



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

Amélioration de la
performance d'un béton
routier caoutchouteux

Dirigé par :
Pr. BEDDAR Miloud
Dr. MEDDAH Abdelaziz

Présenté par :
SAADAoui Othman

Promotion : 2015/2016.

Remerciement

Je tiens profondément à remercier tout d'abord ALLAH

l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.

*Je remercie infiniment mon encadreur pour son attention, ces
conseils et sa précieuse aide.*

« Meddah Abdelaziz »

*Pour avoir bien voulu encadré ce travail et pour tous ses
conseils précieux,*

*Je remercie également tous les enseignants du département de
Génie civil ainsi que ceux du membre du jury et tous les
professeurs qui ont participé à mon cursus (scolaires et
universitaire).*

*Pour cette occasion je tiens à remercier les ingénieurs du
laboratoire de génie civil surtout Yamna.*

*En fin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à tous mes amis
pour leurs soutiens moral et matériel ...*

Dédicace

A mes parents,

A mon frère et ma sœur,

A mes amis,

A toute la famille Saadaoui

RESUME

Cette étude traite le comportement d'un béton compacté au rouleau (BCR) confectionné à partir des agrégats en polymère. Les particules de caoutchouc ont été ajoutées aux mélanges par substitution d'une partie de volume totale des agrégats minéraux ; 0, 5, 10, 15, 20 et 25%. Une revue générale sur le BCR et la valorisation des déchets pneumatique est d'abord présentée, dans la partie bibliographique. La partie expérimentale de l'étude comporte une phase d'indentification des paramètres physico-mécaniques des matériaux employés avec leur méthode d'évaluation, puis une phase de caractérisation de BCR caoutchouté

Les résultats trouvés confirment au premier lieu les principale connaissances acquissent sur le BCR caoutchouté sont inversement proportionnel au pourcentage de caoutchouc ajouté, on a essayé dans ce mémoire améliorer de leur performance par traitement de caoutchouc suivant plusieurs méthodes. La modification de la rugosité de caoutchouc a conduit à des résultats satisfaisants et elle permet d'améliorer les propriétés mécaniques de BCR caoutchouté. Toutefois, le choix de la méthode de traitement dépend des exigences et la disponibilité des matériaux.

Mots clés : BCR, caoutchouc, amélioration, résistance, traitement.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Le béton compacté au rouleau

Figure 1 - photo d'une centrale mobile.....	10
Figure 2 - schéma type d'une centrale mobile	11
Figure 3 - finisseur à haut pouvoir de compactage	12
Figure 4 - rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisses.	13
Figure 5 - paramètres optimum d'un mortier pour BCR	16
Figure 6 - relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné)	16
Figure 7 - relations typique entre la masse volumique et la teneur en eau de mélange de BCR .	18
Figure 8 - relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport V_p/V_{vc} pour des mélanges de BCR sans air entraîné rapport eau/liant <0.5	20

CHAPITRE II : Valorisation des déchets pneumatiques

Figure 1 - fumée toxique qui se dégage en brulant des pneus.....	24
Figure 2 - Aspect des déchets de caoutchouc.....	27
Figure 3 - copeaux de pneus déchiquetés.....	28
Figure 4 - chantier expérimentale Pneu sol à Bou-Smail.....	29
Figure 5 - effet du caoutchouc sur la résistance à la compression.	30
Figure 6 - effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion.	30

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux

Figure 1 - l'analyse granulométrique des sables.....	40
Figure 2 - l'analyse granulométrique des graviers.....	46

CHAPITRE IV : Formulation du BCR et programme des essais

Figure 1 - fuseau granulaire recommandée.	51
Figure 2 - essai Vébé.....	54
Figure 3 - essai d'ultrason.....	55
Figure 4 - essai d'écrasement.....	56
Figure 5 - essai de flexion 3 points.....	57

CHAPITRE V : Les résultats et interprétations

Figure 1 - variation de la masse volumique en fonction de caoutchouc.	59
Figure 2 - variation du temps de compactage de BCR.....	60
Figure 3 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.....	62
Figure 4 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours.....	65
Figure 5 - variation de pourcentage des vides en fonction des pourcentages du caoutchouc.....	66
Figure 6 - variation la vitesse des ondes ultrasonique en fonction de pourcentage du caoutchouc non traité.....	67
Figure 7 - caoutchouc traité par résine et laitier non broyé après 24 heures.	69
Figure 8 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.....	70
Figure 9 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.....	71
Figure 10 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours.....	72
Figure 11 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours.....	73
Figure 12 - caoutchouc traité par H ₂ SO ₄	74
Figure 13 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.....	75
Figure 14 - la résistance à la flexion du BCR à 28 jours.....	76
Figure 15 - résistance à la compression du BCR à 28 jours en fonction de pourcentage du caoutchouc.....	77
Figure 16 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours en fonction de pourcentage du caoutchouc	77

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Le béton compacté au rouleau

Tableau 1 - caractéristique de deux bétons compactés au rouleau.....	5
---	---

CHAPITRE II : Valorisation des déchets pneumatiques

Tableau 1 - substances contenues dans les pneus usagés (de voiture dans cet exemple).	25
--	----

Tableau 2 - composition chimique des pneus usagés.....	25
---	----

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux

Tableau 1 - la masse volumique apparente du sable à l'état lâche.....	32
--	----

Tableau 2 - la masse volumique apparente du sable à l'état compact.	33
---	----

Tableau 3 - la masse volumique absolue du sables.....	34
--	----

Tableau 4 - porosité, compacité et l'indice de vide à l'état lâche.	35
---	----

Tableau 5 - porosité, compacité et l'indice de vide à l'état compact.	35
---	----

Tableau 6 - équivalent de sable visuelle.	36
---	----

Tableau 7 - équivalent de sable au piston.	37
--	----

Tableau 8 - nature et qualité du sable.....	37
--	----

Tableau 9 - Analyse granulométrique de sable de dune de Boussaâda.....	39
---	----

Tableau 10 - Analyse granulométrique de sable concassé.....	39
--	----

Tableau 11 - Analyse granulométrique de sable mix (50% sable de Boussaâda + 50% concassé).	40
--	----

Tableau 12 – Les normes soviétiques spécifient le Module de finesse des sables.	41
---	----

Sable mixte.....	41
------------------	----

Tableau 13 - Module de finesse des sables.	41
--	----

Tableau 14 - la masse volumique apparente des graviers.	43
---	----

Tableau 15 - la masse absolue des graviers.	42
---	----

Tableau 16 - degré d'absorption d'eau du gravier.	44
---	----

Tableau 17 - l'analyse granulométrique de gravier (3/8).	44
--	----

Tableau 18 - l'analyse granulométrique de gravier (8/15).	45
---	----

Tableau 19 - l'analyse granulométrique de gravier (15/20).	45
--	----

Tableau 20 - l'analyse granulométrique de caoutchouc.	45
---	----

Tableau 21 - les résultats de Los Angeles de gravier.....	46
--	----

Tableau 22 - classement la nature du gravier.....	47
--	----

Tableau 23 - composition chimique du ciment MATIN.....	47
Tableau 24 - compositions minéralogiques de ciment MATIN.....	48
Tableau 25 - les propriétés physiques de ciment MATIN.	48
Tableau 26 - masse volumique apparent de ciment.	48

CHAPITRE IV : Formulation du BCR et programme des essais

Tableau 1 - donnée de l'essai proctor modifié.....	49
Tableau 2 - tamisa de mélange des agrégats.	51
Tableau 3 - dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc.	52

CHAPITRE V : Les résultats et interprétations

Tableau 1 - les résultats de la masse volumique à l'état frais.	58
Tableau 2 - temps Vébé en fonction de la teneur en caoutchouc.....	60
Tableau 3 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentages de caoutchouc.....	61
Tableau 4 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentage de caoutchouc et 5% de laitier à 28j.....	61
Tableau 5 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentage de caoutchouc et 10% de laitier à 28 j.....	62
Tableau 6 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc à 28 j.....	63
Tableau 7 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc et 5% de laitier à 28j.	64
Tableau 8 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc et 10% de laitier à 28j	64
Tableau 9 - variation de la porosité en fonction des pourcentages du caoutchouc.	66
Tableau 10 - les résultats de la vitesse propagation d'onde ultrasonique.....	67
Tableau 11 - résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par résine et sable à 28 jours.	69
Tableau 12 - résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par résine et laitier non broyé à 28 jours.....	70
Tableau 13 - les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine et sable à 28 jours.	72
Tableau 14 - les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine et laitier non broyé à 28 jours.....	72

Tableau 15 - les résultats de la compression du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par H ₂ SO ₄	74
Tableau 16 - les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par H ₂ S O ₄	75

SOMMAIRE

RESUME.....	I
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES TABLEAUX	IV
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I : le béton compacté au rouleau

Introduction	3
I-1-Historique	3
I-2- Applications.....	4
I-3- Avantages et inconvénient du BCR.....	5
I-3-1- Avantages du BCR	5
I-3-2- Inconvénients du BCR.....	6
I-4- Sélection des matériaux	6
I-4-1- Les liants.....	6
I-4-2- Les granulats.....	7
I-4-3- L'Eau	8
I-4-4- Les adjuvants	8
I-5- Production et mise en place	9
I-5-1- Production.....	9
I-5-1-1- Les Centrales fixes.....	9
I-5-1-2 Les Centrales mobiles	10
I-5-2- Transport.....	11
I-5-3- Mise en place	11
I-6- Compactage du BCR	12
I-6-1- Matériels de compactage	12
I-6-2- Opération	13
I-7- Formulation de BCR.....	14
I-7-1- Méthodes empiriques.....	15
I-7-1-1- Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité.....	15
I-7-1-2- Méthode de formulation selon principes de géotechnique	17
I-7-2- Méthode semi-empirique	18
I-7-3- Méthode théorique	21

Chapitre II : Valorisation des déchets pneumatiques

Introduction :	22
II-1- Définition du caoutchouc.....	22
II-2- Impact environnemental des déchets pneumatiques.....	23
II-3- Composition des pneus usagés.....	24
II-4- Valorisation des pneus usagés en Génie Civil	25
II-5- Filières de valorisation	26
II-5-1- Le rechapage	26
II-5-2- La valorisation énergétique	27
II-5-3- La valorisation sous forme de matières premières	27
II-6- Déchets pneumatiques broyés	27
II-6-1- Poudrettes	27
II-6-2- Granulés	27
II-7- Utilisations des pneus usagés en Algérie	28
II-8- Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers	29
CONCLUSION	30

Chapitre III : caractérisation des matériaux

Introduction	31
III-1- Les granulats	31
III-1-1- Le sable	31
III-1-1-1- La masse volumique.....	31
III-1-1-2- La porosité et la compacité et l'indice de vide	34
III-1-1-3- Equivalent de sable	35
III-1-1-4- Analyse granulométrique	38
III-1-1-5- Module de finesse	40
III-1-2- Les graviers	41
III-1-2-1- La masse volumique du gravier	41
III-1-2-2- Porosité, compacité et l'indice des vides	43
III-1-2-3- Degré d'absorption d'eau	43
III-1-2-4- Analyse granulométrique	44
III-1-2-5- Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles)	46
III-2- Le ciment	47

Chapitre IV : formulation du BCR et programme des essais

Introduction	49
IV-1- Formulation adoptée	49
IV-1-1- Les paramètres	49
IV-1-2- Données l'essai Proctor modifié	49
IV-1-3- L'optimum Proctor	50
IV-1-4- Détermination des proportions de granulats.....	50
IV-1-5- Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc dans un (m ³).....	52
IV-2- Confection des éprouvettes en BCR	52
IV-2-1- Malaxage.....	53
IV-2-2- Compactage	53
IV-3- Procédures d'essai suivies	53
IV-3-1- Essai sur le BCR a l'état frais	53
IV-3-1-1- La masse volumique	53
IV-3-1-2- Essai Vébé (maniabilité).....	53
IV-3-2- Essai sur le BCR a l'état durci	54
IV-3-2-1- Essai d'ultrason (la vitesse propagation d'onde ultrasonique)	54
IV-3-2-2- Porosité	55
IV-3-2-3- Essai de compression	56
IV-3-2-4- Résistance à la flexion.....	57

Chapitre V : Les résultats et interprétations

Introduction	58
V-1- Effet de caoutchouc sur les propriétés du BCR	58
V-1-1- A l'état frais	58
V-1-1-1- La masse volumique.....	58
V-1-1-2- La maniabilité (temps de compactage).....	59
V-1-2- A l'état durci	61
V-1-2-1- La résistance à la compression	61
V-1-2-2- La résistance à la flexion.....	63
IV-1-2-3- La porosité.....	66
V-1-2-4- Essai d'ultrason (La vitesse propagation d'onde ultrasonique).....	67
V-2- Les traitements	68

V-2-1- Traitement par résine	68
V-2-1-1- L'opération	68
V-2-1-2- Les résultats à la compression	69
V-2-1-3- Les résultats à flexion.....	72
V-2-2- Traitement chimique par H ₂ SO ₄	73
V-2-2-1- Opération	73
V-2-2-2- Les résultats à la compression	74
V-2-2-3- Les résultats à la flexion.....	75
IV-3- Comparaison final.....	77
IV-3-1- A la compression	77
IV-3-2- A la flexion	77
CONCLUSIONS GENERALES.....	79

INTRODUCTION GENERALE

Le béton compacté au (BCR) est un nouveau matériau de construction, qu'il fournit aux concepteurs et aux chercheurs des domaines de Génie Civil et d'hydraulique plusieurs avantages tel que la rapidité d'exécution, faible cout et la durabilité. La technique du BCR est utilisée pour la réalisation des routes, autoroutes et barrages poids. Le BCR est composé des mêmes constituants qu'un béton ordinaire mais avec des proportions très différents, ce béton à deux approches ; béton du point de vue constituants et une approche sol vue don procédure de mise en place et compactage. Il contient une grande quantité des agrégats et faible quantité de liant, cette formulation génère généralement un béton très ferme, ce qui nécessite l'apport d'une énergie de compactage pour bien consolidé.

Le BCR est préparé et malaxé comme un béton mais il est mise en place et compacté comme un sol. Il est aussi défini comme un béton de consistance raide et peut être défini comme un béton à affaissement nul.

L'Algérie a entamé dans les dernières années un grand programme pour la réhabilitation des réseaux routiers et au mêmes temps a lancé des grands projets autoroutiers ; autoroutes Est-Ouest, autoroutes des hauts plateaux, etc. ses projets, sans doute, nécessitent des grandes quantités de matériaux de construction (hydrocarbures, agrégats,..). La recherche des autres techniques de construction constitue alors une préoccupation majeure pour les autorités afin de préserver les ressources naturelles et au même temps de répondre à l'exigence croissante du pays.

Dans une vision de développement durable et vu les besoins croissants des ressources en matériaux et aux exigences liées aux conditions de préservation de l'environnement, il est nécessaire d'étudier toutes les opportunités de réutilisation et valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de Génie Civil. Parmi ces produits, les déchets pneumatiques, qui sont considérés comme des déchets encombrants et polluants à cause de son effet potentiel sur l'environnement et conséquemment la santé humaine.

Notre recherche a pour objet d'étudier les caractéristiques d'un BCR contenant des particules en polymère. La démarche suivie dans étude est basé sur une approche expérimentale, dans laquelle l'effet de remplacement partiel de certaines parties des agrégats minéraux par des particules de caoutchouc, sur les propriétés physico-mécaniques est analysé aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. L'amélioration de performance de caoutchouc dans les mélanges de BCR, constitue également l'un des objectifs de ce mémoire.

Le mémoire est composé de deux parties, théorique et expérimentale. Dans la première partie une revue généralement sur la technologie de BCR est présente également les principales connaissances sur les déchets de caoutchouc. La partie expérimentale consiste à la caractérisation des propriétés de BCR caoutchouté ainsi que leurs constituants.

Pour arriver aux objectifs fixés, on a structuré le mémoire comme suit :

- Introduction générale.
- Chapitre I : le béton compacté au rouleau BCR
- Chapitre II : valorisation des déchets pneumatiques
- Chapitre III : caractérisation des matériaux
- Chapitre IV : formulation et programme des essais
- Chapitre V : résultats et interprétations
- Conclusion générale

Chapitre I : le béton compacté au rouleau

INTRODUCTION :

Le BCR est un matériau composé de granulats, de ciment portland, de matériaux cimentaire, et de l'eau. Le BCR est composé alors des mêmes constituants qu'un béton ordinaires mais avec des proportions très différentes, il se distingue des bétons ordinaires par leur affaissement nul, quantité important de granulats et une faible quantité de ciment. Le BCR est mise en place puis compactage à l'aide des engins des travaux publics (rouleau compacteur vibrant, plaque vibrantes). Le dosage en ciment varie de 60 à 350 kg/m³ selon la destination des projets et l'intensité des sollicitations qui lui appliqué. [1, 2]

Un mélange de BCR contient plus de granulats et moins de pâte que le béton plastique. Ce béton n'est pas armé et sa mise en place se fait sans coffrage. Le BCR possède une consistance nettement moins plastique que le béton conventionnel. Du point de vue structural, un revêtement en BCR est un ouvrage rigide au même titre que toute autre dalle de béton et est soumis aux mêmes critères de conception. [3]

La réalisation du BCR est faite avec les mêmes équipements généralement utilisés pour la construction des chaussées en béton. Il est produit en centrale fixe ou mobile, transporté par le camion à benne basculante et mise en place à l'aide d'épandeuse, de finisseur. Le compactage est assuré par le rouleau compacteur. L'épaisseur minimale d'une dalle de BCR est de 15 cm. Il faut à chaque fois s'assurer que la couche inférieure à la dalle a atteint un degré de compactage suffisant. [4]

Le BCR s'est développé selon deux axes différents : le BCR pour barrages et ouvrages massifs, et le BCR pour routes (pavages). La formulation, les méthodes de confection et les méthodes de mise en œuvre diffèrent en fonction du type de BCR.

I-1-Historique :

L'utilisation du ciment en construction routière date de 1935 avec le sol ciment ; Technique semblable au BCR, le sol-ciment constituait un mélange granulaire auquel on ajoutait une très faible quantité de ciment. Son but est de faire un remblai qui avait une capacité portante plus élevée qu'un remblai granulaire compacté. Cette technique a été utilisée pour faire le revêtement de voies d'accès et des cours de triage pour des entreposages forestières en Colombie Britannique.

En 1942, l'US Army Corps of Engineers procéda à la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord. [4]

Jérôme Raphaël de l'University of Californie and Berkeley est le premier chercheur qui a présenté les concepts de base du (BCR) lors de la conférence sur la construction rapide des barrages en béton en 1970. Son recherche "The Optimum Gravity Dam" proposait les concepts de mise en place et de compactage d'un remblai de sol enrichi avec du ciment à l'aide d'équipements à haute capacité de production et à forte énergie de compaction

Robert W. Cannon a repris l'idée de Raphaël et a proposé en 1972, la construction de barrages dont le corps est en béton compacté au rouleau et les faces amont et aval en béton de masse conventionnel. Selon lui, de tels barrages auraient la même configuration qu'un barrage en béton conventionnel.

L'application du BCR date de 1974 et consistait en des travaux de réhabilitation du barrage Tarbela au Pakistan, suite aux endommagements qu'avait subi son évacuateur lors de la première mise en eau du réservoir. [5]

La première application au Canada eut lieu en 1976 avec la mise en place d'une aire d'entreposage de billes de bois de 25000 ml de surface sur l'île Vancouver en Colombie britannique, La construction du premier barrage en BCR (Shirnajigawa. Japon) a débuté en 1978 et a été complétée deux ans après. [4, 5]

Après 1980, au moins dix autres pays (France, USA, Norvège, suède, Finlande, Danemark, allemande, Australie, argentine, japon) on construit chaque plus de 10 000 m² de revêtement en BCR. [2]

Après ce succès plusieurs projet ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, En Afrique, le BCR reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est développée que pour la construction des barrages, et l'utilisation de ce matériau en on pavage n'est pas encore abordée. [6]

I-2- Applications

Le BCR a connu un grand succès dans le le domaine des travaux publics pour la réalisation des route et autoroutes comme un nouveau économique et aussi permet de répondre aux exigences techniques (performance). Les barrages constituent l'une des applications majeures de ce matériau, des centaines des barrages sont réalisées à travers le monde avec cette technique. Outre les revêtements et les barrages, le BCR a des autre domaines d'applications tant

en milieu industriel qu'en milieu urbain. Il est utilisé, par exemple, pour : les aires de triage et d'entreposage de bois, les routes de transports pour l'industriel forestière et minière, les rages intermodales de conteneurs, les aires de stockage en vrac, les aires de compostage, les stationnements (véhicules lourds, militaires et automobiles), les routes municipales et urbaines et les aéroports.[7]. Le béton compact au rouleau est utilisé généralement dans les pavages (routes) et les barrages.

