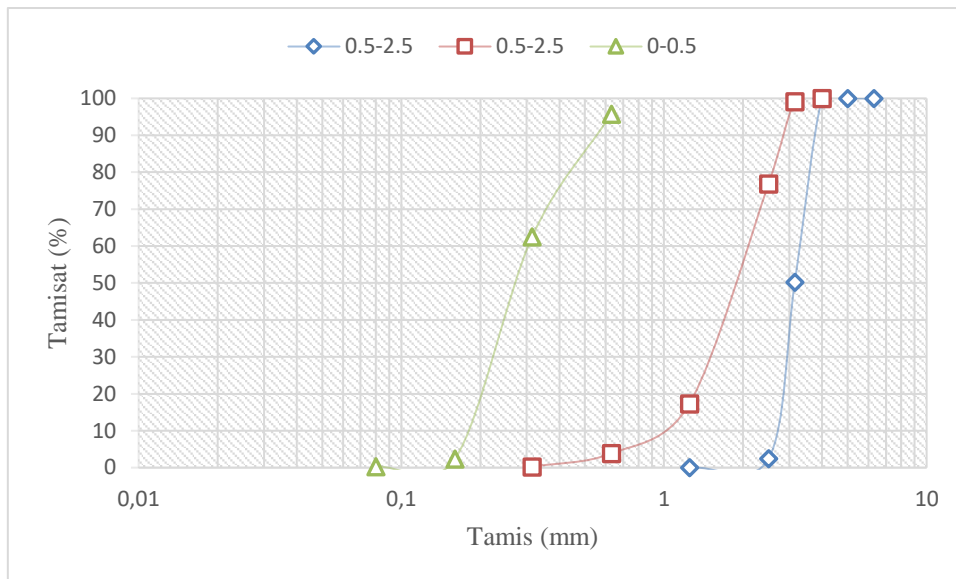


Figure 3. 6 : Analyse granulométrique des poudrettes de caoutchouc.

## 2.4 Liant

Le choix de type ciment utilisé pour la préparation est très important, et cette importance vient de son effet sur la vitesse d'hydratation et le taux de développement de la résistance.

a. Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment de classe CEM I/42.5R conforme à la norme algérienne (NA442-2013), provenant de la cimenterie de Biskria ciment SPA



Figure 3. 7 : Ciment portland CEM I /42.5R

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C3S	56 – 66
C2S	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220-250

Figure 3. 8 : Caractéristiques technique du ciment portland CEM I ( biskria)

## 2.5 L'eau

L'eau utilisé est l'eau de robinet de laboratoire de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

## 2.6 Le caoutchouc (la poudrette de caoutchouc)

Afin d'atteindre les objectifs de la thèse, des granulats en caoutchouc livrés par une société de recyclage de pneus usagés située à wilaya de Bouira, ont été utilisés.

Cette société est dotée d'une unité de recyclage de pneus usagés. Les nouvelles technologies de broyage des pneus permettent de séparer le caoutchouc d'autres composantes (fils métalliques, fibres textiles), générant ainsi des particules en caoutchouc pratiquement pures. Les particules en caoutchouc ont été utilisées comme substitution partielle du sable en volume. On a utilisé trois fractions de poudrettes de caoutchouc, leurs dimensions sont comme suit ; 0-0.5, 0.5-2.5 et 2.5-5 mm. Nous signalons que ces particules ne présentent pas une distribution granulométrique similaire à celle du sable naturel. La densité des granulats de caoutchouc est de 0.91, donc très inférieure à celle des granulats naturels et que leur coefficient d'absorption d'eau est presque négligeable 1,04. (Tableau 3 7).

*Tableau 3. 7 : Caractéristiques physiques des poudrettes de caoutchouc.*

Masse volumique absolue	0.91 Kg /m <sup>3</sup>
L'absorption d'eau	1.04
Granulométrie	0 à 0.5 mm
	0.5 à 2.5 mm
	2.5 à 5 mm

### **3. Formulation du BCR**

Dans cette partie, la formulation a été étudiée afin de déterminer les quantités adéquates pour notre BCR, la méthode suivie est celle basée sur la mécanique des sols (relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau). La première étape consiste à déterminer la proportion de granulats fins par rapport au granulats grossiers à l'aide d'un fuseau granulaire proposé par le Comité 325.10R-95 de (ACI325.10R-95 1995)). En deuxième lieu, plusieurs gâchés de béton avec différentes teneurs en liant sont réalisés. La teneur en liant pour ces gâchés varie entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. L'étape suivante consiste à réaliser, pour chaque teneur en liant, des mélanges avec différentes teneurs en eau. Par la suite, et à l'aide de la méthode décrite dans la norme ASTM C1557 (ASTM-D1557-07 2007), on peut déterminer la teneur en eau optimale. Les éprouvettes de BCR sont mises en place puis compactées dans des moules de Proctor CBR avec une énergie de compactage spécifique. Après la fin du compactage, l'éprouvette est rasée, nettoyée puis mesurée et la masse volumique sèche est calculée. Ainsi, un graphique comportant la masse volumique sèche d'un côté et la teneur en eau de l'autre peut être dressé. D'après le graphique obtenu, on peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau, cette dernière permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale et par la suite la quantité d'eau adéquate de notre béton. Pour le ciment, le mélange contenant la teneur en ciment la plus faible et les caractéristiques mécaniques voulues est choisi (coût). L'étude de la composition du BCR consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau. Cette optimisation a pour but de réaliser un BCR dont les qualités doivent être celles recherchées pour la construction routière.

#### **3.1 Paramètre de formulation**

Selon la méthode basée sur la géotechnique, on doit suivre les étapes suivantes :

**Optimisation du squelette granulaire** Pour choisir les pourcentages des différentes fractions d'agrégats, il faut que la courbe combinée soit à l'intérieur du fuseau proposé par Marchand et al. (J. Marchand 1997), les résultats sont représentés dans le tableau 4 et la figure 8.