Caractérisations du béton	Routes	Barrages
Liant (kg/m3)	250-350	70-250
Adjuvante (% quantité totale de liant)	0-20	0-70
Rapport eau/ciment	0.3-0.4	0.4-0.8
Taille maximale des granulats (mm)	20	5
% passant tamis 4	56	35

Tableau 1 - caractéristique de deux bétons compactés au rouleau. [1]

I-3- Avantages et inconvénient du BCR :

I-3-1- Avantages du BCR :

Le BCR, Comme un nouveau procédé de construction, possède des avantages incontestables liés aux gains de temps et d'argent. On estime que le coût approximatif du BCR est 20% à 30% plus faible que celui du béton de masse conventionnel. Cette différence dans les coûts s'explique par le faible volume des matériaux cimentaires par rapport à celui des granulats, qui constituent environ 85% du volume du BCR et le autres avantage sont :

- les faibles coûts de production, de mise en place et de compactage (pas ou peu de coffrage).
- le rythme de construction rapide.
- Le taux de mise en place élevé du BCR permet, comme dans le cas de certains grands projets, de réduire le temps de construction d'une à deux années comparativement la solution en remblai. D'autres avantages liés à une construction rapide incluent aussi les coûts administratifs réduits ainsi que les bénéfices découlant d'une mise en service plus rapide de l'ouvrage. En somme. L'utilisation du BCR pour la construction d'un ouvrage offre des avantages économiques sur tous les aspects liés au temps.
- Bon résistance à compression et à la flexion : pour supporter les charges concentrées lourdes sans déformation.

- Une bonne adhérence : Les études ont démontré que le BCR permet en général une bonne adhérence qui réduit la distance d'arrêt pour être plus courte comparée à celle du béton Bitumineux, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.
- Durabilité de la chaussée pour plusieurs années.
- Confort des ouvriers.[8]
- Performance excellente à l'analyse du cycle de vie.
- Très bonne résistance à l'abrasion.
- Technologie peu complexe comparée au dallage en béton armé.
- Ne nécessite pas d'armature de résistance.
- Entretien simple.
- Ne se ramollit pas lorsqu'il fait chaud [9]

I-3-2- Inconvénients du BCR :

Le BCR présente plusieurs avantages mais comme tous les matériaux il a des inconvénients :

- la texture rugueuse. [8]
- qualité des parements.
- Difficulté d'entraîner de l'air.
- Coût de transport des matières cimentaires en régions éloignées. Dans les grands projets de construction en BCR. On utilise de plus en plus des installations de production en continu (similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux) qui ont des taux de production beaucoup plus importants. [5, 10]

I-4- Sélection des matériaux :

I-4-1- Les liants :

Son utilisation répond à pas mal d'exigences parmi lesquelles la résistance mécanique, les critères de durabilité exigés ainsi que les contraintes économiques telles que : la disponibilité et le coût des ajouts, le coût du transport, etc.

Le liant est de type hydraulique, fin, pulvérulent, et peut être :

- **Le ciment Portland : CPA-CEM J, CPI-CEM II** dont la classe varie en fonction des performances voulues.
- **les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre : CHF-CEM III, CLK-CEM III, CPZ-CEM IV, CLC-CEM V.** Ces ciments présentent un début de prise plus

lent et un durcissement plus progressif et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du BCR.

Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m³, soit une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs.

Il faut noter qu'une teneur trop élevée de ciment favorise les fissures, augmente le coût de production et ne permet pas nécessairement une augmentation des performances. [3]

I-4-2- Les granulats :

Les granulats sont définis par la norme [NF P18-101] comme étant l'ensemble de grains minéraux, les granulats peuvent être roulés (sable siliceux) ou concassé (sable calcaire, gravier, ...) et de dimensions comprise entre 0 et 125 mm. Le type de granulats et leur granulométrie influencent la qualité et propriétés du béton compacté au rouleau. Ils représentent un constituant essentiel et un élément permanent des mélanges de BCR. [3,13]

Les granulats occupent généralement entre 75 et 80 % du volume total d'un mélange de BCR. Les granulats ont donc une influence marquée à la fois sur les propriétés du BCR à l'état frais et sur celles à l'état durci.

Pour obtenir un béton ayant de bonnes résistances mécanique et une excellente durabilité, il est important de bien choisir Les granulats. Ils doivent composés de particules propres, dures, résistantes, durables, exemptes de tout produit chimique et non recouvertes d'argile ou de tous autres matériaux fins qui pourrait nuire à l'hydratation et l'adhérence de la pâte de ciment.

La forme et la texture des granulats influencent plus les propriétés du béton frais que celles du béton durci. Les particules plates et allongée ou surface rugueuse demandent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les particules arrondies ou cubiques. Pour un rapport eau/ciment donnée et une maniabilité requise, il faut donc plus de ciment si l'on utilise des particules angleuses.

La porosité, la perméabilité ainsi que l'absorption des granulats influencent la résistance au gel des bétons. La porosité des granulats varie généralement entre 0% et 50%. [14]

Certaines substances nuisibles sont présentes dans les granulats. Par exemple, une teneur trop élevée en sulfates et sulfures peut occasionner la formation d'ettringite gonflant dans le béton durci. Cela entraîne généralement un gonflement et la fissuration du béton. Les chlorures quant à eux peuvent perturber la prise du ciment, attaque les armatures et le ciment.

I-4-3- L'Eau :

Pour les mélanges de béton compacté au rouleau, la quantité d'eau requise dépend de l'optimum de compacité. Afin de déterminer la quantité d'eau à ajouter au mélange, on réalise des essais Proctor modifié. Un béton ayant une trop faible quantité d'eau nécessite une énergie de compactage élevée afin d'obtenir de bonnes densités. A l'opposé, un mélange ayant un trop grand quantité d'eau sera difficile à compacter car celui-ci sera trop fluide. Il y a donc avantage de choisir une composition de béton ayant une courbe densité / teneur en eau peu prononcée dans le but de limiter les effets des variations possibles de la teneur en eau qui sont à peu près inévitables en chantier.

I-4-4- Les adjuvants :

Les adjuvants sont utilisés dans le but de faciliter la mise en œuvre des BCR, d'adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, de réduire les coûts de mise en œuvre, d'améliorer les propriétés du BCR durci voire même de lui conférer des propriétés nouvelles.

Toutefois, dans le cas du BCR, la durée courte de malaxage et la faible quantité d'eau font qu'il y a une atténuation de l'effet des adjuvants, d'où une augmentation du dosage en adjuvant par rapport au béton plastique afin d'accroître leur efficacité. [4, 5]

Les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

- Les adjuvants retardateurs de prise

Ces adjuvants augmentent la durée de transport et de mise en place du béton, permettent de maintenir longtemps la consistance recherchée du béton ou de ménager la contrainte des reprises de bétonnage.

- Les adjuvants réducteurs d'eau

Ils ont pour rôle, à consistance égale de réduire le dosage en eau et à dosage en eau constant d'augmenter l'affaissement au cône d'Abram. Ces adjuvants sont couramment employés dans la réalisation des BCR puisque permettant une amélioration de l'homogénéité de la pâte.

- Les adjuvants accélérateurs de prise et les fluidifiants.

Ces derniers ne sont pas employés puisque entraînant une très grande maniabilité alors que l'effet d'une maniabilité trop élevée est néfaste pour un mélange de BCR (ressuage, déformation excessive à la suite du compactage).

I-5- Production et mise en place :

I-5-1- Production :

Fabriquer du béton consiste à reprendre sur stock, doser et malaxer les divers composants, granulats, ciments, eau, adjuvants, approvisionnés sur le chantier.

Le malaxage du BCR nécessite une énergie suffisante pour assurer une dispersion efficace de la faible quantité d'eau de gâchage et du ciment dans le mélange. Tout d'abord, on doit s'assurer que le malaxage est adéquat. En effet, le BCR doit être homogène ce qui permet d'avoir des propriétés mécaniques constants dans l'ouvrage et ainsi ne pas se retrouver avec des zones un peu plus faibles. De plus, le taux de production doit être suffisant. L'usine à béton ne doit pas avoir une sous-production ou une surproduction mais plutôt elle doit produire au rythme de la mise en place. Ceci évite les délais d'attente du béton les camions lors de surproduction de l'usine, ce qui provoque le séchage du béton dans les camions, ou la faiblesse des liens entre les couches s'il y a sous-production. La production du BCR n'est pas très différente de celle d'un béton ordinaire. Seul le taux de production différé.

Le BCR est produit en centrale fixe ou par une centrale mobile. Le choix du type de centrale de production dépend des caractéristiques du projet, c'est-à-dire de la proximité et de la disponibilité des unités de production, de la quantité de béton à mettre en place et du budget à investir. [11]

Pour des petits travaux, un malaxeur conventionnel peut être utilisé. Dans ce cas, le taux de production est significativement plus faible que le béton ordinaire puisque le BCR contient peu d'eau et qu'il faut donc le malaxeur plus longtemps.

I-5-1-1- Les Centrales fixes :

Ce type de centrale présente deux bascules : une pour les granulats et l'autre pour le ciment. Les bascules servent essentiellement à peser les quantités élémentaires de matériaux. Le malaxeur apporte l'eau nécessaire à la fabrication du béton. Il y a d'abord W1 pré-malaxage à sec ; on ajoute l'eau au dernier moment. Pendant cette phase, on prépare déjà la gâchée suivante. La fabrication marche en discontinu. [2, 7]

Pour assurer l'homogénéité et l'uniformité du mélange de BCR en centrale fixe et éviter toute ségrégation, une attention particulière doit être portée à certains aspects de la production. Tout d'abord, en raison des fortes sollicitations mécaniques subies par le système de malaxage, il est recommandé de réduire le volume des gâchées à environ 50 % de la capacité maximale du malaxeur pour une meilleure homogénéité du mélange. Les risques de bris mécaniques ou

hydrauliques seront ainsi réduits, ce qui évitera les arrêts de production. De plus, le temps de malaxage normalement requis pour un béton plastique est prolongé dans le cas des BCR, soit de 91 l'ordre de 3 minutes par gâchée. Généralement, le taux de production du BCR de ce type de centrale se situe entre 35 et 60 m³/heure. Il est d'ailleurs fortement recommandé de procéder au nettoyage du malaxeur à tous les 100 m³ durant la production et à la fin de chaque journée de production. Finalement, la hauteur de chute du béton frais doit être réduite au minimum pour éviter la ségrégation lors du chargement des camions à bennes basculantes.

I-5-1-2 Les Centrales mobiles :

La production en continue est assurée par un approvisionnement constant en matières premières. Les matériaux granulaires sont mis en piles, directement sur le site, en prenant soin d'éviter la ségrégation. Les trémies les contenant sont constamment alimentées à l'aide de chargeurs sur roues en évitant leur contamination. Ils sont ensuite acheminés au malaxeur par un convoyeur. Le ciment est dosé à partir de sa trémie et incorporé directement dans le malaxeur sur le convoyeur à granulats juste avant l'entrée du malaxeur. L'eau de gâchage et les adjuvants sont introduits par un système de gicleurs sur les matériaux secs à l'entrée du malaxeur. Le malaxage est à son tour assuré par deux arbres d'agitation en parallèle.

Ce type de centrale présente plusieurs avantages parmi lesquels la rapidité de mobilisation et démobilisation, la réduction du temps de transport du béton, la productivité élevée et l'efficacité de son système de malaxage. [3, 4, 12]



Figure 1 : photo d'une centrale mobile. [3]

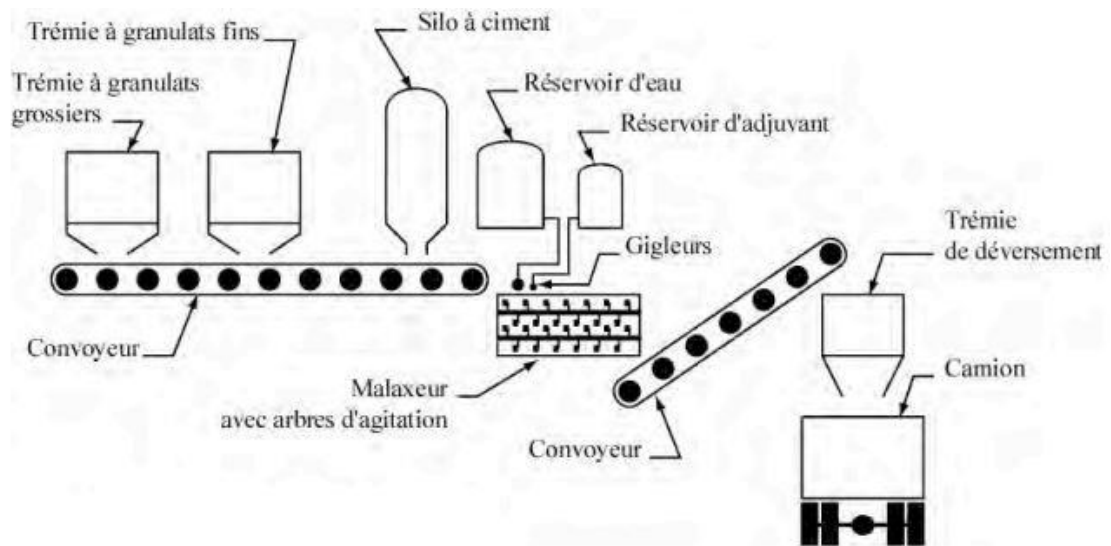


Figure 2 - schéma type d'une centrale mobile. [3]

I-5-2- Transport :

Le BCR est transporté de la centrale (fixe ou mobile) au chantier à l'aide de camions à bennes basculantes. Les camions doivent être munis de toiles de protection pour réduire l'évaporation de l'eau causée par l'action du soleil et du vent. Un retardateur d'évaporation peut également être appliqué directement sur le BCR dans la benne du camion. Les camions doivent être en nombre suffisant pour assurer une mise en place continue.

Le temps de transport du BCR de la centrale au déchargement dans la trémie du finisseur doit être limité pour assurer une mise en place adéquate. La maniabilité du BCR frais, comme montré à la figure 3.2 du chapitre 3, diminue en fonction du temps (le temps VEBE augmente). À cet effet, la durée du transport du BCR est généralement limitée à 45 minutes depuis le contact initial eau-liant jusqu'au moment du déversement du BCR au finisseur. Le temps de transport devra être réduit si la température ambiante est supérieure ou égale à 27 °C. Il faudra répandre sur la benne, juste après le chargement, un produit réducteur d'évaporation elle que les émulsions résineuses.

D'autre part, il faudra prendre toutes la précaution adéquate, aussi bien au chargement qu'au déchargement, pour éviter la ségrégation du béton. [3, 12]

I-5-3- Mise en place :

Le BCR est mis en place à l'aide d'un finisseur conventionnel à enrobé bitumineux ou d'un finisseur à haut pouvoir de compactage. Les finisseurs doivent être équipés de barres de compactage afin de pré-compacter le BCR mis en place. Les barres de compactage du finisseur

doivent être en mesure de consolider le BCR à au moins 80 % de la masse volumique humide de référence sur toute la largeur de la table du finisseur.

L'expérience en chantier a montré que, généralement, la différence d'épaisseur entre la couche de BCR à la sortie du finisseur et la couche de BCR compactée par un rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses est de l'ordre de 10 à 25 %, selon le type de finisseur.



Figure 3 - finisseur à haut pouvoir de compactage. [3]

Les finisseurs doivent être en nombre suffisant pour mettre en place le BCR à un taux minimum de 1,5 fois la capacité nominale de production du malaxeur. Tout équipement faisant défaut doit être remplacé de manière à ne pas ralentir les opérations de mise en place. [12]

D'autre part, il est recommandé de corriger les irrégularités ou inégalités de répartition à l'aide de raclettes. [3, 12]. Le délai entre le répartition et début du compactage ne doit pas excéder 10 min. compléter le compactage en dedans d'un délai de 6 minute depuis le gâchage.

I-6- Compactage du BCR :

I-6-1- Matériels de compactage :

Pour le compactage, utiliser des rouleaux compacteur tandems à cylindre d'acier lisses pouvant être utilisé en mode statique et vibratoire.



Figure 4 - rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisses.

Pour le finissage des surfaces sans couche de roulement, utiliser un rouleau compacteur polyvalent (rouleau vibrant d'acier en avant en arrière).

I-6-2- Opération :

Le degré de compactage du BCR à l'état frais influence ses propriétés à l'état durci et notamment sa résistance à la flexion.

Le compactage consiste en deux passes (on entend par une passe, un cycle complet en avant et en arrière) du compacteur à rouleau sans vibration pour consolider les matériaux, suivis de quelques passes avec vibration, généralement 4 ou plus, jusqu'à l'obtention de la compacité spécifiée. Le processus de compactage est complété par quelques passes de l'engin à pneus pour fermer les éventuels vides ou les petites fissures superficielles. A défaut d'un compacteur à pneus, on peut donner quelques passes finales du compacteur à rouleau sans vibration pour fermer la surface.

Le compactage des bords est aussi une question délicate. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les épauler avec des matériaux stables placés à l'avance, comme par exemple les bordures en zone urbaine ; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produisent.

Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale.

En tout temps lors des opérations de compactage, la surface du BCR doit être maintenue constamment humide par la vaporisation d'eau en bruine. [3, 12]

I-7- Formulation de BCR :

La méthode de formulation d'un mélange de BCR doit généralement se conformer à certaines exigences. Par exemple, la teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimum. Le rapport eau/liant du mélange doit aussi être ajusté de manière à permettre une maniabilité optimale menant à l'obtention d'une densité en place optimale avec le rouleau compacteur. Idéalement, la teneur en eau du mélange doit être maintenue juste en dessous d'une certaine valeur à laquelle le passage du rouleau compacteur provoque des ondulations du béton à l'état frais, et juste au-dessus d'un seuil où une consistance plus sèche du mélange produirait un accroissement de la ségrégation. La teneur en eau optimale dépend des granulats, du type et de la quantité de liant. Enfin, les proportions entre les différentes classes granulaires doivent être fixées de façon à atteindre la densité requise et à produire une surface fermée.

En résumé, la méthode de formulation doit avoir pour résultat un mélange de BCR le plus dense possible pour une maniabilité optimale

Indépendamment de la méthode de formulation employée, les propriétés du mélange de BCR doivent être mesurées en laboratoire avant le début des travaux. La mesure des propriétés du BCR à l'état frais (maniabilité, masse volumique) et durci (résistance à la compression et à la flexion) permet de vérifier si les exigences techniques ou celles du devis sont respectées. Des mesures de la maniabilité en fonction du temps sont d'ailleurs recommandées après le contact initial eau/liant. Ces différentes propriétés serviront notamment de valeurs de référence pour le suivi de la qualité du BCR en chantier.

Les méthodes de formulation des BCR peuvent être classées en trois catégories distinctes : méthode empirique, méthode semi-empirique et méthode théorique. [3]

I-7-1- Méthodes empiriques :

Les premières méthodes qui ont été utilisées pour formuler des mélanges de BCR sont des procédures dites empiriques. Elles demandent la réalisation d'un certain nombre de gâchées en laboratoire avant d'obtenir le mélange de BCR ayant les caractéristiques voulues. Dans certains cas, plus de 25 gâchées d'essais sont requises pour obtenir un mélange. De plus, des gâchées sont souvent requises en chantier pour ajuster la maniabilité du mélange. Simples à utiliser et relativement efficaces, ces méthodes ne sont pas très flexibles et demandent beaucoup de temps et d'énergie

Les méthodes empiriques les plus couramment employées pour formuler des mélanges de BCR. Voici deux de ces méthodes :

- Formulation respectant certaines limites de maniabilité.
- Formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

I-7-1-1- Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité :

Cette méthode de formulation de l'ACI s'applique à produire des mélanges de BCR visant à atteindre une limite de maniabilité. Elle donne généralement de bons résultats en pratique et permet de réaliser des mélanges optimisés. Les proportions du mélange de BCR sont déterminées en suivant une procédure en trois étapes :

- **L'étape 1 :**

Il s'agira de réaliser une série de gâchées d'essais de mélanges de mortier à différents rapports Eau/Ciment et à différents rapports S/C afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chacun des mélanges, la masse volumique est mesurée. Figure (5) montré qu'un rapport E/C donné correspond à un rapport S/C qui conduit à une masse volumique optimale.

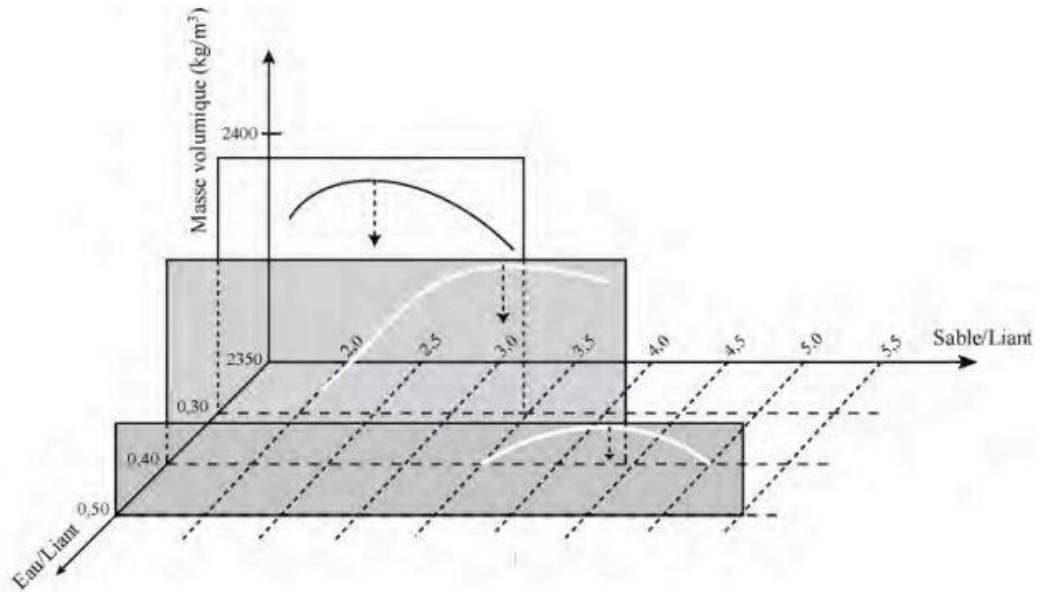


Figure 5 : paramètres optimum d'un mortier pour BCR. [3]

- **L'étape 2 :**

Elle Consiste à choisir le rapport E/C selon les propriétés mécaniques requises.

Ce choix se fera à l'aide de la courbe de la Figure (6), donnant la relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entrainé).

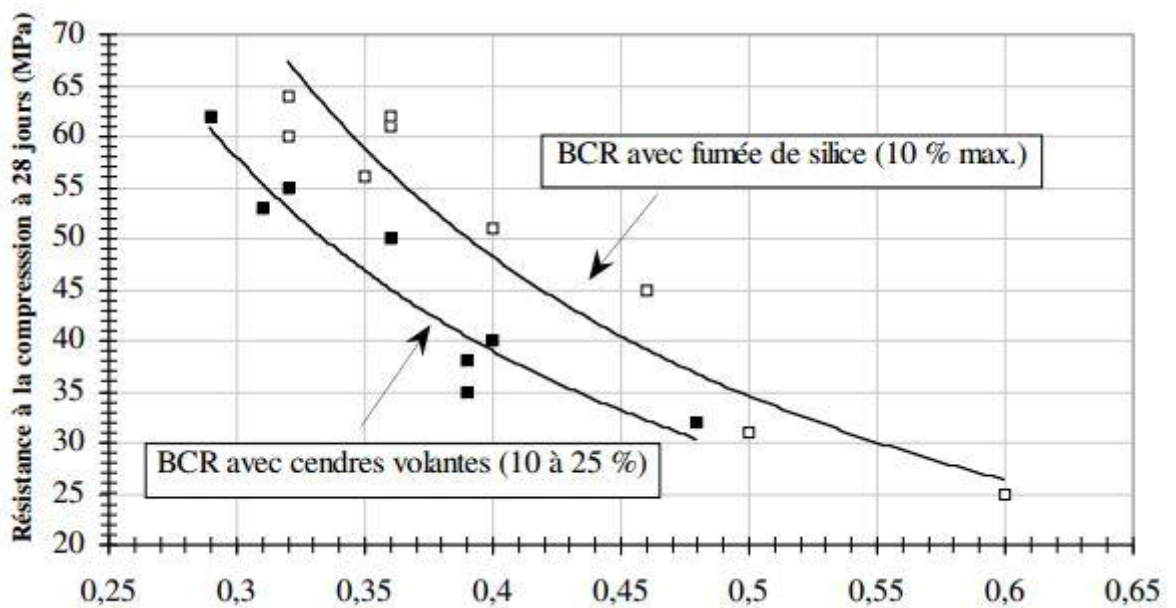


Figure 6 - relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entrainé). [3]

- **Etape 3 :**

Il s'agira tracer la droite des optimums. L'intersection de cette dernière avec E/C choisie dans l'étape 2 donne le rapport S/C adéquat. Ainsi, le mortier optimal étant obtenu. Il faudra ajouter sur ce dernier progressivement le gravier jusqu'à obtenir la maniabilité voulue.

I-7-1-2- Méthode de formulation selon principes de géotechnique :

Cette méthode repose sur une procédure de compactage des sols. Elle est basée sur la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau du BCR. Cette méthode semble plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont employés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée.

Premièrement, la proportion de granulats fins par rapport aux granulats grossiers est déterminée par les fuseaux granulométriques. Ensuite, une série de mélanges de béton à différentes teneurs en liant sont réalisés. La quantité de liant peut varier entre 11 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. Pour chaque série (c'est-à-dire, pour une teneur en liant donnée), les mélanges sont réalisés à différentes teneurs en eau entre 4 à 7%. Cette méthode permet de sélectionner la teneur en eau qui correspond à la masse volumique sèche maximale.

Chaque échantillon de béton est compacté dans un moule cylindrique avec une énergie de compactage spécifique. La masse du volume de béton ainsi compacté est mesurée et la masse volumique sèche est calculée. La relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau est mise en graphique. Comme montré à la Figure (7), la valeur maximale sur la courbe représente la teneur en eau permettant d'obtenir le mélange à masse volumique sèche optimale.

Habituellement, la masse volumique humide varie très peu dans cette portion de la courbe. Par contre, la masse volumique sèche calculée est affectée sensiblement. Finalement, les essais de résistance à la compression sont réalisés sur les mélanges à teneur en eau optimale. Le mélange ayant la teneur minimale en liant et possédant les propriétés mécaniques requises est choisi.

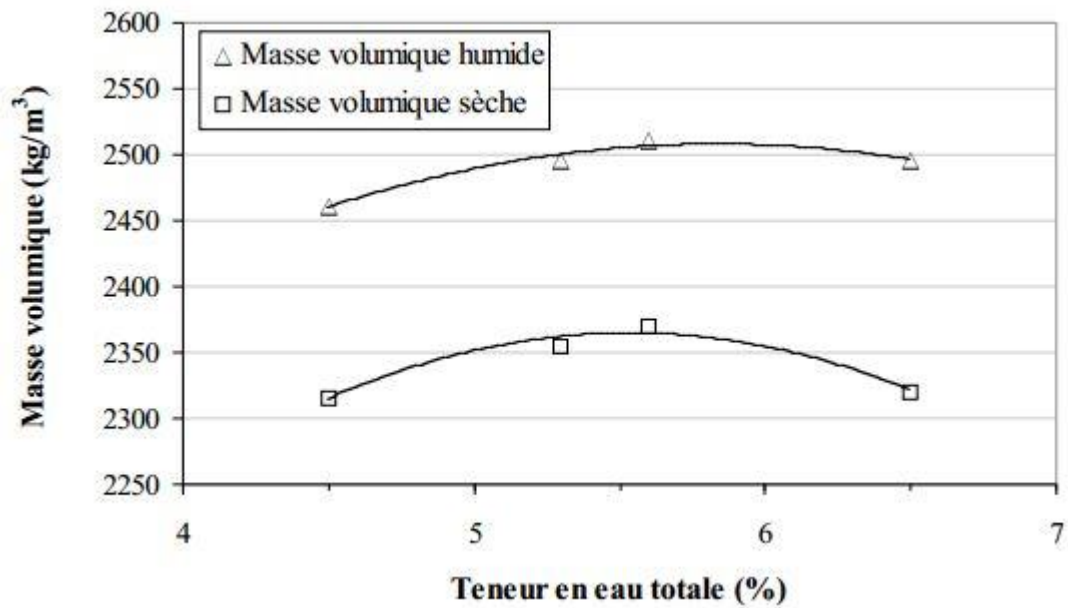


Figure 1 - relations typique entre la masse volumique et la teneur en eau de mélange de BCR. [3]

Ces deux méthodes empiriques citées ci-haut, la méthode de formulation respectant des limites de maniabilité est la plus utilisée. Généralement, cette méthode donne de bons résultats en pratique. Elle permet de réaliser, dans la majorité des cas, des mélanges optimisés. Par contre, les formulations obtenues avec la méthode reposant sur des principes de géotechnique sont souvent loin des valeurs optimales. Les courbes granulométriques prédéfinies pour déterminer les proportions des granulats grossiers et fins ont été établies à partir de valeurs moyennes déduites d'un grand nombre de mesures faites avec plusieurs types de granulats. Elles ne sont pas non plus adaptées pour formuler des mélanges avec des granulats plus ou moins marginaux.

En utilisant l'une ou l'autre de ces méthodes de formulation, plusieurs mélanges de laboratoire doivent être réalisés avant de trouver le mélange optimal. Une bonne expérience dans le domaine des BCR est d'ailleurs requise pour utiliser ces méthodes. De plus, si les constituants sont particuliers (plusieurs matériaux granulaires), le temps de formulation sera considérable.

I-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 méthodes semi-empiriques est celui du volume de pâte optimal. Les mélanges de BCR sont formulés en se basant sur un calcul de volume de pâte par rapport à un volume de vides. Cette approche requiert la réalisation de quelques gâchées d'essais en laboratoire.

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le mélange de BCR optimal devrait avoir juste assez de pâte pour remplir complètement les espaces inter granulaires restants lorsque le squelette granulaire a atteint la densité maximale après compactage. Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des propriétés physiques ou une diminution de la perméabilité

Cette méthode de formulation de BCR comporte trois étapes :

- Déterminer les proportions des différentes classes granulaires afin de produire un mélange après compactage possédant un volume de vides minimal et de mesurer le volume des vides des granulats compactés par mètre cube ;
 - Ajuster le dosage volumique de la pâte de manière à obtenir une maniabilité donnée.
 - Choisir le rapport entre l'eau et les matériaux cimentaires et les proportions de ciment et de pouzzolanes pour produire une pâte permettant de satisfaire aux exigences mécaniques.
- **Etape 1 :**

Sélection d'une granulométrie optimale et calcul du volume des vides.

Cette étape consiste à choisir les proportions des différentes classes granulaires en vue de créer un squelette granulaire avec le minimum de vides après compactage. Utilisée pour la formulation de mélange de béton bitumineux peut être utilisée pour obtenir une courbe granulométrique produisant un squelette dense.

$$P = (d/D)^{0.45} * 100$$

Avec :

d : Grosseur des tamis (mm).

D : Grosseur maximale nominale des granulats (mm).

P : Pourcentage passant (%) des particules selon le tamis de grosseur d.

- **Etape 2 :**

Sélection du volume de pâte pour une maniabilité désirée

Cette deuxième étape consiste à déterminer le volume de pâte requis afin d'obtenir une maniabilité spécifique. Plusieurs études expérimentales ont permis de mettre en évidence la relation entre la maniabilité de mélanges de BCR sans air entraîné et le rapport entre le volume de pâte et le volume des vides après compactage où : Pour un mélange de BCR sans air entraîné, le volume de pâte V_p est égal à :

$$V_p = V_{eau} + V_{ciment} + V_{ajout\ minéraux}$$

À partir de la Figure (2), on détermine le volume de pâte ($1/m^3$) requis pour une maniabilité désirée. Généralement, le rapport V_p/V_{vc} compris entre 1,0 et 1,05 permet d'atteindre une maniabilité variant de 30 à 90 secondes mesurée à l'aide de l'appareil Vébé. Une ou deux gâchées de vérification sont par ailleurs requises pour déterminer le dosage précis du volume de pâte nécessaire pour obtenir la maniabilité désirée.

Avec :

V_p : volume de pâte dans $1\ m^3$ de BCR ($1/m^3$).

V_{vc} : volume des vides dans $1\ m^3$ de granulat compacté ($1/m^3$).

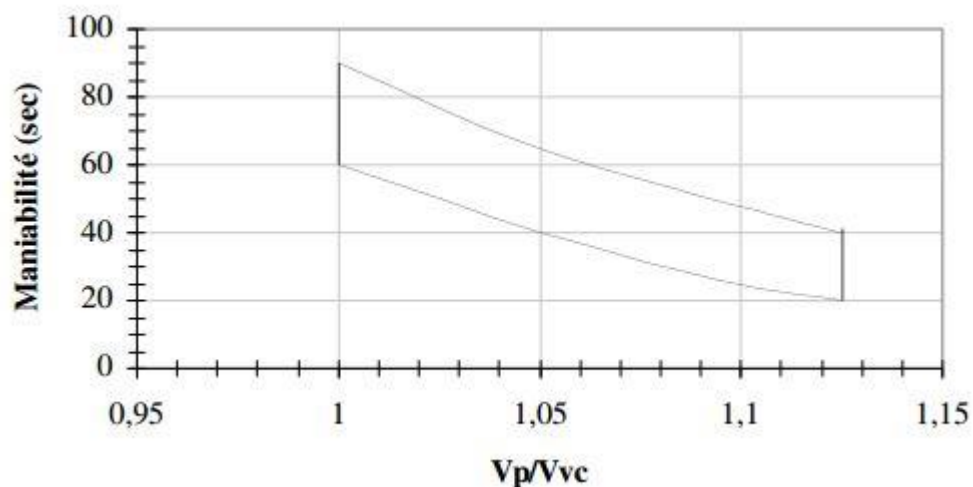


Figure 8 - relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport V_p/V_{vc} pour des mélanges de BCR sans air entraîné rapport eau/liant < 0,5. [3]

- **Etape 3 :**

Sélection du rapport E/L selon la résistance à la compression requise.

Après avoir déterminé le volume de pâte requis pour obtenir la maniabilité voulue, il s'agit, finalement, de choisir le rapport (E/L) et le type de liant afin d'obtenir la résistance mécanique spécifiée.

Le rapport E/L satisfaisant les propriétés mécaniques désirées dépend à la fois des propriétés physicochimiques du liant et des propriétés du granulat. Des gâchées d'essais sont cependant requises pour déterminer le rapport E/L optimal et pour mesurer la résistance à la flexion du béton, cette dernière propriété contrôlant la conception d'un revêtement rigide tel que celui du BCR. Pour certaines applications, le choix du rapport eau/liant est aussi gouverné par des critères de durabilité.

I-7-3- Méthode théorique : [3, 12]

L'une des percées majeures dans le domaine de la formulation de mélange de béton a été l'introduction de méthodes théoriques. Ces méthodes permettent de minimiser la porosité (ou maximiser la compacité) du squelette granulaire de mélange de béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, pierre, ciment, ajouts minéraux).

Ces méthodes théoriques ont l'avantage de prendre en considération l'influence de plusieurs paramètres sur le béton à l'état frais et durci. Parmi les méthodes théoriques de prévision de la compacité d'un empilement granulaire, le Modèle d'empilement compressible (appelé anciennement Modèle de suspension solide) développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) s'applique particulièrement bien à la formulation de mélanges de béton de ciment à compacité granulaire optimale.

Ce modèle a été utilisé avec succès pour la formulation de mélange de béton ordinaire, à haute performance et auto nivelant. Cette méthode a par la suite été adaptée par le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval à la formulation de mélange de BCR. La performance de cette méthode de formulation a été démontrée à la suite de plusieurs travaux de recherche en laboratoire et de nombreuses réalisations de revêtement en BCR dans l'Est du Canada et aux États-Unis. Basée sur des relations mathématiques, cette méthode est donc programmable. Un logiciel de calcul a d'ailleurs été développé à cet effet.

Chapitre II : Valorisation des déchets pneumatiques

Introduction :

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine du génie civil .

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde .Des centaines de millions de pneus hors d'usage ,sont générés et cumulés dans les États-Unis et de nombreux autres pays à travers le monde ,chaque année.

Depuis 2004, chaque année, l'Algérie importe en moyenne 49,62 milliers de tonnes de pneumatiques en caoutchouc, selon l'Agence Nationale de Promotion du commerce Extérieur. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 45,65 milliers de tonnes de pneus usagés, chaque année. [16]

Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation de pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde. [16]

Il y a un Quatre origines de déchets pneumatiques être signalées : [17]

- Les déchets de caoutchouc industriel.
- Les déchets de fabrication de pneumatique.
- Les pneumatiques usagés.
- Les déchets de rechapage.

II-1- Définition du caoutchouc:

Les élastomères, comme les matières plastiques, font partie de la famille des polymères .Le terme « élastomère » est utilisé aujourd'hui pour désigner d'une façon générale tous les caoutchoucs, c'est –à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchouteuse.

Le terme « caoutchouc » vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre.

Les caoutchoucs synthétiques sont obtenus par polymérisation (création de macromolécules à partir de molécules de base) et par transformation physiques en présence de catalyseurs.

Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches et antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large. [19]

II-2- Impact environnemental des déchets pneumatiques :

La priorité de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de l'effet de serre est un engagement important pour les générations futures, puisque il est considéré comme une source importante d'alimentation des différents aspects de pollution.

Malgré tous les inconvénients que les pneumatiques usagés possèdent, ils ne sont pas catégorisés comme déchets toxiques ou dangereux, car ils ne sont pas biodégradables, mais sont nuisibles pour l'environnement et santé en cas d'incendie.

Ces derniers une fois brûlés, dégagent des fumées hautement dangereuses, par sa teneur en gaz toxique sont composés par des hydrocarbures chlorés et des pléomatiques, et des dioxines, causant ainsi chaque année des maladies et des allergies ; tel que l'allergie cutanée. Ils produisent aussi une vapeur toxique (possédant des composants de silice de carbone). Les épaisses fumées se répandant dans l'atmosphère en cas d'incendie peuvent causer beaucoup de maladie respiratoire. [15]



Figure 1- fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus.

II-3- Composition des pneus usagés :

Les pneus usagés se composent essentiellement de caoutchouc synthétique ou naturel, de noir de carbone et d'oxyde de silicium, ainsi que d'acier et de tissu (Tableau 1). Les additifs qu'ils recèlent, tels que Zinc, plomb ou soufre (Tableau 02), revêtent une importance cruciale lorsqu'il s'agit d'apprécier l'impact d'une filière de valorisation sur l'environnement. Selon l'usage qui en est fait, les produits recyclés ou le mode de traitement risquent d'être incompatibles avec l'environnement, du fait de ces polluants. Il est donc opportun que les fabricants de pneus minimisent à titre préventif la teneur des additifs polluants dans leurs produits. On évite ainsi que la valorisation ultérieure des pneus usagés provoque des atteintes indésirables à l'environnement. [17]

Substance	Proportion pondérale [%]
Hydrocarbures polymérisés (caoutchouc synthétique et ou naturel)	47,0
Noire de carbone	21,5
Acier	16,5
Tissu	5,5
Oxyde de zinc	1,0
Soufre	1,0
Autres	7,5
Total	100

Tableau 1 - substances contenues dans les pneus usagés (de voiture dans cet exemple). [17]

Élément	Teneur
Carbone	Environ 70 %
Fer	16 %
Hydrogène	7 %
Oxygène	4 %
Oxyde de zinc	1 %
Soufre	1 %
Azote	0,5 %
Acide stéarique	0,3 %
Halogène	0,1 %
Liaisons cuprifères	200 mg/kg
Cadmium	10 mg/kg
Chrome	90 mg/kg
Nickel	80 mg /kg
plomb	50 mg /kg

Tableau 2 - composition chimique des pneus usagés. [17]

II-4- Valorisation des pneus usagés en Génie Civil :

a- Le tapis de pneus anti vibration :

Le tapis de pneus, composé de deux lits croisés de bandes de roulement de pneumatiques, est intercalé entre le ballast et la couche de forme (ou pose sur les tabliers des

ponts ferroviaires) pour atténuer les vibrations provoquées par diverses machines, les trains les tramways, les rames du métro, Etc.

b- La construction de récifs artificiels :

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats-Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500,000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France, cinq récifs artificiels ont été construits à Palavas – les -Flots, à Langrune-Sur-Mer, à Arcachon-Sur-Mer, à Golfe-Juan et à Port-la-Nouvelle.

c- Mur antibruit ACIAL (1992)

L'ingénieur R.Beyler a proposé un mur antibruit dont la structure absorbante est réalisée avec des pneus usagés enfermés dans un caisson métallique dont une face est perforée de trous. Les essais effectués en 1992 selon les normes AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées dans la norme, ce qui classe ce mur antibruit parmi l'un des plus intéressants.

d- Le pneu sol (1974)

Classé comme une valorisation originale, le pneu sol est un matériau inventé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et constitué de pneus entiers ou d'éléments et sols naturels ou artificiels ou de déchets. Depuis 1974, plus de deux cent cinquante ouvrages en pneu sol ont été construits (en France).