*Tableau 3. 8 : Tamisât des différentes fractions d'agrégats.*

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



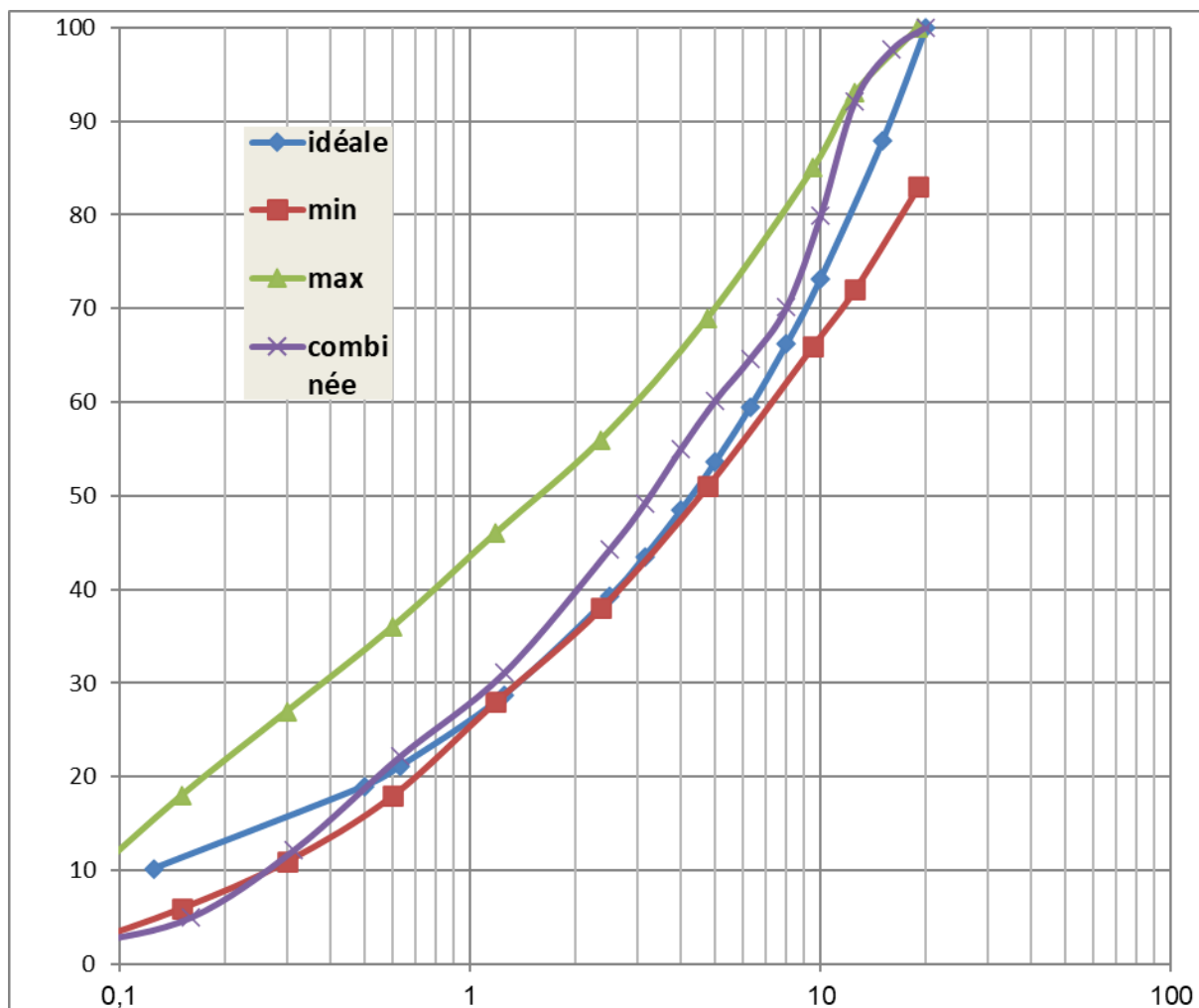


Figure 3.9 : Courbe combinée des agrégats utilisés par rapport au fuseau proposé par Piggot d'après (J. Marchand 1997)

### 3.2 Pourcentage des granulats

D'après le fuseau granulaire dans la figure 3.8, les pourcentages des différentes fractions des granulats seront comme montrés dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : pourcentage des granulats

Granulats	Pourcentage (%)
<b>Sable dune</b>	5%
<b>Sable concasse</b>	45%
<b>Gravier 3/8</b>	15%
<b>Gravier 8/15</b>	35%

### 3.3 Eau

La quantité d'eau utilisée pour le gâchage représente généralement 4,5-5,6% de la masse totale des constituants secs. Tandis que la qualité de l'eau de gâchage des mélanges de BCR doit répondre aux mêmes exigences que pour un béton conventionnel. 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 (ASTMD1557-07 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 3.9). La densité sèche du BCR ( $\gamma_d/\gamma_w$ ) est calculée par la formule suivante ;  $(\gamma_d/\gamma_w) = (\gamma_h/\gamma_w)/1+\omega$

Avec :

$(\gamma_h/\gamma_w)$  : la densité humide ;

$\omega$  : la teneur en eau.

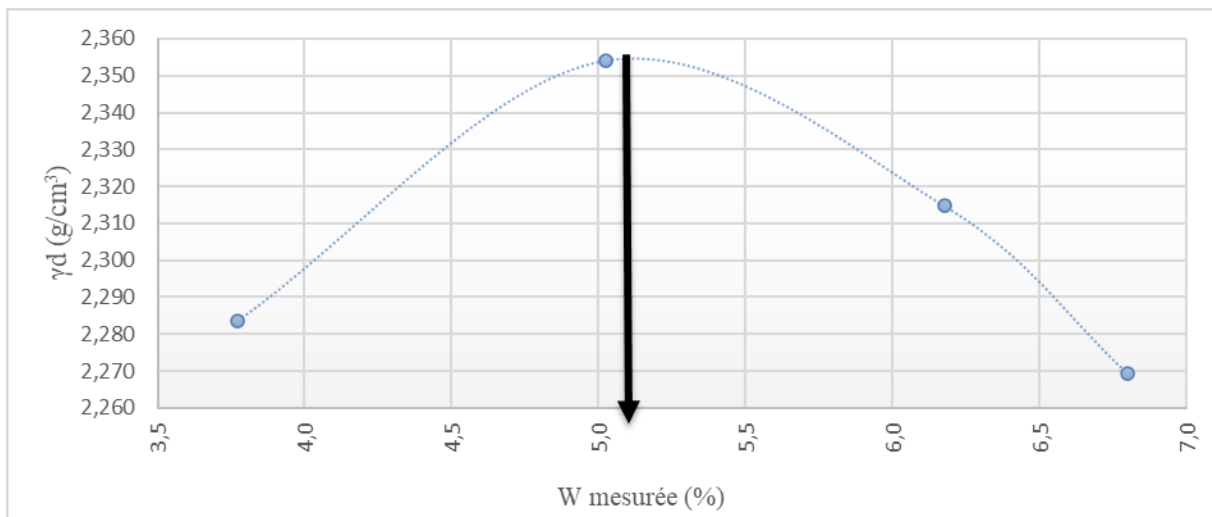


Figure 3. 10 : La teneur en eau par rapport à la masse volumique sèche du béton.

### 3.4 Ciment

Pour un mélange de BCR, la quantité de ciment représente 12 à 16% de la masse totale de ses constituants secs. Il est désavantageux d'employer une teneur en ciment trop élevée car elle augmente le phénomène de retrait. Un mélange de BCR peut être confectionné avec n'importe

quel type de ciment hydraulique, mais l'expérience montre que l'utilisation d'ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane, fumée de silice, cendres volantes) permet d'améliorer la maniabilité, les propriétés mécaniques et de faciliter les opérations de mise en place et de compactage. En plus de ces avantages techniques, l'emploi des ajouts cimentaires dans le BCR, réduit significativement le coût du projet par diminution de la quantité de ciment dans le mélange. Dans certains cas, l'utilisation des cendres volantes permet d'améliorer la compactibilité et l'aspect de la surface de roulement ( finition) par l'augmentation du pourcentage de fines dans le 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 9 et 10 montre qu'avec 14 % de ciment, la résistance obtenue est de l'ordre de 29.489 MPa à 7 jours.

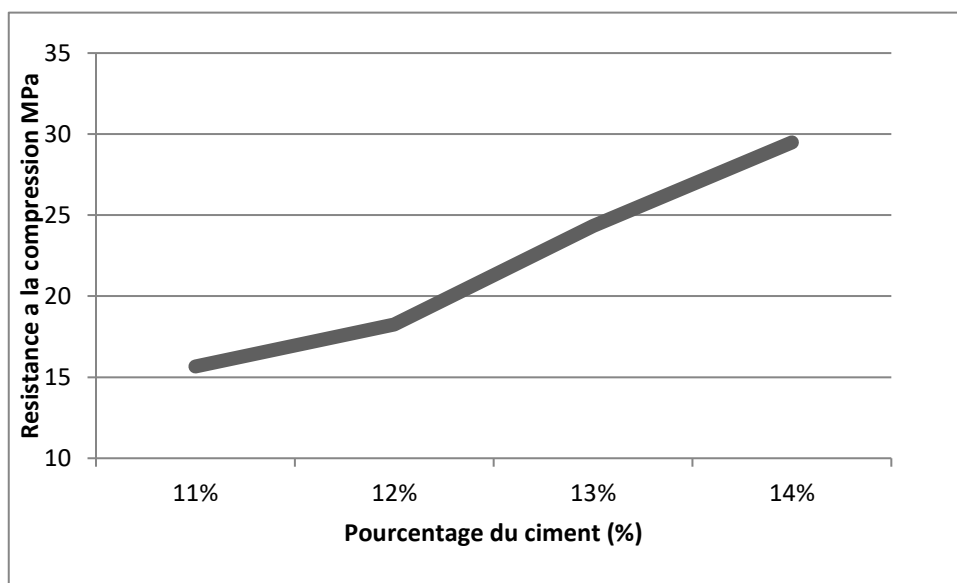


Figure 3. 11 : les résistances obtenues à 7 jours pour les différents dosage de ciment.

Après avoir déterminé la quantité de ciment adéquate pour les mélanges, on peut dresser un tableau complet, résumant tous les composants du BCR. Le tableau représente la dépense en matériaux pour 1 mètre cube de béton.

*Tableau 3. 10 : les composants du BCR pour 1m<sup>3</sup>.*

Les composants du BCR	(%)	Volume (l)	Masse (kg)	Dosage (kg/m <sup>3</sup> )
Sable dune	5%	50	125,5	98,103
Sable concasse	45%	450	1215	949,766
Gravier 3/8	15%	150	394,5	308,381
Gravier 8/15	35%	350	910	711,347
Ciment	14%	119,452	370,300	289,464
Eau	5,30%	159,811	159,811	124,924

*Tableau 3. 11 : 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. Méthode de traitement du caoutchouc :

Les particules de caoutchouc ont été lavées avec de l'eau pour retirer les impuretés adhérentes. Par la suite, elles ont été séchées à l'air pendant 72 h à température ambiante.

Après le séchage, les particules de caoutchouc ont été bien mélanger avec la fumée de silice anhydre.





*Figure 3. 12 : traitement des poudrettes de caoutchouc par la fumée de silice.*

### **5. Coulage des éprouvettes :**

Dans ce travail nous avons confectionné 105 éprouvettes de dimensions (10 x 10 x 10) cm et 63 éprouvettes de dimensions (7x 7 x 28) cm



*Figure 3. 13 : des moules 10\*10\*10 cm.*

### **Démoulage et pesage des éprouvettes après 24h**

En effet pour chaque formulation, le démoulage des éprouvettes.

# **CHAPITRE IV :**

## **Résultats et discussions.**

## 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 l'influence du caoutchouc sur le BCR. On a présenté la résistance à la compression, la résistance à la flexion ainsi que la vitesse ultrasonique. En second lieu, on a détaillé les résultats obtenus après le traitement du caoutchouc par la fumée de silice.