II-5- Filières de valorisation :

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit : Après le démontage des pneus usagés ; ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage .Les pneus usagés non réutilisables sont , soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés , afin de les livrer aux vaporisateurs .La valorisation des pneus usagés , peut se présenter sous l'une des formes suivantes. [16]

II-5-1- Le rechapage :

Permettant d'allonger considérablement la vie du pneu, le rechapage est la première solution de recyclage. Cette technique consiste à changer les bandes de roulement des pneus usagés, en les remplaçant par des bandes de roulement neuves. Cette technique a pour cible les pneumatiques usagés dont les carcasses ont gardé intacte l'ensemble de leurs qualités

intrinsèques et notamment leurs durées de vie. Cette activité génère à son tour des déchets, dont la poudrette de caoutchouc.

II-5-2- La valorisation énergétique :

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique (3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel).

II-5-3- La valorisation sous forme de matières premières :

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux pour diverses applications.

II-6- Déchets pneumatiques broyés :

II-6-1- Poudrettes :

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2 mm (Figure 2). Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes ...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface) ... etc.



Figure 2 - Aspect des déchets de caoutchouc. [20]

II-6-2- Granulés :

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes (Figure 3). Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques, comme exemple d'utilisation,

on a aires de jeux , les pavés antidérapants , les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples , diminution des nuisances sonores)

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la mécaniques), ou la Pyrolyse –Thermolyse.

Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone ... etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.



Figure 3 - copeaux de pneus déchiquetés. [18]

II-7- Utilisations des pneus usagés en Algérie :

Le gisement Algérien de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre pour les véhicules poids lourds de 200000 tonnes /an (19 .millions de pneus). Mais les quantités valorisées sont très limitées, nous notons quelque types d'utilisation : [17]

- Utilisées en agriculteur pour renforcer les petits barrages et comme Siège dans les jardins traditionnelles.
- Applications de résidus de copeaux de pneus en structure sous chaussée.
- Pour la Stabilité d'un talus.
- Rechapage pneus usagés à El Eulma.
- Utilisation pour couvrir les conducteurs électriques.
- Pneu sol, déjà utilisé dernièrement à Alger par une société Italienne. (Figure 4)
- Stabilité d'un glissement de terrain.



Figure 4 - chantier expérimentale Pneu sol à Bou-Smail. [16]

II-8- Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers :

La possibilité de valorisation des déchets pneumatiques dans le béton sous d'agrégats a été l'objet de nombreuses recherches expérimentales. Ces recherches ont avaiant pour finalité que l'incorporation des déchets pneumatiques dans les bétons effectuent leurs proportions physico-mécanique aussi bien à l'état durci.

Les principales conclusions tirées à parti de ces études c'est que l'incorporation des particules des caoutchoucs diminue la densité et les paramètres de résistance du béton et augmenter la ductilité de ces matériaux. (Figure 5, 6)

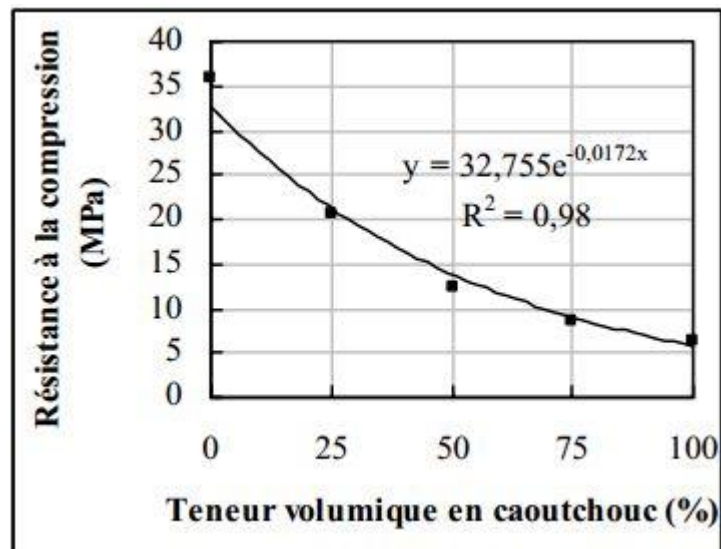


Figure 5 - effet du caoutchouc sur la résistance à la compression. [20]

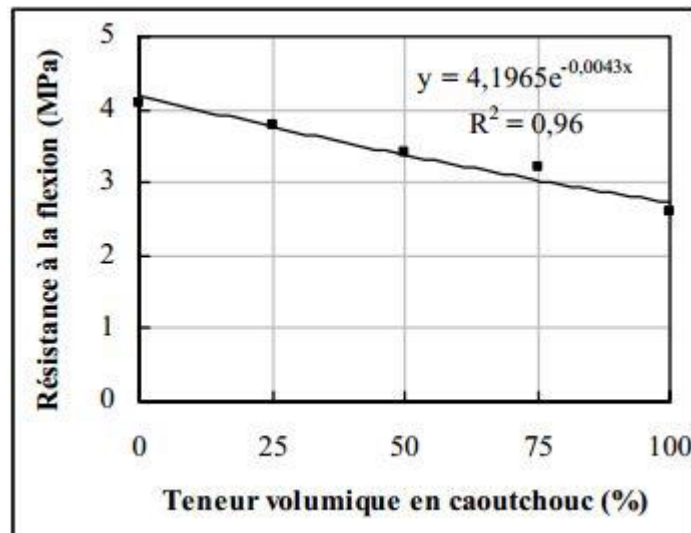


Figure 6 - effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion. [20]

CONCLUSION :

L'idée de la valorisation des pneumatiques usagés constitue actuellement une priorité très motivante sur le plan environnemental qu'économique. En effet le pneu usagé est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utiles, en conséquence le Génie Civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des pneumatiques usagés, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Table des matières

Chapitre II : Valorisation des déchets pneumatiques.....	22
Introduction :.....	22
II-1- Définition du caoutchouc:.....	22
II-2- Impact environnemental des déchets pneumatiques :.....	23
II-3- Composition des pneus usagés :.....	24
II-4- Valorisation des pneus usagés en Génie Civil :.....	25
II-5- Filières de valorisation :.....	26
II-5-1- Le rechapage :.....	26
II-5-2- La valorisation énergétique :.....	27
II-5-3- La valorisation sous forme de matières premières :.....	27
II-6- Déchets pneumatiques broyés :.....	27
II-6-1- Poudrettes :.....	27
II-6-2- Granulés :.....	27
II-7- Utilisations des pneus usagés en Algérie :.....	28
II-8- Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers :.....	29

Chapitre III : caractérisation des matériaux

Introduction :

Car la performance et la durabilité d'un BCR sont inspirées de la qualité des différents constituants. Dans ce chapitre nous présentons les caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail.

III-1- Les granulats :

Les granulats sont définis par la norme [NF P18-101] comme étant l'ensemble de grains minéraux, Les granulats peuvent être roulés (sable siliceux) ou concassés (sable calcaire, gravier, grave...).

III-1-1- Le sable :

Ce sont des granulats dont la taille est comprise entre 0 et 5 mm, dans cette étude, on a utilisé deux type de sable, sable de dune (SD) de couleur jaune provenant de (Boussaâda) et sable concassé (SC) de couleur gris provenant de la carrière

III-1-1-1- La masse volumique :

a- La masse volumique apparente :

*La masse volumique apparente à l'état lâche :

La masse volumique apparente d'un sable est la masse occupant l'unité de volume, tous vides compris

Mode opératoire :

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardiste de capacité 2 à 2.5 L.
- On remplit l'entonnoir avec sable sec.
- On pèse le récipient vide de capacité 0.9 L, soit M_1 ce poids.
- En place le récipient sous l'entonnoir a une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente ρ_{app} du sable est donnée par la formule suivant :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

M_1 : Masse du récipient vide (g).

M_2 : Masse du récipient plus le sable (g).

V_r : Volume du récipient (ml).

Résultats :

Type de sable	N° d'essai	M_2 (g)	M_1 (g)	V (ml)	ρ_{app} (kg/L)	$\rho_{app moy}$ (kg/L)
S_1	1	1402	117	900	1.42	1.413
S_1	2	1386			1.41	
S_1	3	1391			1.41	
S_2	1	1327			1.34	1.34
S_2	2	1351			1.37	
S_2	3	1340			1.35	
S_3	1	1443			1.47	1.47
S_3	2	1463			1.49	
S_3	3	1448			1.47	

Tableau 1- la masse volumique apparente du sable à l'état lâche.

*Masse volumique apparente à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains. Généralement elle est supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire

Même méthode que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient on soumet ce dernier à 30 secousses manuelles. On complète le remplissage du récipient après le tassement du sable, puis on nivelle ce dernier et on le pèse. Soit M_2 le poids de l'ensemble (sable + récipient), la masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

M_1 : Masse du récipient vide (g).

M_2 : Masse du récipient plus le sable (g).

V_r : Volume du récipient (ml).

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau :

Type de sable	N° d'essai	M_2 (g)	M_1 (g)	V (ml)	ρ_{app} (kg/L)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/L)
S_1	1	1680	117	900	1.736	1.748
S_1	2	1706			1.765	
S_1	3	1687			1.744	
S_2	1	1699	114		1761	1.762
S_2	2	1702			1.764	
S_2	3	1699			1.761	
S_3	1	1729	117		1.791	
S_3	2	1708			1.767	
S_3	3	1702			1.761	

Tableau 2 - la masse volumique apparente du sable à l'état compact.

Note :

S_1 : Sable de dune (Boussaâda).

S_2 : Sable concassé.

S_3 : Sable mixte (50% de dune + 50% concassé).

b- La masse volumique absolue :

Elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

Mode opératoire :

La masse volumique absolue de sable est déterminée à l'aide d'un récipient de 1000 (cm^3) on prend 3 échantillons de différentes masses en (g).

On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 (ml) et on y verse différentes volume d'eau, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y excite.

Après cette opération, on détermine le volume finale occupé par le mélange sable-eau, soit V_1 (ml) ce volume.

La masse volumique absolue du sable est calculée par la formule suivant :

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

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau :

Type de sable	N° d'essai	V_2 (ml)	V_1 (ml)	M (g)	ρ_{abs} (kg/L)	$\rho_{abs moy}$ (kg/L)
S_1	1	100	138	100	2.36	2.59
S_1	2	120	167	120	2.55	
S_1	3	120	178	150	2.58	
S_2	1	156	100	150	2.678	2.63
S_2	2	166	120	120	2.60	
S_2	3	158	120	100	2.63	
S_3	1	365	250	300	2.61	2.605
S_3	2	365	250	300	2.61	
S_3	3	366	250	300	2.59	

Tableau 3- la masse volumique absolue du sables.

III-1-1-2- La porosité et la compacité et l'indice de vide : (NF P 18-554)**a- Porosité :**

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

$$P (\%) = [1 - \rho_{app} / \rho_{abs}] \times 100$$

b- Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C (\%) = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

c- L'indice des vides :

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

$$e = (V_v / V_s) = P / (100 - P)$$

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans les tableaux :

Sable	P(%)	C (%)	e(%)
Sable de dune	44.58	55.42	0.804
Sable concassé	40.68	59.32	0.685
Sable mixte 50%	43.19	56.81	0.760

Tableau 4 - porosité, compacité et l'indice de vide à l'état lâche.

Sable	P(%)	C (%)	e(%)
Sable de dune	32.24	67.76	0.475
Sable concassé	29.52	70.48	0.418
Sable mixte 50%	31.93	68.07	0.469

Tableau 5- porosité, compacité et l'indice de vide à l'état compact.

III-1-1-3- Equivalent de sable :

Cet permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à maille carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux sédimentent et les éléments fin qui flocculent.

But de l'essai :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

Matériels utilisés :

- Eprouvettes cylindriques.
- Un bouchon de caoutchouc pour fermer l'éprouvette.
- Tube laveur et entonnoir.
- Un flacon.
- Une machine d'agitation électrique.
- Piston taré a masse coulissante de 1 kg.

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable
- Prendre une pesée de 120g.
- Remplir l'éprouvette de solution la vente jusqu'au première repère.
- A l'aide de l'entonnoir verse la prise d'essai dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprise avec la paume de la main afin de chasser toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer pendant 10mn.

- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon et lui imprimer 90 cycles de 20cm de cours horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution la vante au-dessus de l'éprouvette, rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le roule enter le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter les éléments fins et argileux. Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution la vante atteigne le 2eme repère. Laisser ensuite reposer pendant 20mn.

a- L'équivalent de sable visuel (ESV) :

Après 20mn, lire la hauteur h_1 du niveau supérieure du flocculant jusqu'au fonde de l'éprouvette à l'aide d'une réglette. Mesure également avec la règle la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieure de la partie sédimentaire et le fonde de l'éprouvette.

$$ESV = \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \times 100$$

b- Equivalent de sable au piston (ESP) :

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette. Introduire le réglett dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$ESP = \left(\frac{h'_2}{h_1} \right) \times 100$$

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans les tableaux :

N° de l'essai		1	2	3
La hauteur h_2	S_1	13.5	13	13
	S_2	7.6	7.2	7.8
	S_3	8.7	8.7	8.8
La hauteur h_1	S_1	7.8	8	8
	S_2	11.5	11.4	11.7
	S_3	10.7	10.8	11
ESV	S_1	57.78	61.53	61.53
	S_2	66.08	63.15	66.66
	S_3	81.30	80.55	80
ESV moyenne	S_1	60.28		
	S_2	65.29		
	S_3	80.61		

Tableau 6 - équivalent de sable visuelle.

N° de l'essai		1	2	3
La hauteur h'_2	S_1	6.6	6.2	6.2
	S_2	8.0	8.0	7.9
	S_3	8.1	8.05	8.2
La hauteur h_1	S_1	7.8	8	8
	S_2	11.5	11.4	11.7
	S_3	10.7	10.8	11
ESP	S_1	48.88	47.69	47.69
	S_2	69.56	70.17	69.08
	S_3	75.70	74.53	74.54
ESP moyenne	S_1	48.08		
	S_2	70.13		
	S_3	74.92		

Tableau 7- équivalent de sable au piston.

E.S.V	E.S.P	NATURE ET QUALITE DU SABLE
E.S < 65	E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65 < E.S < 75	65 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 < E.S < 85	70 < E.S < 80	Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
E.S > 85	E.S > 80	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuses risque d'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

Tableau 8 - nature et qualité du sable.

Interprétation :

On constate que :

$$75\% < \text{ESV} < 85\% \quad \text{et} \quad 70\% < \text{ESP} < 80\%$$

- Sable mixte 50% sont des Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

$$65\% < \text{ESV} < 70\% \quad \text{et} \quad 70\% < \text{ESP} < 80\%$$

- **Sable concassé** : C'est un sable légèrement argileux convenant parfaitement pour le béton de qualité courante.

$$E.S < 65 \quad \text{et} \quad E.S < 60$$

- **Sable de dune** : Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité

III-1-1-4- Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 5 mm et inférieures à 0.02 mm avec le passage de sable sur les tamis (5 mm et 0.02 mm).

But de l'essai Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de détecter et miner la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des filets.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulats. L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension.
- En déduire le module de finesse (M_f).

Matériel nécessaire :

Des tamis dont les ouvertures carrés, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.

Mode opératoire :

- Prélever (2 kg) de sable sec.
- Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propres et secs dont l'ouverture des mailles est respectivement de haut en bas : **(5-2.5-1.25-0.63-0.315-0.125-0.08)**. La colonne est coiffée par un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis et un couvercle pour éviter la dispersion de poussières. On commence par peser les tamis ainsi que le fond.
- Verser le sable sec sur la colonne et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 10 mn. Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.

- Peser chaque tamis séparément 1 g près. Soit M_i la masse de tamis (1) + le sable. La différence entre M_i et m_i correspond au refus partiel R_1 du tamis 1.
- Reprendre l'opération pour le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le sixième tamis à R_1 , soit R_2 la masse du refus cumulé du tamis 2 ($R_2=R_1$ +refus partiel sur tamis).
- Poursuivre l'opération avec le reste des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumulés $R_3, R_4 \dots$

Le tamisât cumulé est donné la relation suivante Résultats :

$$T = 100 - R_c$$

T : tamisât en %.

R_c : refus cumulés en %.

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans les tableaux :

tamis (mm)	refus partiel(g)	refus cumulés(g)	refus cumulés (%)	tamisât cumulés(%)
5	0	0	0	100
2,5	11	11	0,55	99,45
1,25	112	123	6,15	93,85
0,63	238	361	18,05	81,95
0,315	681	1042	52,1	47,9
0,125	903	1945	97,25	2,75
0,08	41	1986	99,3	0,7
fond	11	1997	99,85	0,15

Tableau 9 - Analyse granulométrique de sable de dune de Boussaâda.

tamis (mm)	refus partiel(g)	refus cumulés(g)	refus cumulés (%)	tamisât cumulés(%)
5	0	0	0	100
2,5	12	12	0,6	99,4
1,25	631	643	32,15	67,85
0,63	615	1258	62,9	37,1
0,315	457	1715	85,75	14,25
0,125	209	1924	96,2	3,8
0,08	61	1985	99,25	0,75
fond	12	1997	99,85	0,15

Tableau 10 - Analyse granulométrique de sable concassé.

tamis (mm)	refus partiel(g)	refus cumulés(g)	refus cumulés (%)	tamisât cumulés(%)
5	0	0	0	100
2,5	12	12	0,6	99,4
1,25	378	390	19,5	80,5
0,63	359	749	37,45	62,55
0,315	515	1264	63,2	36,8
0,125	578	1842	92,1	7,9
0,08	142	1984	99,2	0,8
fond	14	1998	99,9	0,1

Tableau 11 - Analyse granulométrique de sable mix (50% sable de Boussaâda + 50% concassé).

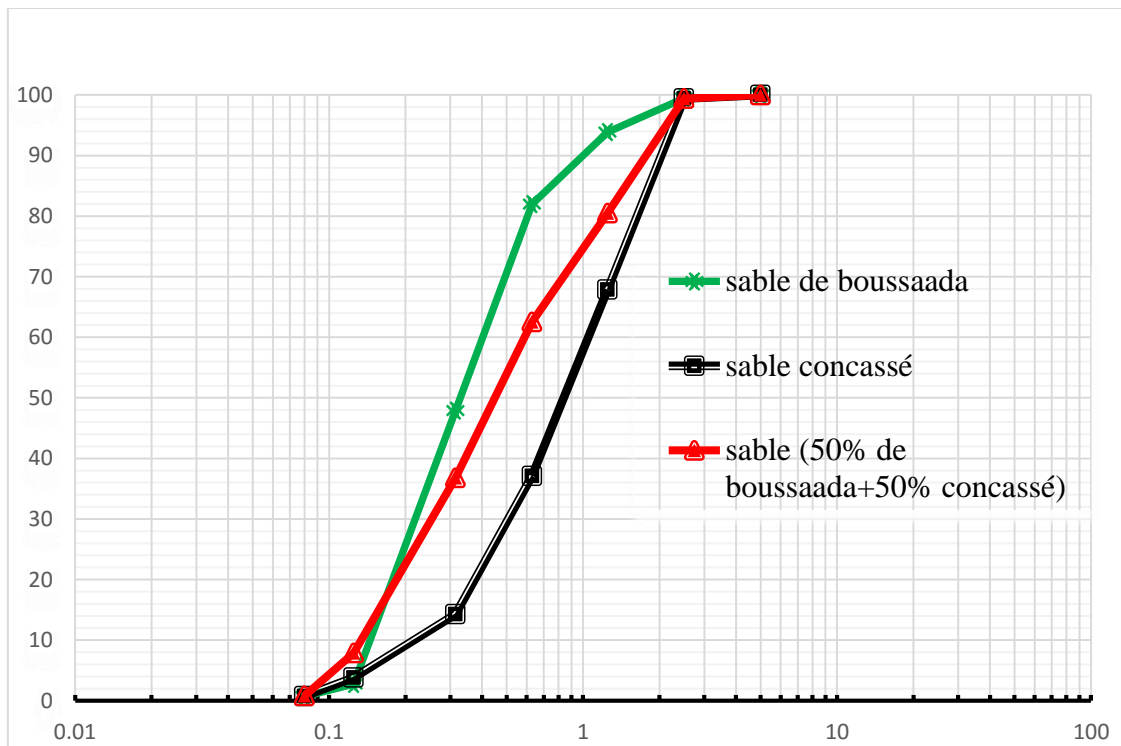


Figure 1- l'analyse granulométrique des sables.

III-1-1-5- Module de finesse :

Correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés des tamis d'ouvertures (0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5) (mm). Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

le module de finesse des sables comme suit :

Sable gros	$M_f > 2.5$
Sable moyenne	$2 < M_f < 2.5$
Sable fin	$1.5 < M_f < 2$
Sable très fin	$1 < M_f < 1.5$

Tableau 12 – Les normes soviétiques spécifient le Module de finesse des sables.