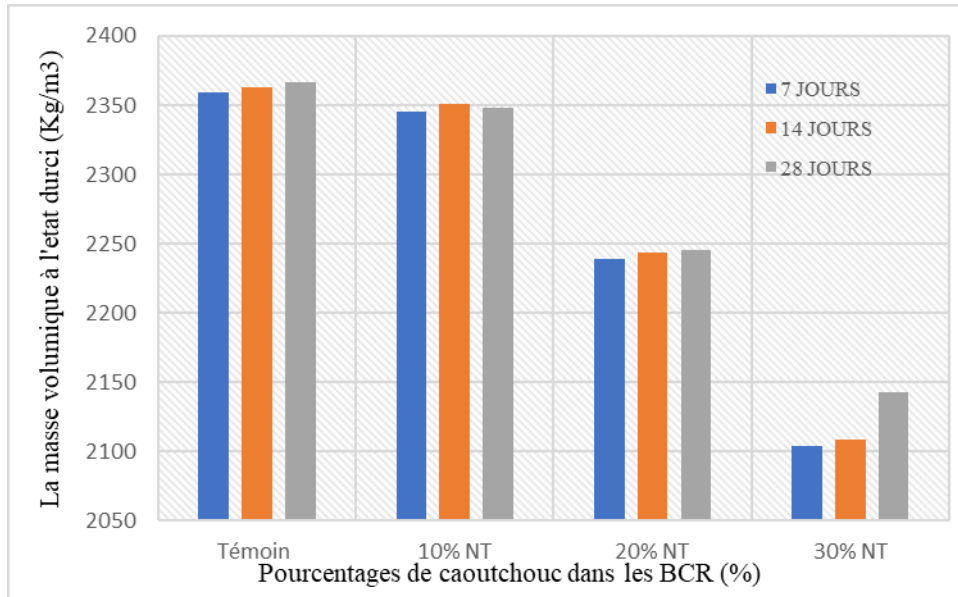
## 2. L'influence du caoutchouc sur les BCR

### 2.1 Masse volumique à l'état durci

L'effet de l'addition des poudrettes de caoutchouc sur la masse volumique de BCR est présenté dans le tableau 4.1. Pour faciliter l'interprétation, les mêmes résultats sont présentés dans la figure 4.1 sous forme d'histogramme.

*Tableau 4.1 : La masse volumique des BCR par rapport au pourcentage de caoutchouc ajouté.*

	<b>7 JOURS</b>	<b>14 JOURS</b>	<b>28 JOURS</b>
<b>Témoin</b>	2358,99	2363,37	2366,95
<b>10% NT</b>	2345,56	2351,15	2347,78
<b>20% NT</b>	2238,93	2244,01	2245,79
<b>30% T</b>	2103,58	2108,38	2142,32



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

D'après les résultats ci-dessus, on peut voir clairement l'effet qu'a eu l'ajouts du caoutchouc sur la masse volumique du BCR. En effet, chaque fois que le pourcentage du caoutchouc augmente la masse volumique diminue. Cela est due principalement à la faible densité des poudrettes de caoutchouc (0.91) par rapport à celle du sable (entre 2.51 et 2.63).

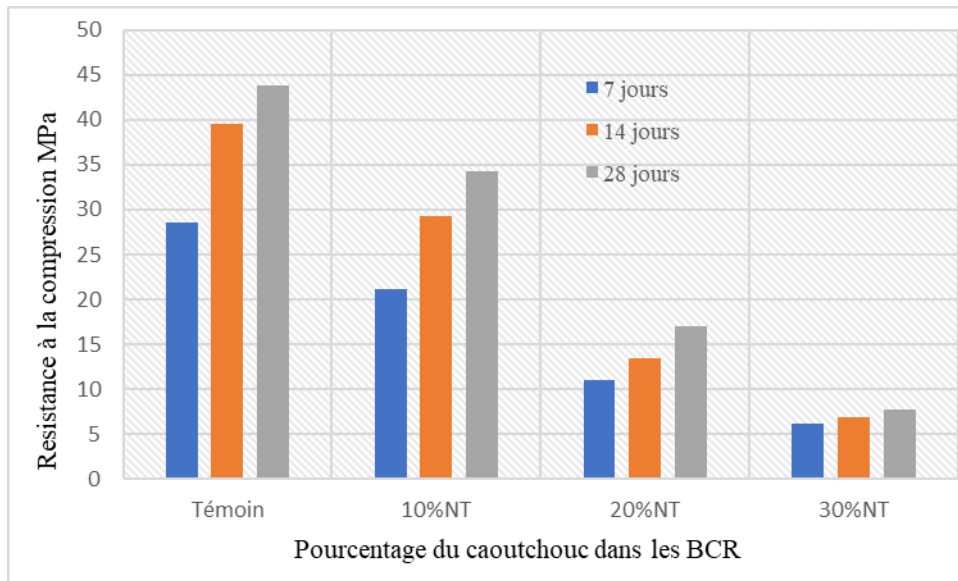
## 2.2 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression sont représentés dans le tableau 4.2 et la figure 4.2 ci-dessous.

**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	28,55	39,57	43,89
10%NT	21,16	29,29	34,23
20%NT	11,02	13,41	17,04
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.**

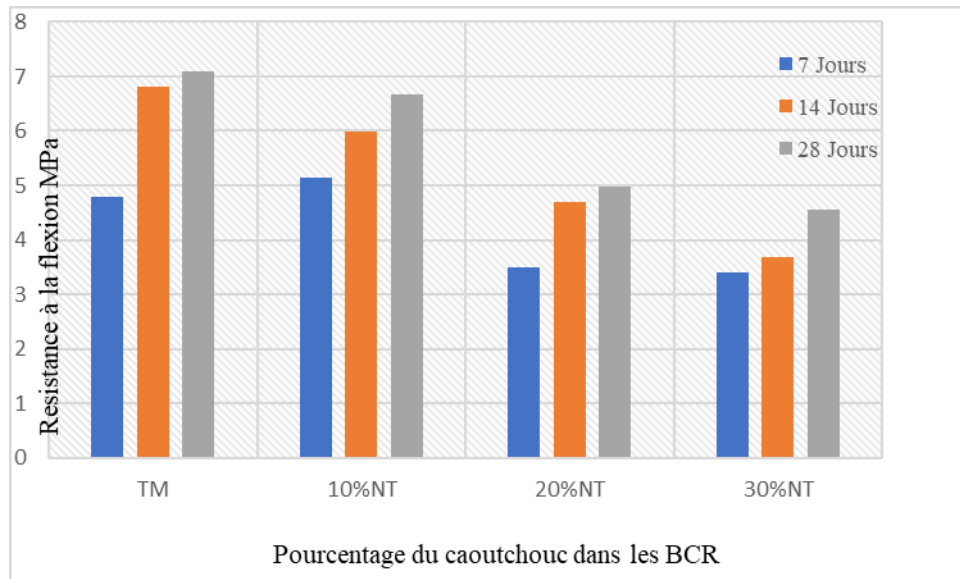
On constate que la résistance à la compression diminue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. Cela est dû principalement à la mauvaise adhérence de la poudrette de caoutchouc. De plus, la résistance du sable (sable concassé) est bien meilleure que celle des poudrettes de caoutchouc.

### 2.3 Résistance à la flexion

Pour la résistance à la flexion, des échantillons de 7\*7\*28 cm ont été préparé puis écrasé dans une presse hydraulique au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de BORDJ BOU ARRERIDJ. Les résultats obtenus sont représentés ci-dessous sous forme de tableau (4.3) et histogrammes (4.3).

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

Résistance $R_c$	7 Jours	14 Jours	28 Jours
Témoin	4,79	6,80	7,10
10%NT	5,141	5,99	6,68
20%NT	3,50	4,70	4,98
30%NT	3,39	3,68	4,55



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

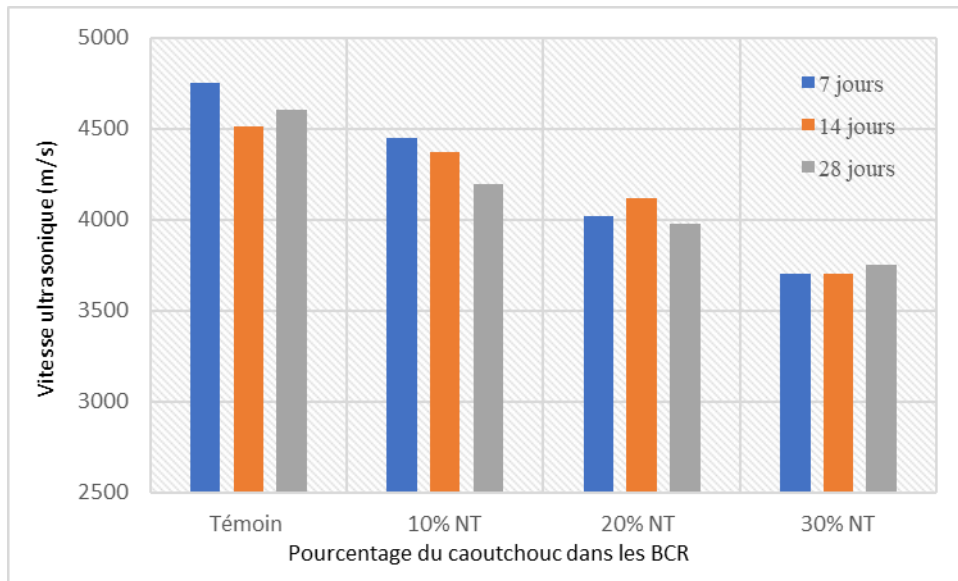
On remarque que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. Cependant, la diminution reste mineure pour le mélange avec 10% de caoutchouc. Par contre, et pour les mélanges avec 20% et 30 %, une diminution considérable a été remarqué.

## 2.4 Ultrason

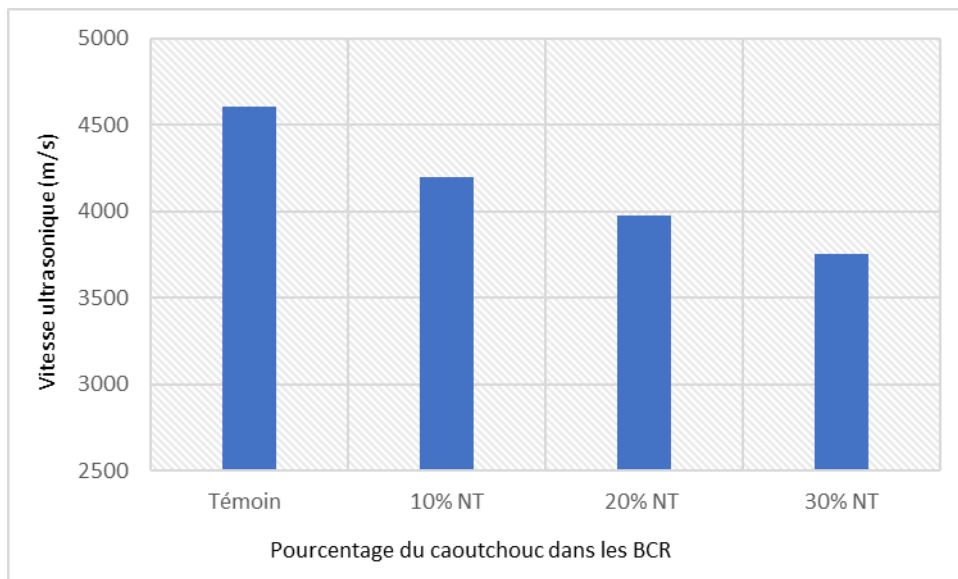
La vitesse ultrasonique a été effectuée sur des éprouvettes de 10\*10\*10 cm. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau et la figure ci-dessous.

*Tableau 4. 4 : Vitesse ultrasonique à 7, 14 et 28 jours par rapport du pourcentage de caoutchouc ajouté.*

	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	4115,23	3978,78
30% NT	3701,42	3701,42	3750,00



**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 ci-dessus montre que la vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc. Cela peut s'expliqué par la création d'une porosité supplémentaire causé par la mauvaise adhérence du caoutchouc avec la matrice cimentaire.

## 2.5 L'absorption capillaire

La figure 4.6 présente les résultats de l'absorption totale des différents mélanges de BCR.

On peut clairement voir que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.