Il est donné par la relation suivant :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum R_c [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5]$$

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau :

Sable	M_f
Boussaâda	1.74
Concassé	3.29
Sable mixte	2.12

Tableau 13 - Module de finesse des sables.

III-1-2- Les graviers :

III-1-2-1- La masse volumique du gravier :

a- La masse volumique apparente : NF P 18-554

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

Mode opératoire :

Verse le granulat dans le récipient choisi et le disposer sans tassement par couches horizontales successives. Araser la couche supérieure du granulat à l'aide d'une règle que l'on anime d'un mouvement de va et vient. La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V_r}$$

M_2 : Poids de récipient.

M_1 : Poids de granulats + récipient.

V : volume du récipient.

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau :

Gravier	M_2 (kg)	M_1 (kg)	V (L)	ρ_{app} (kg/L)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/L)
(3/8)	12.61	2.92	7	1.38	1.39
	12.74			1.40	
	12.73			1.40	
(8/16)	17.40	3.49	10	1.39	1.38
	17.37			1.38	
	17.35			1.38	
(16/20)	17.15	3.49	10	1.36	1.36
	17.23			1.37	
	17.13			1.36	
caoutchouc	0.5834	0.1171	0.9	0.51	0.51
	0.5726			0.50	
	0.5694			0.50	

Tableau 14 - la masse volumique apparente des graviers.

La masse volumique absolue :

Le mode opératoire est le même effectuée pour le sable, et les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Gravier	M (g)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	ρ_{app} (kg/L)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/L)				
(3/8)	300	300	415	2.60	2.60				
			415	2.60					
			415	2.60					
(8/16)			300	300	415	2.60	2.60		
					415	2.60			
					415	2.60			
(16/20)					300	300	415	2.60	2.62
							413	2.65	
							414	2.63	
caoutchouc	30	110					138	0.93	0.93
							138	0.93	
							-	-	

Tableau 15 - la masse absolue des graviers.

III-1-2-2- Porosité, compacité et l'indice des vides :

Le mode opératoire et semblable à celui effectuée pour le sable on calcule la porosité selon la formule :

$$P (\%) = [1 - \rho_{app} / \rho_{abs}] \times 100$$

La compacité donnée par la formule :

$$C (\%) = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

L'indice des vides est donné par la formule suivante :

$$e = (V_v / V_s) = P / (100 - P)$$

Résultats :

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau :

Gravier	P(%)	C(%)	e
3/8	45.8	54.2	0.938
8/16	48.20	51.79	0.930
16/20	47.80	52.19	0.915

III-1-2-3- Degré d'absorption d'eau :

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir d'eau. Elle est exprimée en (%) et définit par la formule :

$$A(\%) = [(M_H - M_S) / M_S] \cdot 100$$

gravier	N° d'essai	$M_S(g)$	$M_H(g)$	A (%)	$A_{moy}(\%)$
3/8	01	700	709,06	1,29	1.29
	02	700	709,77	1,39	
	03	700	708,53	1,21	
8/16	01	700	712	1,71	1.66
	02	700	711	1,57	
	03	700	712	1,71	
16/20	01	700	713	1.85	1.83
	02	700	713	1.85	
	03	700	712.7	1.81	
caoutchouc	01	992	1000	0.8	0.8

Tableau 16 - degré d'absorption d'eau du gravier.

III-1-2-4- Analyse granulométrique :

Les résultats obtenus de chaque fraction du gravier, sont regroupés dans les tableaux ci-dessous :

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
10	0	0	0	100
8	32	32	2.1	97.86
6.3	411	443	29.53	70.4
5	420	863	57.53	42.46
4	465	1328	88.53	11.46
3.15	141	1469	97.93	2.06
2.5	25	1494	99.6	0.4
Fond	6	1500	100	0

Tableau 17 - l'analyse granulométrique de gravier (3/8).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
20	0	0	0	100
16	25.4	25.4	1.269	98.731
12.5	246.1	271.5	13.569	86.431
10	1104.9	1376.4	68.789	31.211
8	474.2	1850.6	92.488	7.512
6.3	133.2	1983.8	99.145	0.855
5	9.3	1993.1	99.610	0.390
Fond	7.2	2000.3	99.970	0.030

Tableau 18 - l'analyse granulométrique de gravier (8/15).

tamis (mm)	refus partiel(g)	refus cumulés(g)	refus cumulés (%)	tamisât cumulés(%)
20	221.8	221.8	11.636	88.364
16	1351.5	1573.3	82.540	17.460
12.5	332.1	1905.4	99.963	0.037
10	0	1905.4	99.963	0.037
8	0	1905.4	99.963	0.037
fond	0	1905.4	99.963	0.037

Tableau 19 - l'analyse granulométrique de gravier (15/20).

tamis (mm)	refus partiel(g)	refus cumulés(g)	refus cumulés (%)	tamisât cumulés(%)
8	8	8	1.599	98.401
6.3	92.1	100.1	20.004	79.996
5	132.7	232.8	46.523	53.477
4	103.3	336.1	67.166	32.834
3.15	53.9	390	77.938	22.062
2.5	31.9	421.9	84.313	15.687
fond	78.3	500.2	99.960	0.040

Tableau 20 - l'analyse granulométrique de caoutchouc.

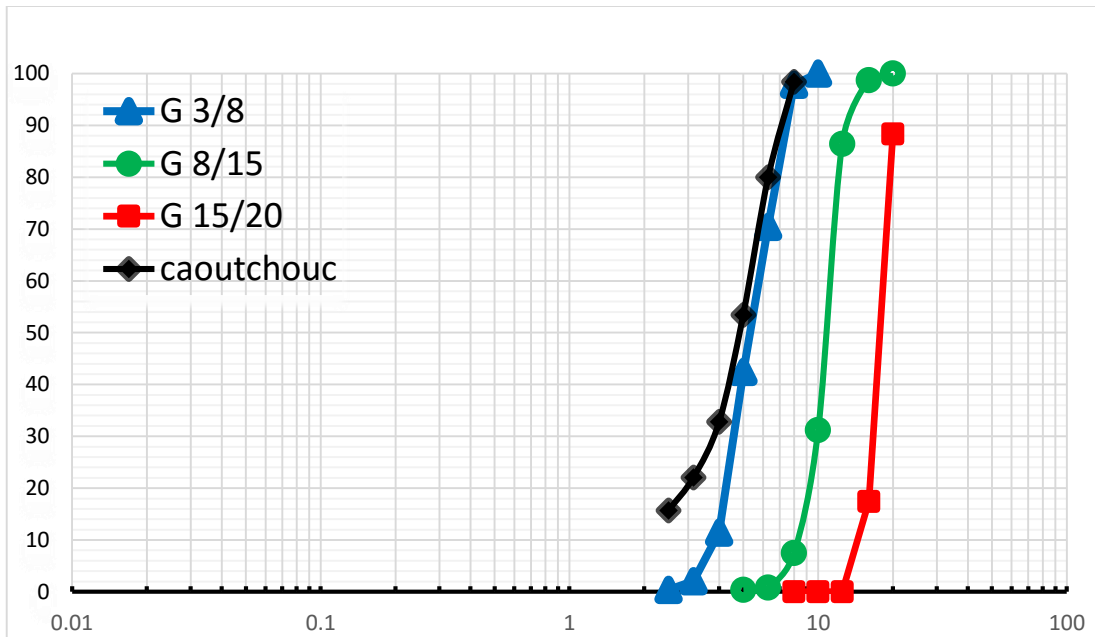


Figure 2- l'analyse granulométrique des graviers.

III-1-2-5- Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles) :

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles L_A , et sur le principe de l'effritement par abrasion.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

Formulation :

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles (L_A),

$$L_A = \left(\frac{m}{M} \right) \cdot 100$$

Gravier	N° de boules	M (kg)	m (kg)	Coef L_A
3/8	7	5	1.050	21
8/16	11	5	0.942	19
16/20	12	5	1.149	22

Tableau 21 - les résultats de Los Angeles de gravier.

Classification : Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Coef L_A	Nature de la roche
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Tableau 22 - classement la nature du gravier.

- Le gravier (3/8) :c'est un gravier dure ($L_A=21$ %) / (L_A entre 20 à 25).
- Le gravier (8/16) :c'est un gravier très dure ($L_A=19$ %) / ($L_A < 20$).
- Le gravier (16/20) :c'est un gravier dure ($L_A=22$ %) / (L_A entre 20 à 25).

III-2- Le ciment :

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment de classe 42.5 provient de la cimenterie de ciment Lafarge de Hammam Dhalaa wilaya de m'sila.

Le ciment CPJ - CEM II/B 42,5 est un ciment gris de haut résistance initial et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par la cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenable dosé et homogénéisé de calcaire et argile.

- **Composition chimique :**

Eléments	Perte au feu	Résidus insolubles	Sulfates SO ₃	Oxyde de magnésium MgO	chlorures	Equivalent en alcalis
Teneur(%)	7.50-12.00	0.7-2	2.00-2.70	1.00-2.20	0.01-0.05	0.3-0.75

Tableau 23 - composition chimique du ciment MATIN.

- **Composition minéralogique :**

Eléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur (%)	58-46	12-18	6-8	10-12

Tableau 24- compositions minéralogiques de ciment MATIN.

- **Propriétés physiques :**

Consistance normale de la pâte de ciment(%)	Finesse de Blaine (NA231)	Retrait à 28 j en (µm/m)	Expansion en (mm)
25-28.50	4150-5250	<1000	0.3-2.5
Temps de prise à 20 °c (NA230)			
Début de prise (min)		140-195	
Fin de prise (min)		195-290	
Résistance à la compression (NA234)			
02 Jours (MPa)		≥ 10.0	
28Jours(MPa)		> 42.5	

Tableau 25- les propriétés physiques de ciment MATIN.

a- La masse volumique absolue :

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 3.1$$

b- La masse volumique apparente :

$$\gamma = (M_1 - M_2)/V$$

M_2 : poids de récipient + ciment.

M_1 : poids de récipient vide.

V : volume de récipient.

Essai	Volume de récipient (L)	Poids de récipient vide (kg)	Poids de récipient + ciment (kg)	γ (kg/L)
1	1	0.14	1.227	1.113

Tableau 26 - masse volumique apparent de ciment.

Figure 1- l'analyse granulométrique des sables.....	40
Figure 2- l'analyse granulométrique des graviers.....	46

Tableaux

Tableau 1- la masse volumique apparente du sable à l'état lâche.	32
Tableau 2 la masse volumique apparente du sable à l'état compact.....	33
Tableau 3- la masse volumique absolue du sables.....	34
Tableau 4 - porosité, compacité et l'indice de vide à l'état lâche.	35
Tableau 5- porosité, compacité et l'indice de vide à l'état compact.....	35
Tableau 6 - équivalent de sable visuelle.	36
Tableau 7- équivalent de sable au piston.	37
Tableau 8 - nature et qualité du sable.	37
Tableau 9 - Analyse granulométrique de sable de dune de Boussaâda.....	39
Tableau 10 - Analyse granulométrique de sable concassé.....	39
Tableau 11 - Analyse granulométrique de sable mix (50% sable de Boussaâda + 50% concassé).....	40
Tableau 12 – Les normes soviétiques spécifient le Module de finesse des sables.	41
Sable mixte.....	41
2.12.....	41
Tableau 13 - Module de finesse des sables.	41
Tableau 14 - la masse volumique apparente des graviers.	42
Tableau 15 - la masse absolue des graviers.....	42
Tableau 16 - degré d'absorption d'eau du gravier.	44
Tableau 17 - l'analyse granulométrique de gravier (3/8).....	44
Tableau 18 - l'analyse granulométrique de gravier (8/15).....	45
Tableau 19 - l'analyse granulométrique de gravier (15/20).....	45
Tableau 20 - l'analyse granulométrique de caoutchouc.	45
Tableau 21 - les résultats de Los Angeles de gravier.	46
Tableau 22 - classement la nature du gravier.....	47
Tableau 23 - composition chimique du ciment MATIN.	47
Tableau 24- compositions minéralogiques de ciment MATIN.....	47
Tableau 25- les propriétés physiques de ciment MATIN.	48
Tableau 26 - masse volumique apparent de ciment.	48

Chapitre IV : formulation du BCR et programme des essais

Introduction :

La formulation d'un béton en générale, consiste à déterminer les différentes proportions de mélange, afin d'optimiser les matériaux employés et au même temps d'atteindre la compacité maximale. Dans ce chapitre, on présente la formulation adoptée, le programme d'essais exécuté et les procédures suivies pour la réalisation des essais selon les normes en vigueur.

IV-1- Formulation adoptée :

Notre objectif c'est la caractérisation d'un BCR contentent des particules en polymère. Les essais réalisés dans notre travail sont basés sur une étude élaborée par (Zidani S. et Belmiloud M.A, 2013) dans un cadre de projet de fin d'étude. La formulation a été réalisée suivant la méthode MDS qui consiste à utiliser l'essai Proctor modifié pour déterminer les dosages en eau et en ciment. Les résultats de formulation ainsi que la procédure suivie sont présentés dans les paragraphes suivants.

IV-1-1- Les paramètres :

- Dosage en ciment
- Dosage en eau : dépend de l'optimum Proctor (on peut commencer une teneur en eau égale à 4% et l'augmentation de 1% chaque compactage jusqu'à 7% pour déterminer l'optimum Proctor).
- Energie de compactage : l'essai Proctor modifié est utilisé une énergie de compactage qui est égale à 2.09 KJ/dm

IV-1-2- Données l'essai Proctor modifié :

Volume du moule	0.00278 m³
Diamètre du moule	15.24 cm
Hauteur du moule	15.24 cm
Poids de la dame	4.54 kg
Diamètre de la dame	5.08 cm
Hauteur de chute	45.70 cm
Nombre de coups par couche	56
Nombre de couches	5
Energie de compactage (En)	2.09 kJ/dm

Tableau 1 - donnée de l'essai proctor modifié.

L'énergie de compactage peut varier à volonté, elle est égale à :

$$EN = \frac{\text{Hauteur de chute} * \text{poids de la dame} * \text{Nb de coups} * \text{Nb de couches}}{\text{volume totale du moule}}$$

IV-1-3- L'optimum Proctor :

Les essais de Proctor réalisées ont été réalisés avec différents pourcentages de ciment (11%, 12%, 13%, 14%). Pour chaque pourcentage de ciment en fait varier la teneur en eau et en détermine chaque fois la densité séché de béton. La teneur en eau variés de 4 % à 7%, ajoutant chaque fois 1%.

Chaque pourcentage de ciment génère une courbe Proctor modifiée (densité sèche en fonction de la teneur en eau). Le sommet de la courbe représente l'optimum Proctor (la valeur de qui nous permet d'avoir la compacité maximale) pour chaque pourcentage de ciment.

Zidani S. et Belmiloud M.A ont choisis le pourcentage 13% de ciment, puisque il lui permet d'atteindre les exigences techniques voulues. Dans notre travail, considéré comme un complément de son travail, on a gardé le même pourcentage de ciment et d'eau.

IV-1-4- Détermination des proportions de granulats :

On choisit les proportions des différentes classes granulaires en vue créé un squelette granulaire avec le minimum de vide après le compactage. Il est très important de choisir convenablement les différentes classes granulaires pour obtenir un mélange assez dense et au même temps éviter les ségrégations. La courbe combinée doit inclus le plus tôt possible dans le fuseau granulaire établi par US army Corps of engineers.

Dans le tableau (1), on présente les résultats de l'analyse granulométrique des agrégats ainsi que les différents pourcentages de tamisât pour chaque diamètre de la courbe combinée. La figure (1) La présente la courbe combinée et les limites du fuseau ainsi que la courbe théorique idéale donné par la formule de Fuller-Thomson présentée en premier chapitre.

tami	sable	G 3/8	G	G	combiné
20	100	100	100	88.36	99.1854
16	100	100	98.73	17.46	94.0318
12.5	100	100	86.43	0.037	90.9672
10	100	100	31.21	0.037	82.6842
8	100	97.86	7.512	0.037	78.4038
6.3	100	70.46	0.855		68.0846
5	100	42.46	0.03		58.4409
4	100	11.46			47.8964
3.15	100	2.06			44.7004
2.5	99.4	0.4			43.872
1.25	80.5				35.42
0.63	62.5				27.522
0.31	36.8				16.192
0.12	7.9				3.476
0.08	0.8				0.352

Tableau 2- tamisa de mélange des agrégats.

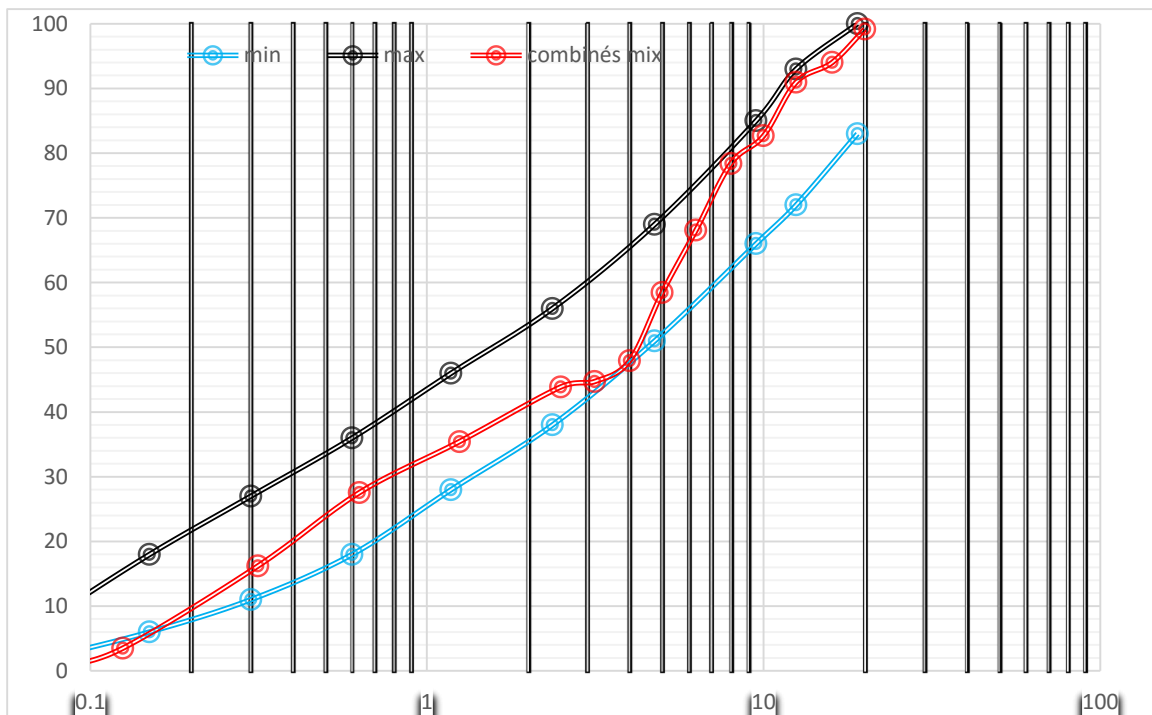


Figure 1 - fuseau granulairé recommandée.

La meilleure position trouvée est donnée par la combinaison suivante :

Sable de dune.....	22%
Sable concassé.....	22%
Gravier 3/8.....	34%
Gravier 8/15.....	15%
Gravier 15/20.....	7%

IV-1-5- Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc dans un (m³) :

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet de l'utilisation des copeaux de caoutchouc sur les caractéristiques de résistance de BCR, donc on prépare des éprouvettes de béton avec différents pourcentage de caoutchouc. L'étude est faite sur six pourcentages de caoutchouc (0, 5, 10, 15, 20 et 25). Le caoutchouc a été intégré dans le béton par substitution partiel de volume de gravie. Le tableau (3) regroupe les différentes compositions préparées.

Pourcentage du caoutchouc (%)	Gravier (kg/m ³)			Caoutchouc (kg)	Sable de dune (kg)	Sable concassé (kg)	Ciment (kg)	Eau (kg)
	3/8	8/15	15/20					
0	723.8	298.3	149.9	0	463.9	468.2	293.9	113.04
5	687.7	283.4	142.4	33.7				
10	651.5	268.5	134.9	67.4				
15	615.3	253.5	127.4	66.8				
20	579.1	238.6	119.9	83.6				
25	542.9	223.72	112.42	104.51				

Tableau 3 - dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc.

IV-2- Confection des éprouvettes en BCR :

Les éprouvettes qu'on a utilisées pour ce type de béton sont les mêmes que celles utilisées pour bétons ordinaires, la déférence est beaucoup plus dans la méthode de confection.