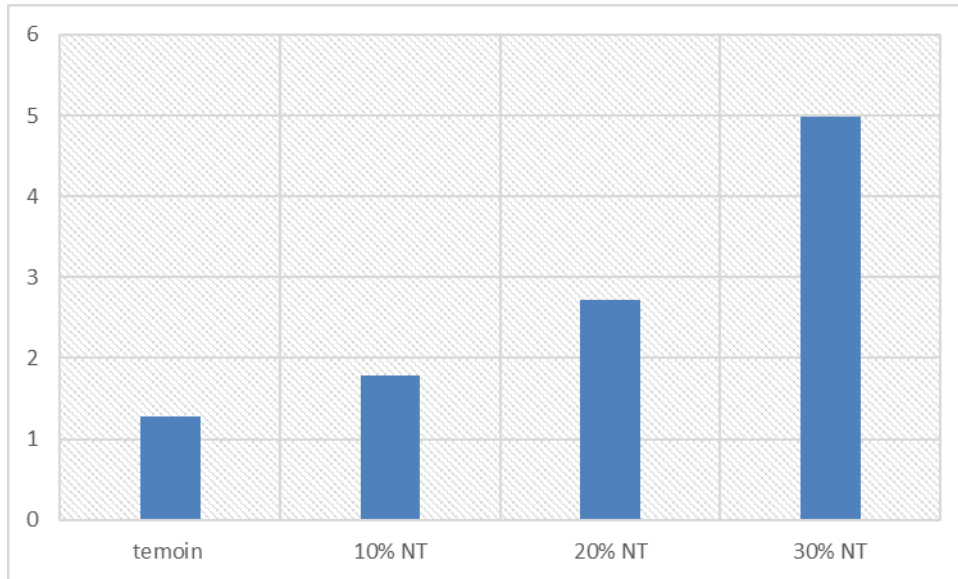


Figure 4. 6 : Absorption totale des bétons par rapport aux pourcentages de caoutchouc.

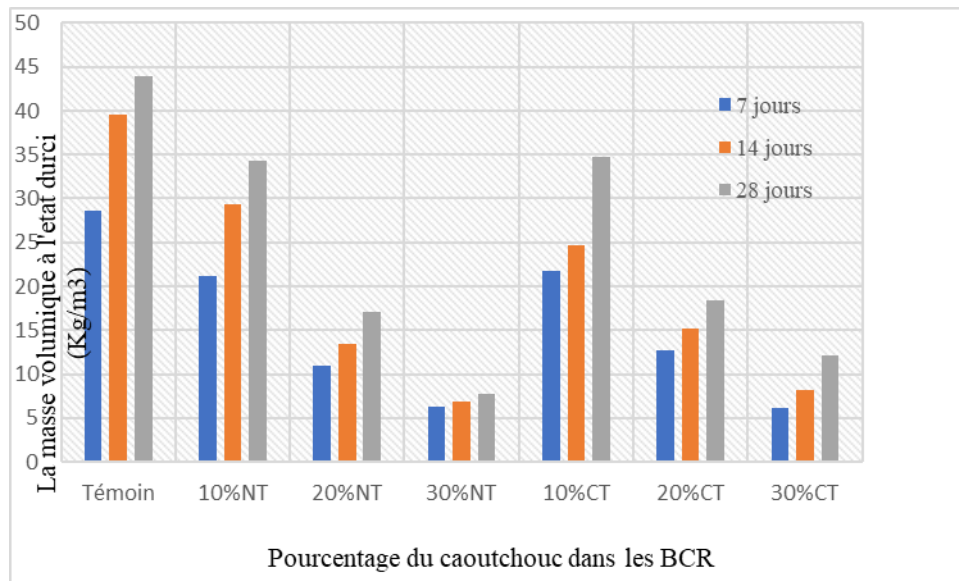
### 3. L'influence du traitement du caoutchouc sur les propriétés des BCR :

#### 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
<b>Témoin</b>	2358,99333	2363,37	2366,95333
<b>10% NT</b>	2345,56333	2351,15	2347,78333
<b>20% NT</b>	2238,93667	2244,01	2245,79333
<b>30% NT</b>	2103,58333	2108,38	2142,32333
<b>10% T</b>	2322,99667	2328,48333	2331,22333
<b>20% T</b>	2294,43	2300,87333	2309,84
<b>30% T</b>	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 et la figure ci-dessous.

**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	28,55	39,57	43,89
10%NT	21,16	29,29	34,23
20%NT	11,02	13,41	17,04
30%NT	6,23	6,93	7,81
10%CT	21,74	24,64	34,68
20%CT	12,72	15,12	18,43
30%CT	6,12	8,17	12,17

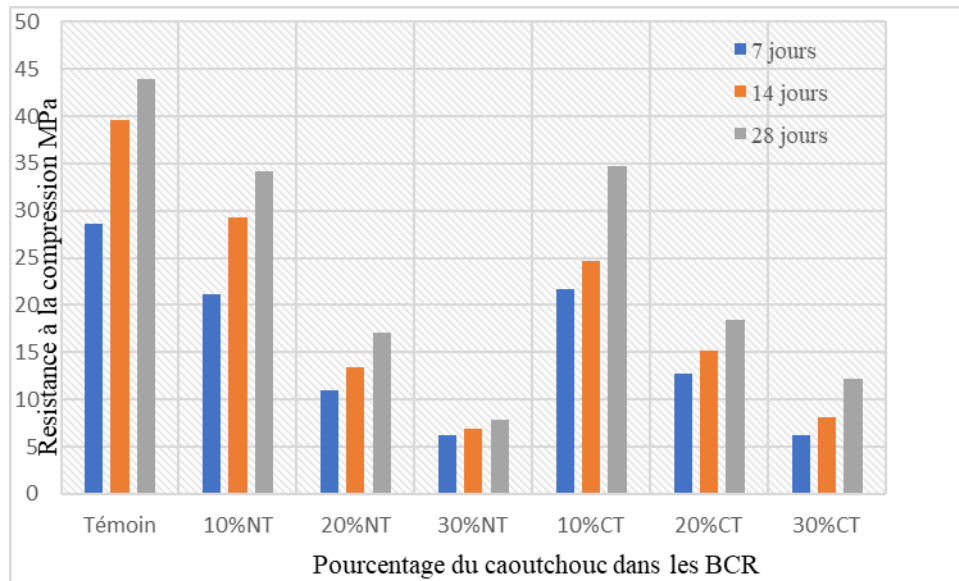


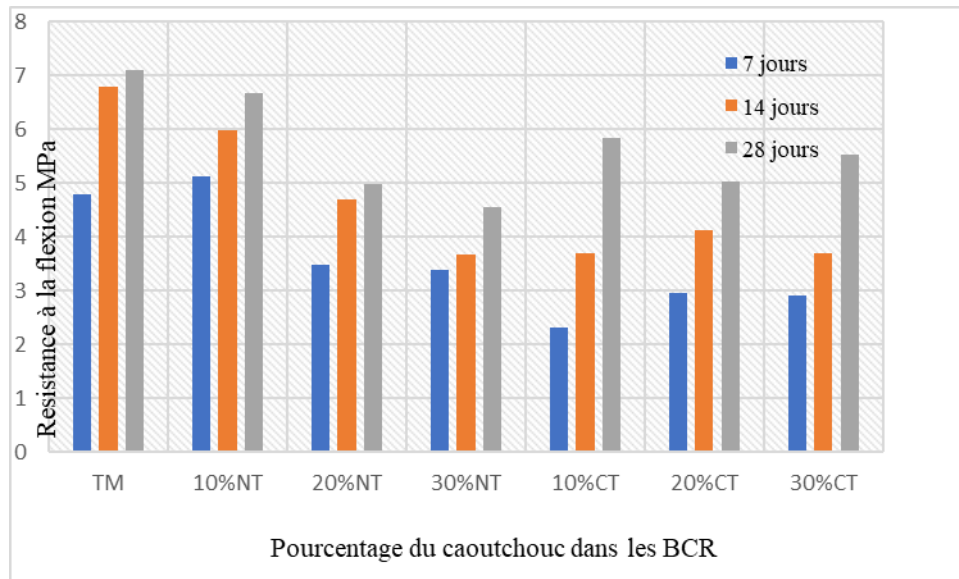
Figure 4. 8 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la compression des BCR à 7, 14 et 28 jours.

On constate, d'après la figure ..., que les mélanges avec du caoutchouc traité avec de la fumée de silice présente une meilleure résistance à la compression. On note une augmentation de 35 % pour le mélange avec 30% de caoutchouc. Cette amélioration peut être expliquée par l'effet pouzzolanique de la fumée de silice sur l'adhérence du caoutchouc avec la matrice cimentaire.

### 3.3 Résistance à la flexion

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

Résistance $R_c$	7 Jours	14 Jours	28 Jours
TM	4,79	6,80	7,10
10%NT	5,141	5,99	6,68
20%NT	3,50	4,70	4,98
30%NT	3,39	3,68	4,55
10%CT	2,33	3,69	5,84
20%CT	2,97	4,14	5,03
30%CT	2,91	3,70	5,52



*Figure 4.9 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la résistance à la flexion des BCR à 7, 14 et 28 jours.*

D'après les résultats représentés ci-dessus, on remarque que le traitement du caoutchouc par la fumée de silice a eu un effet négatif à 7 et 14 jours. Par contre, et à 28 jours, une nette augmentation de la résistance à la flexion a été observée pour les mélanges avec du caoutchouc traité par rapport aux mélanges avec du caoutchouc non traité.

### 3.4 Ultrason

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.

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	4115,23	3978,78
30% NT	3701,42	3701,42	3750,00
10% CT	4373,18	4270,46	4152,25
20% CT	4000,00	3883,49	3824,09
30% CT	3225,80	3222,34	3198,29

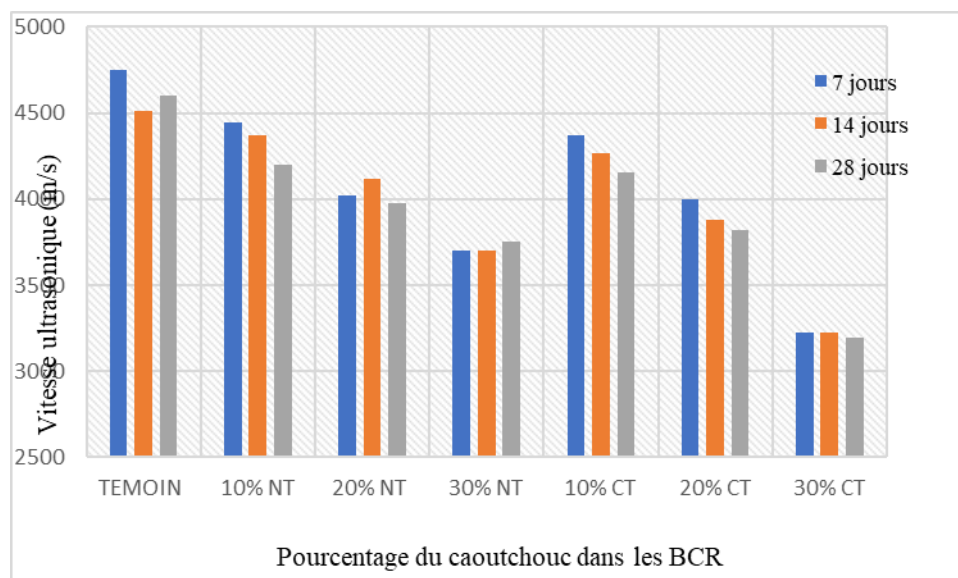
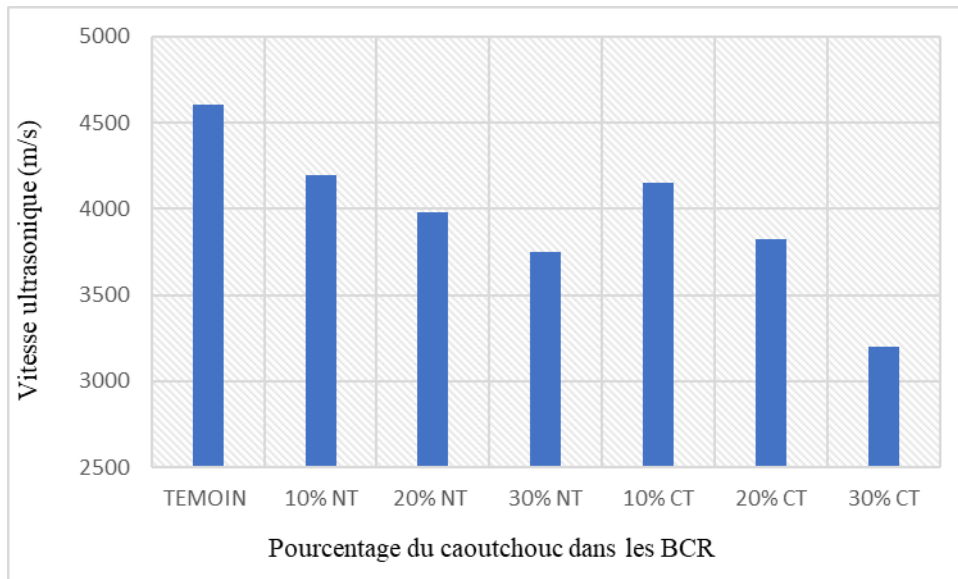