IV-2-1- Malaxage :

L'efficacité de malaxage est importante pour un béton frais, surtout le duré de malaxage, il doit être suffisante pour assurer une bonne homogénéité du mélange, la durée de malaxage de BCR est plus longue par rapport à un béton conventionnel à cause de faible dosage en eau.

Les constitutions sont introduites dans le malaxeur à l'ordre suivant : sable, gravier, caoutchouc mettre au repos introduire la quantité de ciment. On malaxer pendant une minute. On engager le malaxeur et en même temps introduire progressivement la quantité l'eau jusqu'à 3 minute.

IV-2-2- Compactage :

Pour tous les bétons, la compacité du squelette granulaire est un élément essentiel de leurs caractéristiques mécaniques. Dans le cas des BCR, le compactage est un facteur plus important dans la procédure de fabrication des éprouvettes. Le mode de compactage utilisé dans cette étude est marteau vibrant (ASTM C1435).

IV-3- Procédures d'essai suivies :

IV-3-1- Essai sur le BCR a l'état frais :

IV-3-1-1- La masse volumique :

- a- A l'état frais :** La masse volumique est rapport entre la masse du béton frais et le volume occupé (du moule). On pèse le moule avant et après la confection. La différence entre les deux masses présente la masse du béton frais.

$$M_{vh} = (M_{B+e} - M_e) / V$$

- b- A l'état durci :** La masse volumique à l'état durci désigne le rapport entre la masse de l'éprouvette (au jour d'écrasement) et le volume occupé (du moule).

$$M_{vs} = M_e / V$$

IV-3-1-2- Essai Vébé (maniabilité) :

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons ouvrabilité. La dimension maximale des granulats ne doit pas dépasser 40 mm

La mesure de la maniabilité du BCR ne peut pas se faire de la même manière que pour un béton conventionnelle. C'est un appareil Vébé (Figure 2) qui est utilisé. L'essai consiste à fixer le cône à l'intérieure du récipient cylindrique, et introduire le BCR dans le cône en trois couches piquées chacune 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le cône est alors

soulevé, donc possible de mesurer l'affaissement au cône comme indiqué précédemment. L'essai se poursuit ensuite par la mise en vibration de la table durant un temps t tel que la face supérieure du BCR soit entièrement aplaniée et au contact du disque transparent qui accompagne la descente du BCR pendant le compactage, et mesurer le temps requis pour qu'un anneau de pâte se forme autour du disque transparent lors de la vibration. C'est ce qu'on appelle le temps Vébé. Donc, plus le BCR est sec et moins il est maniable (carence en pâte), plus le temps Vébé est élevé.



Figure 2 - essai Vébé.

IV-3-2- Essai sur le BCR a l'état durci :

IV-3-2-1- Essai d'ultrason (la vitesse propagation d'onde ultrasonique) :

Introduction :

L'ultrason est une méthode d'essai non destructive des ouvrages en béton simple, en béton armé ou en béton précontrainte sont son particulièrement intéressantes tant pat suite de la proportion élevée de ces constructions dans l'ensemble des ouvrages, que par suite de l'importance que présente le contrôle de la qualité directement sur la construction.

Essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes ultrasonique à travers un élément en béton, dans notre étude sont des éprouvettes cubique (10x10x10).



Figure 3 - essai d'ultrason.

L'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde ultrasonique pour déterminer la résistance de béton, le module d'élasticité dynamique et profondeur des fissures.

La mesure UPV a été utilisée pour calculer le module d'élasticité dynamique. à partir de L'équation suivante [Topçu et Bilir, 2009] a été choisi pour évaluer le module d'élasticité dynamique E_d . [21]

$$E_d = \left(V^2 \cdot \frac{\rho}{g} \right) \times 10^{-2}$$

IV-3-2-2- Porosité : (ASTM - C642)

Le but de cette méthode est de déterminer pourcentage de volume des pores contenus dans l'éprouvette, afin de connaître l'influence de la structure interne du béton sur l'interconnexion des pores.

Mode d'essai :

Séchage la étuve à 105° C de l'échantillon, pendant au moins 24 heures, jusqu' à obtention d'une masse constante, afin de faire évaporé toute la quantité d'eau évaporable. Cette masse est note A.

Émersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24.

Chauffage jusqu' à évolution pendant 5 heures, puis pesage de l'échantillonage l'air (soit C ce point) puis pesage a l'eau (pesée hydrostatique, soit D ce point).

Calcul de la porosité par la formule suivante :

$$V_p = [(C-A)/(C-D)] \times 100$$

V_p : Volume des vides.

A : Poids de l'échantillon après étuvage (g).

C : Poids à l'air immersion et ébullition (g).

D : Poids à l'eau immersion et ébullition (g).

IV-3-2-3- Essai de compression : (NF P 18-406)

L'essai de compression sur les éprouvettes en béton est le principal outil pour caractériser la qualité de béton et conclure à la conformité ou non à un référentiel à partir d'une valeur de la résistance.



Figure 4 - essai d'écrasement.

La résistance à la compression augmente avec le degré de compactage, la quantité de ciment, la présence de laitier et la qualité des granulats. Un BCR bien formulé peut avoir une résistance à la compression à 28 jours sur des éprouvettes cubiques (10 x 10 x 10) variant de 40 à 60 MPa.

L'essai consiste à placer l'éprouvette cubique (10 x 10 x 10) de BCR dans la presse entre les deux embases de l'appareil de manière à un effort de compression appliquée axialement. La charge doit être appliquée d'une manière continue et uniforme, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

On note la charge de rupture (F), la résistance à la compression est donnée par la relation suivante :

$$R_{cj} = F/S$$

Tell que :

R_{cj} : Résistance à la compression à jours (MPa).

F : charge de la rupture (KN).

S : section de l'éprouvette soumise à la compression (cm²).

Les essais de la compression se fait à l'âge 28 jours.

IV-3-2-4- Résistance à la flexion :

L'essai de flexion permet d'obtenir la résistance à la flexion. La réalisation de cet essai se fait sur des éprouvettes prismatiques de BCR. Les prismes avaient 28 cm de longueur et 7 cm de largeur et hauteur.

La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante :

$$f_{cf} = \frac{F * l}{d_1 * d_2^2}$$

f_{cf} La résistance à la flexion en (MPa = N/ mm²).

F : La charge maximale (N).

L : Ecartement entre les deux appuis (mm).

d_1 et d_2 : Les dimensions latérales de l'éprouvette (mm).

Les essais de la flexion se fait sur tous le mélange de BCR à l'âge 28 jours.



Figure 5 - essai de flexion 3 points.

Chapitre IV : formulation du BCR et programme des essais	49
Introduction :	49
IV-1- Formulation adoptée :	49
IV-1-1- Les paramètres :	49
IV-1-2- Données l'essai Proctor modifié :	49
IV-1-3- L'optimum Proctor :	50
IV-1-4- Détermination des proportions de granulats :	50
IV-1-5- Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc dans un (m ³) :	52
IV-2- Confection des éprouvettes en BCR :	52
IV-2-1- Malaxage :	53
IV-2-2- Compactage :	53
IV-3- Procédures d'essai suivies :	53
IV-3-1- Essai sur le BCR a l'état frais :	53
IV-3-1-1- La masse volumique :	53
IV-3-1-2- Essai Vébé (maniabilité) :	53
IV-3-2- Essai sur le BCR a l'état durci :	54
IV-3-2-1- Essai d'ultrason (la vitesse propagation d'onde ultrasonique) :	54
IV-3-2-2- Porosité : (ASTM - C642).....	55
IV-3-2-3- Essai de compression : (NF P 18-406).....	56
IV-3-2-4- Résistance à la flexion :	57

Chapitre V : Les résultats et interprétations

Introduction :

Dans ce chapitre, on présente et interprète les résultats obtenus suivant le programme expérimental exécuté. On présente tout d'abord l'effet de l'ajout des particules en caoutchouc sur les caractéristiques de BCR à l'état frais (masse volumique, maniabilité), puis à l'état durci (résistances à la compression et à la flexion, porosité et l'ultrason).

V-1- Effet de caoutchouc sur les propriétés du BCR :

V-1-1- A l'état frais :

V-1-1-1- La masse volumique :

L'effet de l'addition des particules de caoutchouc sur la masse volumique de BCR est présenté dans le tableau (1). Pour faciliter l'interprétation, Les mêmes résultats sont présentés dans la figure (1) sous forme d'histogramme.

caoutchouc (%)		0	5	10	15	20	25
La masse volumique (kg/m ³)	Sans laitier	2408	2429	2395	2353	2324	2298
	5 % laitier	2499	2452	2420	2372	2371	2353
	10 % laitier	2516	2495	2439	2330	2325	2346

Tableau 1 - les résultats de la masse volumique à l'état frais.

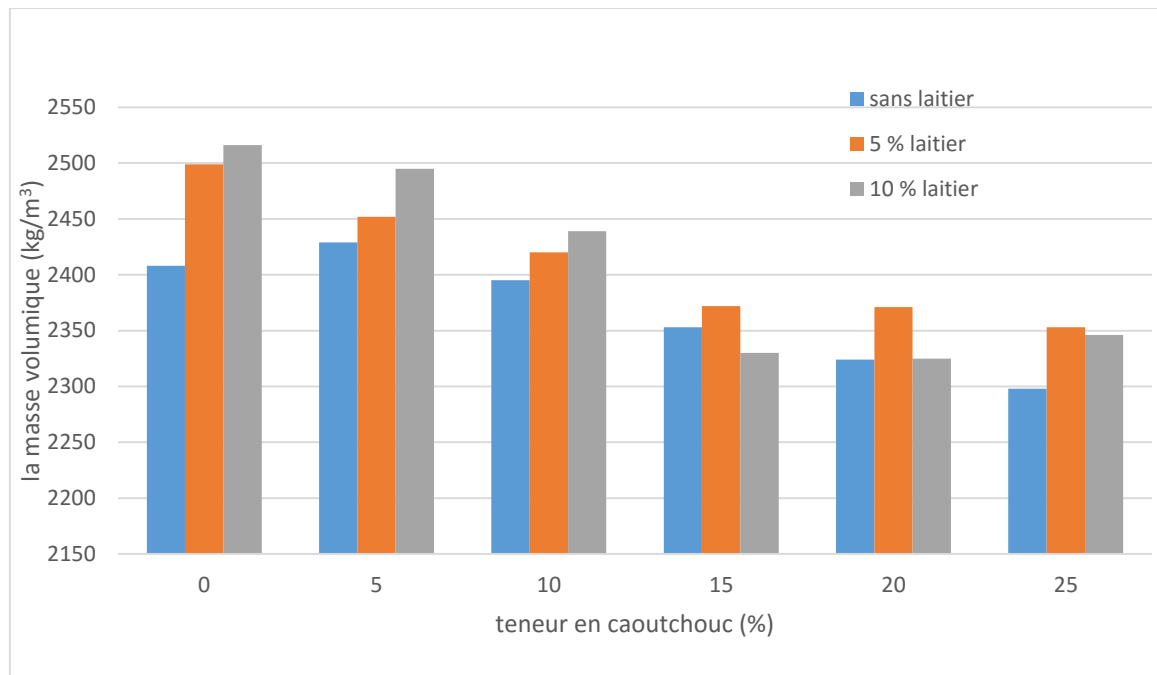


Figure 1 - variation de la masse volumique en fonction de caoutchouc.

Interprétation :

D'après l'histogramme de la Figure (1) on remarque que la masse volumique diminue avec l'augmentation de pourcentage de caoutchouc utilisé. Cette chute de la masse volumique est due sans doute de la faible densité des particules de caoutchouc par rapport aux agrégats minéraux.

D'après l'histogramme de la Figure (1) on peut conclure que la substitution de 5 % et 10 % de poids de ciment par laitier influe positivement sur la densité du BCR ; ce qui est logique, car la faible finesse de laitier ne nécessite plus une quantité plus grande d'eau.

V-1-1-2- La maniabilité (temps de compactage) :

On a quantifiée la maniabilité suivant la technique du marteau-vibrant et en utilisant un chronomètre. Le compactage se fait par deux couches, le temps de compactage se commence à $t=0$ et ce temps sera noté juste après l'apparition d'un cordon de mortier entre le moule de marteau-vibrant appliqué et l'éprouvette dans chaque couche.

Les résultats de temps de compactage obtenus, sont regroupés dans le tableau ci-après :

Caoutchouc (%)		0	5	10	15	20	25
Temps de compactage (s)	Sans laitier	60	55	48	41	37	30
	5% laitier	54	50	46	38	30	25
	10 % laitier	43	37	34	31	25	20

Tableau 2 - temps Vébé en fonction de la teneur en caoutchouc.

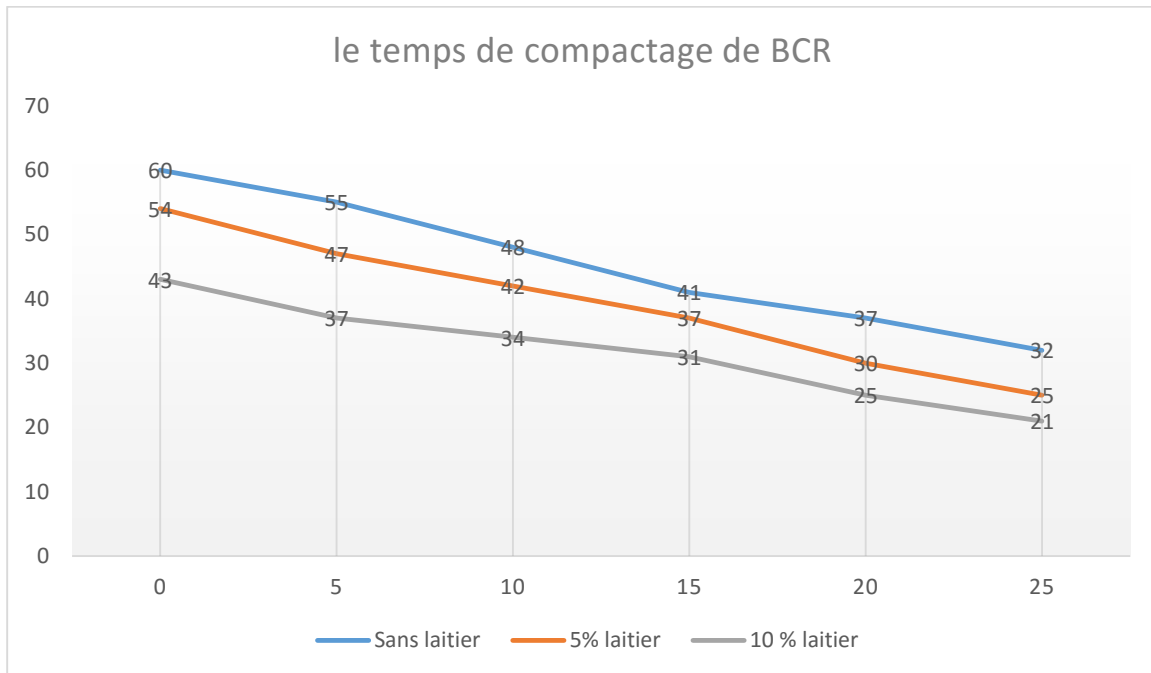


Figure 2 : variation du temps de compactage de BCR.

Interprétation :

D'après cette courbe on peut remarquer que :

Le temps de compactage diminue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc, ceci est expliqué par la faible absorption d'eau des granulats de caoutchouc par rapport au gravier, ainsi que l'augmentation de l'eau dans le mélange facilite le compactage.

En présence de laitier le temps de compactage diminue également avec l'augmentation des concentrations de caoutchouc. Il est important de noter également que la procédure de compactage est plus facile lorsqu'on ajoute de laitier, ce explique il peu conduit à un bon serrage de mélange et réduite les forces de contact entres les composants.

V-1-2- A l'état durci :

Les essais effectués sur le béton durci cornement la résistance à la compression, la flexion, la porosité et la vitesse de propagation des ondes (ultrason).

V-1-2-1- La résistance à la compression :

L'essai de compression a été réalisé sur des éprouvettes cubiques (10 x 10 x 10) cm³ à l'âge 28 jours. Les résultats trouvés sont représentés dans forme des tableaux (3), (4) et (5) et histogramme de la figure (3).

Caractéristique			Caoutchouc (%)					
			0	5	10	15	20	25
Rc (MPa)	N° essai	1	23.09	28.57	22.75	-	15.46	15.61
		2	30.38	21	15.59	13.72	13.12	15.21
		3	21.25	24.64	22.29	19.21	-	-
	Moyenne		24.90	24.73	20.21	16.46	14.29	15.41
Densité	N° essai	1	2.431	2.453	2.414	-	2.378	2.317
		2	2.439	2.506	2.426	2.396	2.342	2.307
		3	2.395	2.456	2.455	2.37	-	-
	moyenne		2421	2471	2431	2383	2360	2312

Tableau 3 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentages de caoutchouc.

Caractéristique			Caoutchouc (%)					
			0	5	10	15	20	25
Rc (MPa)	N° essai	1	23.01	18.84	14.26	15.35	14.35	10.01
		2	22.8	18.50	16.29	14.08	14.25	12.53
		3	22.26	23.61	19.56	11.7	14.07	13.55
	Moyenne		22.35	20.31	16.70	13.71	14.22	12.03
Densité	N° essai	1	2.513	2.482	2.430	2.405	2.409	2.373
		2	2.523	2.465	2.461	2.358	2.375	2.376
		3	2.487	2.441	2.454	2.384	2.38	2.366
	moyenne		2.507	2.462	2.448	2.382	2.372	2.372

Tableau 4 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentage de caoutchouc et 5% de laitier à 28j.

Caractéristique			Caoutchouc (%)					
			0	5	10	15	20	25
Rc (MPa)	N° essai	1	21.6	17.27	13.2	15	14.7	9.87
		2	22.5	20.86	22.8	13.48	14.24	7.11
		3	25.18	20.97	-	11.6	13.15	10.18
	Moyenne	23.09	19.7	17.64	13.36	14.03	9.05	
Densité	N° essai	1	2,526	2,516	2,428	2,383	2,343	2,327
		2	2,527	2,516	2,465	2,366	2,373	2,344
		3	2,521	2,415	-	2,365	2,371	2,349
	moyenne	2.525	2.482	2.447	2.371	2.362	2.340	

Tableau 5 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentage de caoutchouc et 10% de laitier à 28 j.

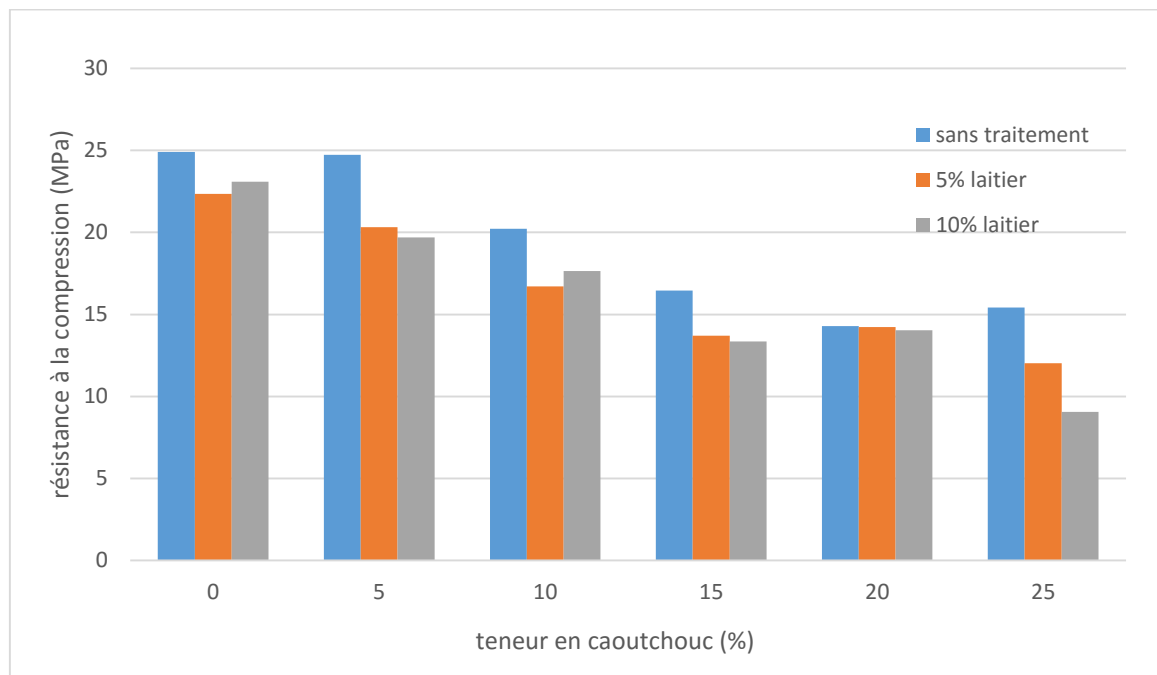


Figure 3 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.

Interprétation :

D'après les tableaux (3), (4) et (5) et la figure (3) On remarque que la résistance à la compression diminue lorsque le pourcentage des caoutchoucs augment dans tous les mélanges. En absence de laitier, la résistance diminue de 20.31 jusqu'à 10.72 MPa lorsque le pourcentage de caoutchouc

varie de 0 à 25% (tableau 3). Pour les mélanges préparés à base de laitier, la résistance diminue également avec l'augmentation de concentration du caoutchouc. Pour le mélange avec 5% de laitier la résistance diminue de 22.25 jusqu'à 12.03 MPa lorsque de pourcentage du caoutchouc varie de 0 à 25% (tableau 4). Pour le mélange de 10 % laitier la résistance diminue de 23.09 jusqu'à 10.72 MPa varie de 0 à 25% (tableau 5),

Cette chute de résistance est expliquée par la faible densité des granulats de caoutchouc par rapport aux agrégats minéraux et peut être expliqué par la faible adhérence entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc.

D'après l'histogramme (3), on remarque que l'ajout de 5% et 10 % de laitier dans le BCR influe négativement sur la résistance à la compression, la chute de résistance peut être expliquée la quantité insuffisante d'eau libre dans le mélange, ce qui affecte l'hydratation de ciment.

Remarque :

L'effet négatif du laitier peut être justifié par sa pénalité.

V-1-2-2- La résistance à la flexion :

Les éprouvettes confectionnés pour cet essai sont des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm et me principe d'essai. Cet essai permet de déterminer la résistance en flexion de BCR qu'est soumise a un moment de flexion par application d'un charge.

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux (6), (7) et (8) être présentés dans la figure (4) ci-après :

Caractéristique			Caoutchouc (%)					
			0	5	10	15	20	25
Rf (MPa)	N° essai	1	5.76	5.61	4.60	3.74	3.52	2.95
		2	5.69	5.69	4.37	4.68	3.45	3.52
	Moyenne		5.72	5.65	4.79	4.21	3.49	3.24
Densité	N° essai	1	2,594	2,592	2,491	2,470	2,499	2,340
		2	2,597	2,594	2,598	2,547	2,484	2,477
	Moyenne		2,595	2,593	2,544	2,509	2,491	2,409

Tableau 6 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc à 28 j.

Caractéristique			Caoutchouc (%)					
			0	5	10	15	20	25
Rf (MPa)	N° essai	1	5.90	5.76	4.60	4.17	3.88	3.38
		2	6.05	5.90	4.46	4.17	3.74	3.52
	Moyenne		5.97	5.83	4.53	4.17	3.81	3.45
Densité	N° essai	1	2,599	2,519	2,525	2,477	2,489	2,437
		2	2,580	2,592	2,542	2,483	2,445	2,374
	Moyenne		2,589	2,555	2,534	2,480	2,467	2,405

Tableau 7- les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc et 5% de laitier à 28j.

Caractéristique			Caoutchouc (%)					
			0	5	10	15	20	25
Rf (MPa)	N° essai	1	6.55	6.20	5.76	5.25	4.23	3.67
		2	6.48	6.37	5.90	5.04	3.74	3.38
	Moyenne		6.518	6.28	5.83	5.15	4.03	3.52
Densité	N° essai	1	2,556	2,	2,519	2,510	2,381	2,436
		2	2,570	2,	2,556	2,386	2,390	2,343
	Moyenne		2,563	2,	2,537	2,448	2,385	2,389

Tableau 8 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc et 10% de laitier à 28j

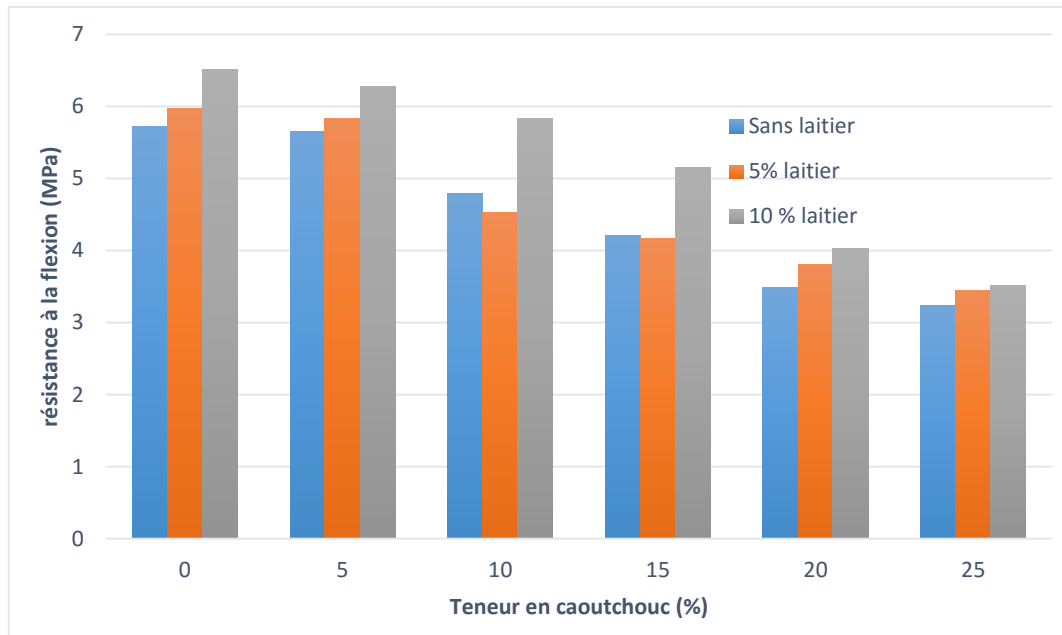


Figure 4 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours.

Interprétation :

D'après les tableaux (6), (7) et (8) et le histogramme (4) précédents :

On constate que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de pourcentage du caoutchouc. De 5.72 jusqu'à 3.24 MPa pour le mélange sans laitier (tableau 6).

Pour le BCR avec 5% de laitier la résistance de flexion diminue de 5.97 jusqu'à 3.45 MPa lorsque le pourcentage du caoutchouc varie de 0 à 25% (tableau 7). Pour le BCR avec 10% de laitier la résistance de flexion varie de 6.51 jusqu'à 3.52 MPa lorsque le pourcentage du caoutchouc varie de 0 à 25% (tableau 8). Cette réduction de la résistance à la flexion due par la faible densité de caoutchouc par rapport aux granulats minéraux. Ce dernier implique une faible compacité du squelette granulaire du caoutchouc.

La figure (4) permet bien visualiser l'influence de l'addition de 5% et 10% de laitier sur la valeur de la résistance à la flexion.

L'analyse complète de ces résultats obtenus montre le rôle de laitier important dans l'amélioration de la résistance à la flexion. Car laitier que nous avons utilisée est donc assez réactive qui implique l'amélioration de la résistance.

Note : La variation dans le pourcentage du caoutchouc de 0 à 25% implique aussi la variation dans la valeur de la résistance à la flexion avec la même manière.

Remarque :

La différence de l'effet du laitier envisagé entre la résistance à la compression et à la flexion est due au fait que nous avons utilisé deux laitier différent.

IV-1-2-3- La porosité :

Après mesurer les éprouvettes dans balance de l'air et d'eau on trouver les résultats suivant :

Caoutchouc (%)	Masse à l'air (kg)	Masse dans l'eau (kg)	La masse après l'étuve (kg)	Pourcentage des vides V_P
0	2.385	1.313	2.313	6.7
15	2.378	1.318	2.304	6.98
25	2.322	1.224	2.239	7.55

Tableau 9 - variation de la porosité en fonction des pourcentages du caoutchouc.

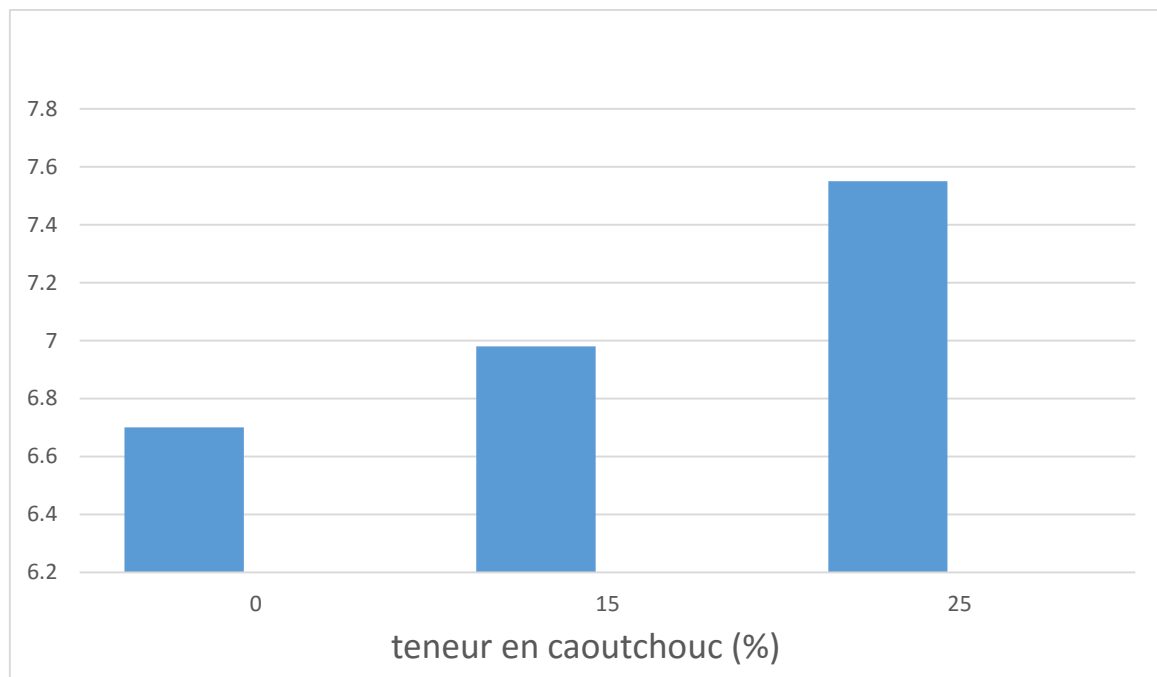


Figure 5 - variation de pourcentage des vides en fonction des pourcentages du caoutchouc.

Interprétation :

Après l'histogramme de la figure (5) on remarque que le volume du vide augmente avec l'augmentation de pourcentage de caoutchouc.

V-1-2-4- Essai d'ultrason (La vitesse propagation d'onde ultrasonique) :

Après avoir vérifié le calibrage de l'appareil et de déterminer les points de mesure et par la transmission directe, on a appliqué les essais sur chaque éprouvette, en appliquant deux sondes suivant le sens de compactage d'éprouvette puis on a marqué la vitesse (μs) de passage des ondes ultrasoniques dans le béton.

Caractéristique			0	5	10	15	20	25
vitesse (μs)	N° essai	1	4090	4118	3805	3578	3981	3699
		2	4539	4234	3711	3711	3904	3793
		3	4035	4118	4090	3981	3916	3494
	Moyenne		4221	4156	3868	3756	3933	3662

Tableau 10 - les résultats de la vitesse propagation d'onde ultrasonique.

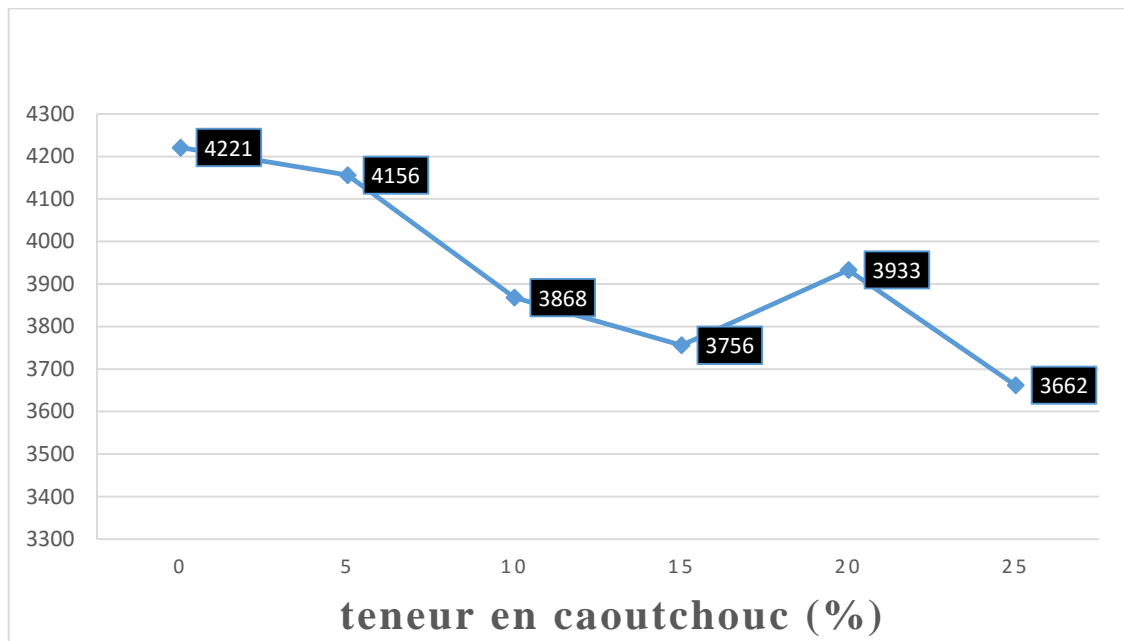


Figure 6 - variation la vitesse des ondes ultrasonique en fonction de pourcentage du caoutchouc non traité.

Interprétation :

Après le tableau (10) l'historique de la figure (6), on remarque que la vitesse d'ondes ultrasoniques diminue lorsque le pourcentage de caoutchouc augmente,

La vitesse diminue de 4221 jusqu'à 3662 (μs) lorsque le pourcentage du caoutchouc varie de 0 à 25%, cette diminution de la vitesse est probablement due à l'incorporation des particules de caoutchouc non traité dans BCR.

V-2- Les traitements :

D'après les résultats trouvés précédemment on peut conclure sans doute que l'augmentation du pourcentage de caoutchouc était la cause de la chute de résistance, c'est pour cela qu'on a proposé des traitements sur le caoutchouc.

Les bétons confectionnés avec le caoutchouc traité, sont testés des essais de compression et de flexion puis sont comparés avec les résultats trouvés précédemment.

Le traitement dont le but de confirmer la théorie proposée précédemment (faible adhérence entre liant-caoutchouc).

Les traitements proposés consistent à l'augmentation de rugosité de surface lisse des agrégats du caoutchouc

Les éprouvettes confectionnées sont des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 pour l'essai de compression de 5, 10, 15, 20 et 25% de caoutchouc et prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 pour la flexion de caoutchouc 15,20 et 25%, l'Age d'écrasement est 28 jours.

Remarque : la conservation des éprouvettes est effectuée dans l'eau.

V-2-1- Traitement par résine :

L'objectif d'utiliser le traitement par le résine et est l'obtention des surface de caoutchouc rugueuses. La résine dosée en deux composants :

- Résine.
- Catalyseur (durcisseur).

Le rôle de cette résine, c'est comme une colle entre les graines de caoutchouc et le (sable refus de 0.315 puis laitier non broyé passe par le tamis 0.2), Ces derniers peut être donné plus de rugosité dans caoutchouc.

V-2-1-1- L'opération :

- On utilise 0.6 kg de résine et 1% de catalyseur par rapport au la masse de résine pour 3 kg de caoutchouc.
- On prit une quantité de suffisante de caoutchouc puis on a mélangé avec la résine.

- On a ajouté le catalyseur dans le mélange avant dès les biens mélangés.
- Enfin on a ajouté le sable est puis on a mélangé l'ensemble (caoutchouc, sable, résine).
- Faire attendre 24 heures avant l'utilisation.

La même opération on a traité le caoutchouc par résine et laitier non broyé.



Figure 7 - caoutchouc traité par résine et laitier non broyé après 24 heures.

V-2-1-2- Les résultats à la compression :

Les résultats de ce mélange avec traitement à compression sont présentés dans le tableau suivant :

Caractéristique			5	10	15	20	25
Rc (MPa)	N° essai	1	-	21.67	24.36	21.25	10.4
		2	19.18	27.13	25.15	17.25	16.5
		3	29.81	-	-	16.1	21.37
	Moyenne	24.49	24.40	24.75	18.20	16.09	
Densité	N° essai	1	-	2.42	2.344	2.363	2.312
		2	2.357	2.399	2.384	2.38	2.362
		3	2.405	-	-	2.369	2,370
	moyenne	2,380	2,409	2.376	2,370	2,348	

Tableau 11 - résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par résine et sable à 28 jours.

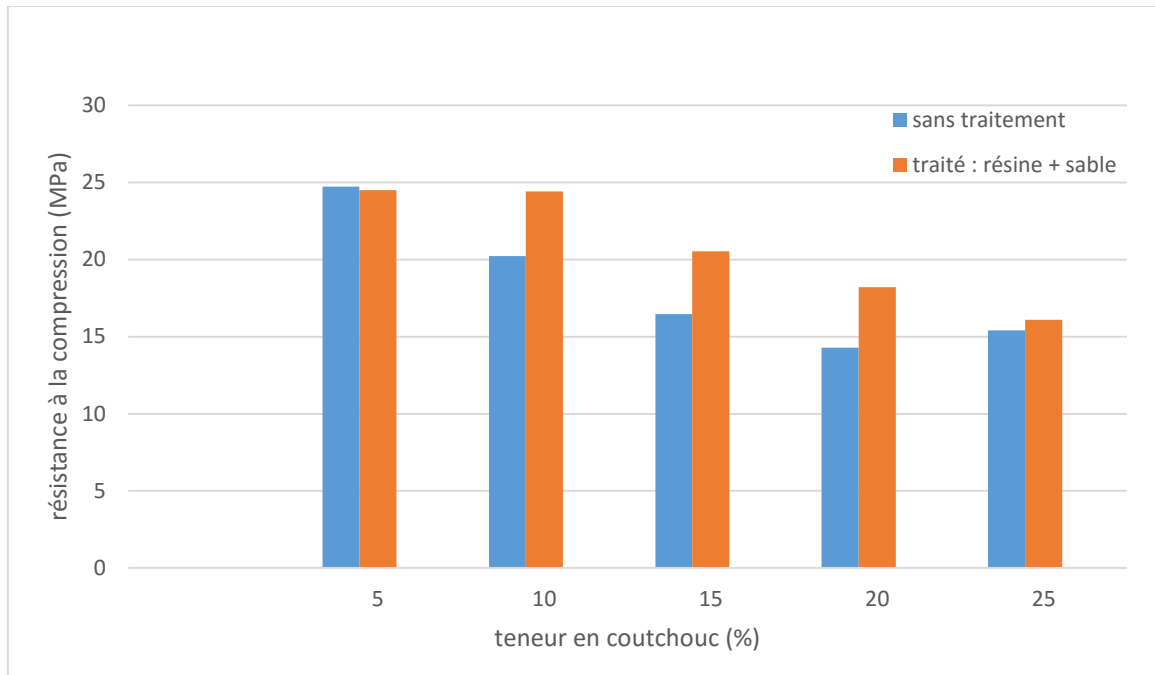


Figure 8 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.

Caractéristique			5	10	15	20	25
Rc (MPa)	N° essai	1	25.41	20.11	20.49	20.32	9.63
		2	25.82	28.62	14.53	13.26	12.52
		3	24.95	-	-	-	14.72
	Moyenne		25.39	24.36	17.51	16.79	12.29
Densité	N° essai	1	2,481	2408	2.384	2,397	2,296
		2	2,405	2329	2.409	2,366	2,292
		3	2,397	-	-	-	2.333
	moyenne		2,427	2368	2,395	2,381	2,307

Tableau 12 - résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par résine et laitier non broyé à 28 jours.

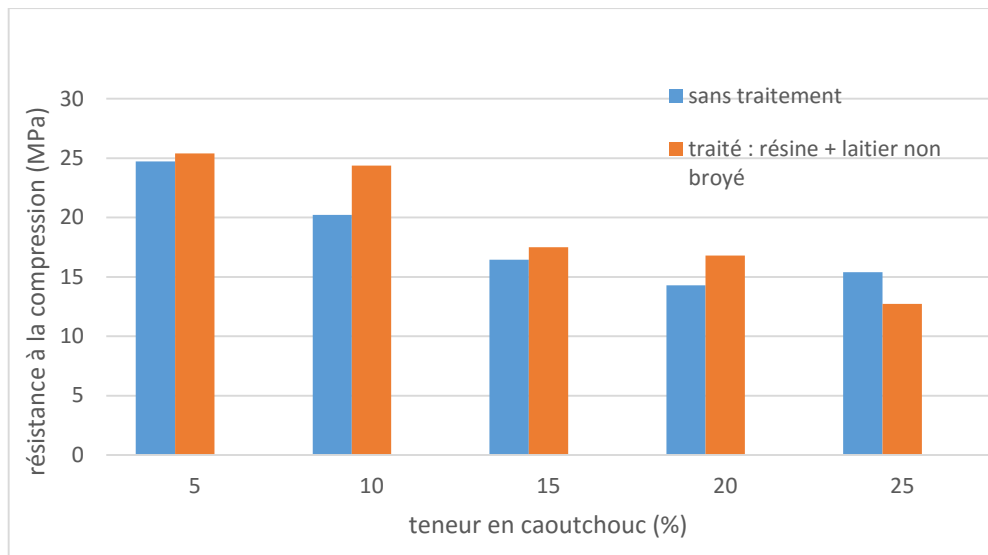


Figure 9 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.