Figure 4. 10 : L'effet du traitement du caoutchouc sur la vitesse ultrasonique des BCR à 7, 14 et 28 jours.

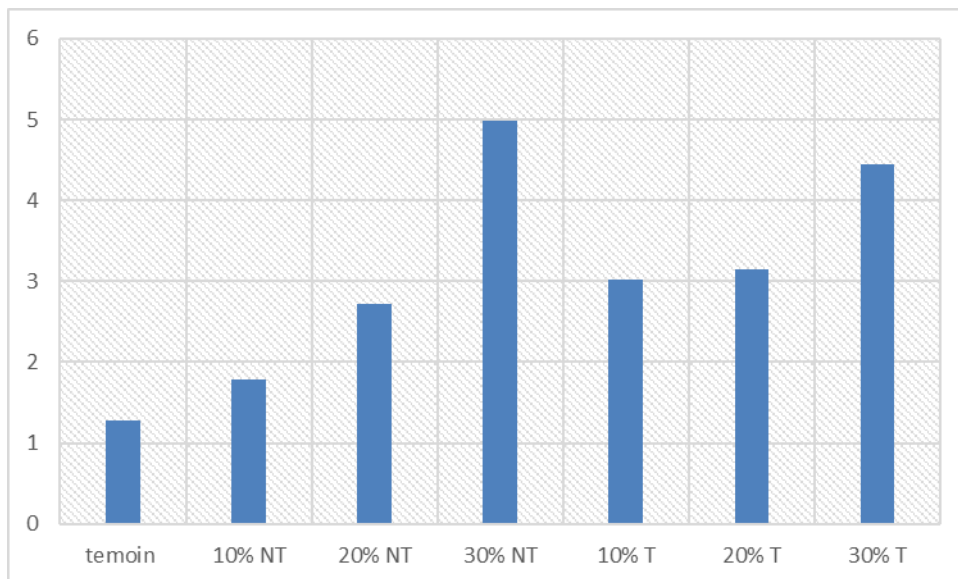
On remarque aussi que le caoutchouc non traité présente une meilleure vitesse ultrasonique par rapport au caoutchouc traité avec de la fumée de silice.





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

### 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 de la fumée de silice présente une meilleure absorption à 28 jours 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 de la fumée de silice 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 la fumée de silice a donné des résultats meilleurs par rapport au caoutchouc non traité

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

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

## References

ACI-325.10R-95 (1995). "State-of-the-art report on roller compacted concrete pavements." Manual of concrete practice, ACI manual of concrete practice, ACI, USA: 32.

Ademe, Bilan du Recyclage 2001 - 2010 volume 02 : Filières Matériaux et Filières REP Rapport Final, (2012).

ASTM-C1170/C1170M-08 (2008). "Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller compacted Concrete Using has Vibrating Table." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-D1557-07 (2007). "Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort Standards " AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

Bravo, M., De Brito, J." Concrete made with used tyre aggregate: Durability related performance". Journal of Cleaner Production. 2012, 25: 42-50.

CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT (2005). "Comparison of the permeability to water of the concrete compacted with roller (RCC) and of a mixture of conventional concrete."

CONSTANT E, "Le problème du pneu usagé non rechapableP,U,N,R", (site Internet google,fr), Oct, 1997, – Mar, 1998,

Dreamstime.com/photo-stock.

Faten, S., "Étude de la dégradation contrôlée de polydiènes : Application au recyclage des déchets pneumatiques", Thèse de doctorat. Université du Maine., (2010).

G.Petit et M.Barquins ,Matériaux caoutchouteux : morphologies , formulations , adhérence , glissance et usure , Editions PPUR presses polytechniques , 2008 ; J.Tully, The devil's milk :A Social History of Rubber,NYU Press,2011 ; FAO Statistics Division,Food and Agriculture Organization,united nations,2019.

Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pp.19-25.

J. Marchand, R. G., E. Ouellet and S. Lepage (1997). " Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete-A Review." ACI Special Publication 171.

Khatib Z. K. and Bayomy F. M (1999). Rubberized portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 206-213. Cité dans (Garros, 2007).

Kurt Reschner. Scrap Tire Recycling, 2006.

Lepage, Serge (1996) ‘‘ Étude d'un nouveau procédé de production de béton compacté au rouleau par addition de coulis de ciment dans un mélange granulaire’’ Sherbrooke (QuCbec), CANADA.

Malek KB, Marie I, ASI I, ‘‘Promoting the use of crumb rubber concrete in developing’’ 2008.

MEDDAH, A. (2015). Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques, École Nationale Polytechnique d'Alger.

OUELLET E. (1998), Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rou-leau. Mémoire de maîtrise, Département de Géniecivil, Université Laval, Canada,200pages.

SANDRA B., ANACLET T., LOINS GRANJU J, "Un composite cimentaire résistant à la fissuration : synergie « Granulats en caoutchouc – renfort par desfibres »", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC);250-251, Mai-Juin-Juil-Aout,2004countries, Waste Management, 28(2007) 2171- 2176

Seniorforums.com (site Internet google,fr) ,2022,

USACE (2000). "Engineering and Design, Roller Compacted Concrete." Engineer Manual No 1110-2-2000,.

Betonprovincial.com (site Internet) consulté en 2022.

Algerie360.com (site Internet) consulté en 2022.