Interprétation

Les figures (8) et (9) montre l'effet du traitement du caoutchouc par le collage des graines de sable et laitier non broyé avec la résine, on remarque que la résistance à la compression diminue lorsque le pourcentage du caoutchouc augmente dans tous les mélanges

Pour le collage résine et sable :

On remarque le traitement par le sable-collé permet d'améliorer la résistance à la compression, ce mode de traitement augmente l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment.

Pour le collage résine et laitier non broyé :

La résistance augmente plus avec le caoutchouc traité avec laitier non broyé-collé qu'avec le caoutchouc non traité (figure-9) et ça cause à la rugosité produit par le traitement avec la résine et son effet positif sur les surfaces lisse du caoutchouc cette dernière va élever l'adhérence entre liant-caoutchouc.

V-2-1-3- Les résultats à flexion :

caractéristique			15	20	25
Rf (MPa)	N° essai	1	4.75	4.53	4.17
		2	4.68	4.32	3.74
	Moyenne		4.71	4.42	3.96
Densité	N° essai	1	2,518	2,505	2,470
		2	2,536	2,479	2,472
	Moyenne		2,527	2,492	2,471

Tableau 9- les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine et sable à 28 jours.

caractéristique			15	20	25
Rf (MPa)	N° essai	1	4.32	4.24	3.81
		2	4.53	4.46	3.60
	Moyenne		4.42	4.35	3.70
Densité	N° essai	1	2,456	2,411	2,403
		2	2,534	2,489	2,370
	Moyenne		2,495	2,450	2,386

Tableau - 10 les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine et laitier non broyé à 28 jours.

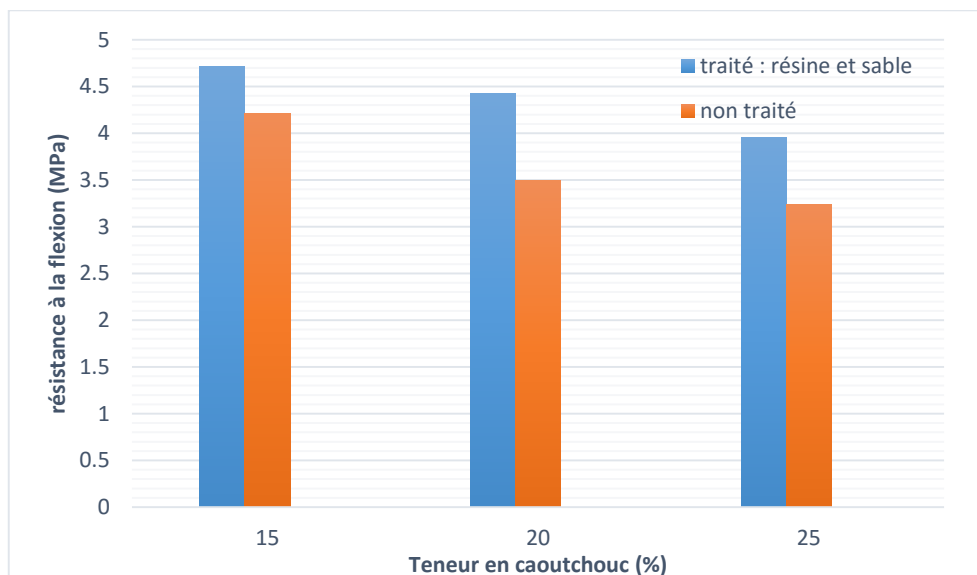


Figure 10 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours.

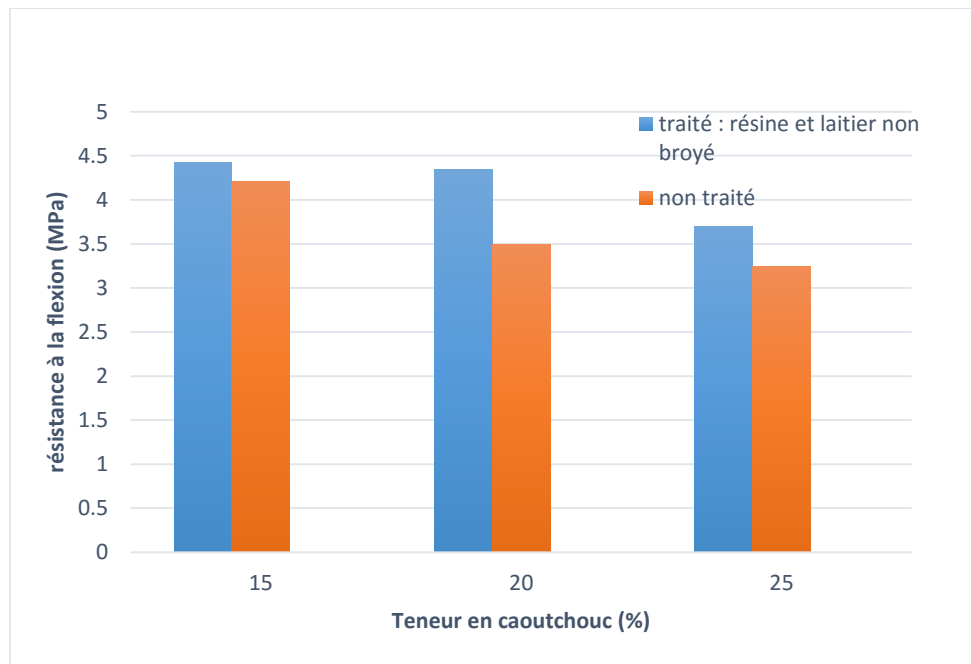


Figure 11 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours.

Interprétation :

D'après les essais précédents on a déjà trouvé que la résistance à la flexion se diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.

Maintenant on a comparé les résultats de chaque une de ces expériences.

La résistance s'augmente plus avec le caoutchouc traité qu'avec le caoutchouc non traité (figure) et à cause de la rugosité produite par le traitement avec la résine, cette rugosité va élever l'adhérence entre liant-caoutchouc.

V-2-2- Traitement chimique par $H_2S O_4$:

Le but du traitement par $H_2S O_4$, est d'assurer la bonne adhérence entre la pâte de ciment et les agrégats de caoutchouc, cette fois par une autre procédure, fonde sur l'attaque de la surface lisse du caoutchouc.

V-2-2-1- Opération :

- Préparer une solution de $H_2S O_4$ à une concentration 10% ;
- Immerger une quantité suffisante de caoutchouc dans cette solution pendant 48 heures ;
- Après 48 heures, faire laver cette quantité de caoutchouc pour neutraliser leur concentration puis laver par solution de NaOH à une concentration faible pour éviter

l'attaque chimique de H_2SO_4 sur le BCR, et enfin faire laver cette quantité de caoutchouc.

- Sécher le caoutchouc avant leur utilisation.



Figure 12 - caoutchouc traité par H_2SO_4 .

V-2-2-2- Les résultats à la compression :

Caractéristique			5	10	15	20	25
Rc (MPa)	N° essai	1	27.26	23.78	18.93	13.44	-
		2	22.24	19.15	18.00	20.73	13.12
		3	15.70	18.93	-	16.57	14.98
	Moyenne		21.80	20.62	18.46	16.91	14.05
Densité	N° essai	1	2,413	2,460	2,391	-	2,337
		2	2,432	2,443	2,352	2,359	2,298
		3	2,480	2,419	-	2,354	2,296
	moyenne		2,449	2,440	2,371	2,335	2,310

Tableau 11 -les résultats de la compression du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par H_2SO_4 .

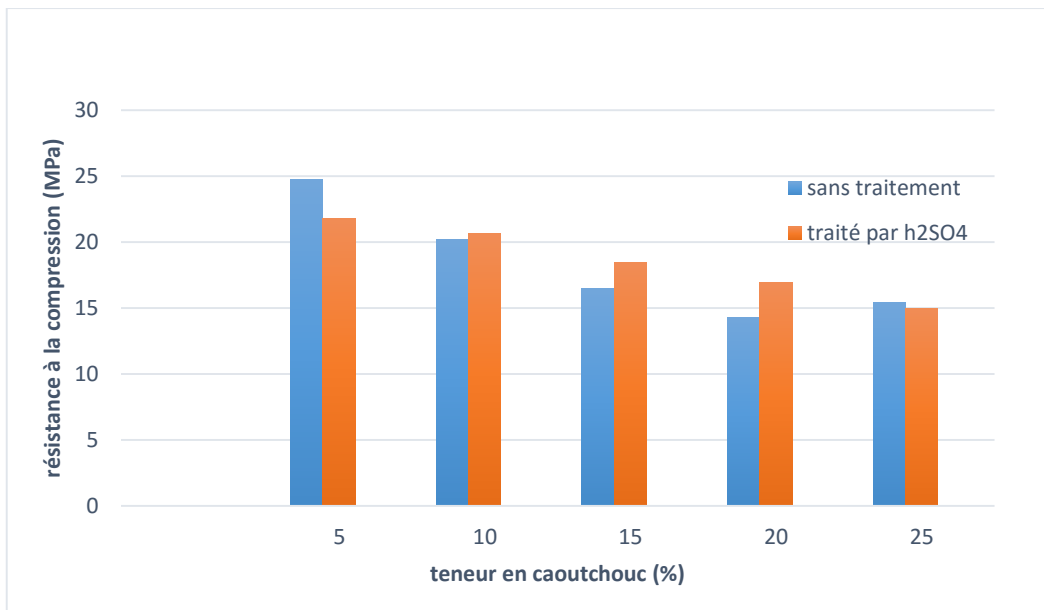


Figure 13 - résistance à la compression du BCR à 28 jours.

Interprétation :

D'après le tableau (15) et l'histogramme de la figure (13) de cet essai on remarque que la résistance à la compression augmente plus avec le traitement par H_2SO_4 qu'avec le caoutchouc sans traitement. Cela est expliqué par la rugosité produite par H_2SO_4 sur les surfaces lisses de caoutchouc.

V-2-2-3- Les résultats à la flexion :

caractéristique			15	20	25
Rf (MPa)	N° essai	1	4.75	4.53	4.17
		2	4.68	4.32	3.74
	Moyenne		4.71	4.42	3.96
Densité	N° essai	1	2,518	2505,	2,470
		2	2,536	2,479	2,472
	Moyenne		2,527	2,492	2,471

Tableau 16 - les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par H_2SO_4 .

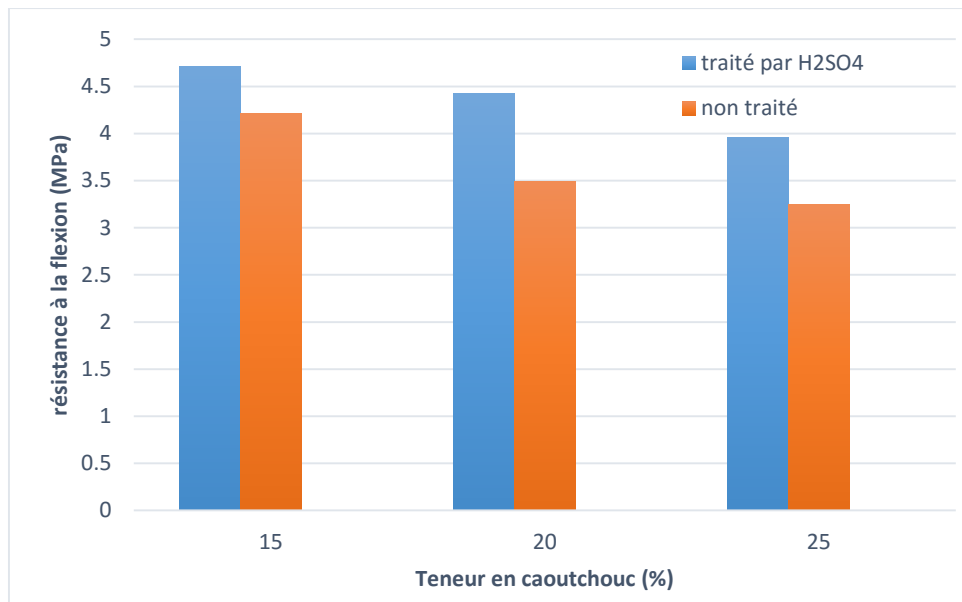


Figure 14 - la résistance à la flexion du BCR à 28 jours.

Interprétation :

Après le tableau (16) et l’histogramme de la figure (14) de cet essai on remarque que La résistance à la flexion augmente plus avec le traitement par $H_2S O_4$ qu’avec le caoutchouc sans traitement, cela est expliqué par la rugosité produite par le $H_2S O_4$.

Note : La variation dans le pourcentage du caoutchouc de 0 à 25% implique aussi la variation dans la valeur de la résistance à la flexion avec la même manière.

IV-3- Comparaison final :

IV-3-1- A la compression :

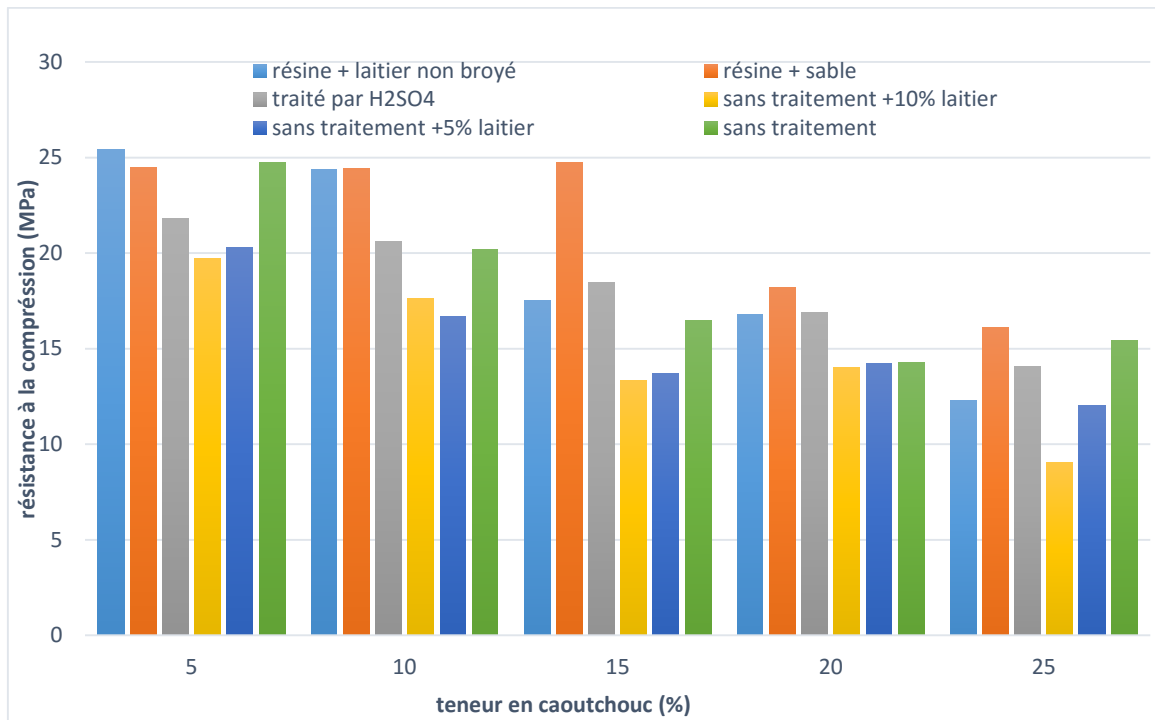


Figure 15 - résistance à la compression du BCR à 28 jours en fonction de pourcentage du caoutchouc.

IV-3-2- A la flexion :

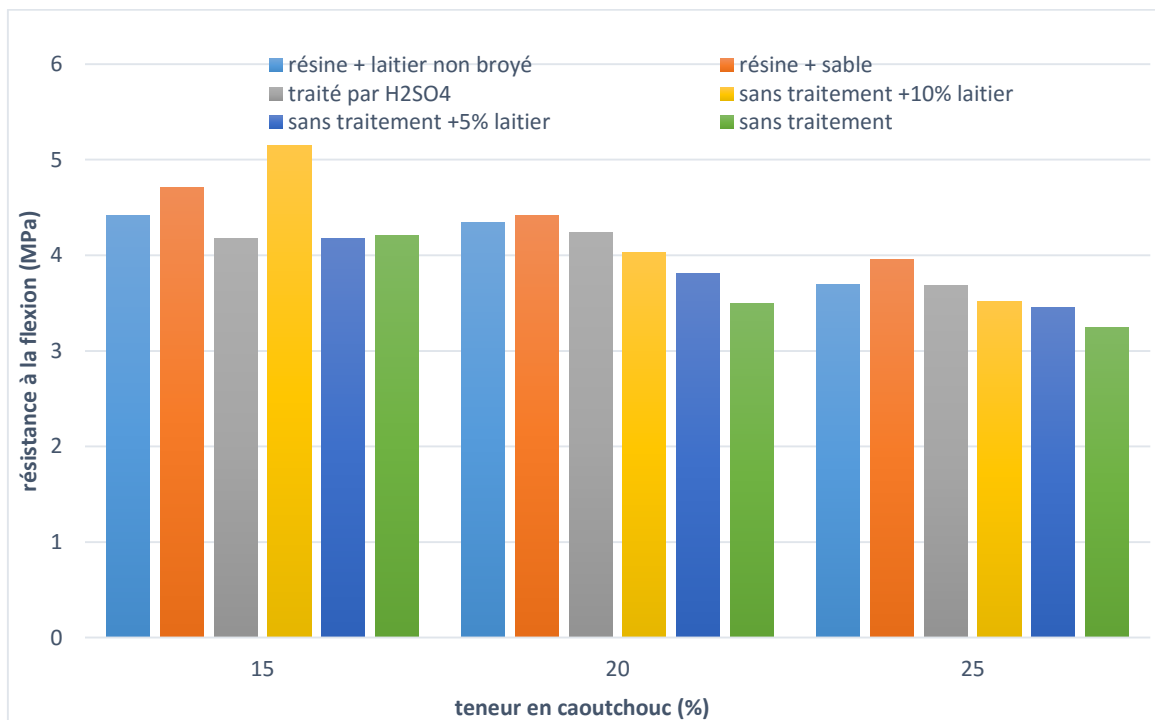


Figure 16 - résistance à la flexion du BCR à 28 jours en fonction de pourcentage du caoutchouc.

Comparaison :

Ces courbes représentent la différence et la meilleure façon de faire comparer les résultats de chaque essai, donc on peut conclure d'après ces expériences par comparaison suivant :

La modification de la rugosité de caoutchouc permet d'améliorer leur performance dans le BCR. Les meilleures valeurs de résistance sont celles données par traitement de caoutchouc avec la résine soit avec le sable ou bien avec laitier non broyé. Toutefois, le choix entre les méthodes de traitement proposées dans cette étude dépend de plusieurs paramètres ; moyens disponibles, performance exigée et également les considérations économiques.

CONCLUSIONS GENERALES.

Le BCR est un matériau composé de granulats, Ciment, matériau cimentaires, et de l'eau. Il est composé alors des mêmes constituants qu'un béton ordinaire mais avec des proportions différentes. Le BCR à deux approches, une approche béton du point de vue constituant et une approche sol vue son procédure de mise en place en compactage. Les Principaux avantages de BCR sont la rapidité d'exécution et le faible coût.

Le pneu usagé est un déchet encombrant vu de son impact sur l'environnement nombre croissant des véhicules, chaque année La valorisation des pneumatiques usagés permet de réduire leur quantité et conséquemment de préserver la nature les ressources naturelles.

Dans ce mémoire on a étudié la possibilité de valoriser de ces déchets dans un béton routier sous forme des agrégats. Cette étude, est inscrit dans l'objectif d'absorber certaines quantités de ces déchets, d'une part. Et d'autre part, de trouver un nouveau manteau performant durable et au même temps peu coûteux.

Dans le but d'étudier l'influence d'utilisation des agrégats en caoutchouc sur les propriétés physico-mécaniques de BCR. On a substitué une partie des agrégats minéraux (par volume) par des particules en caoutchouc. Les propriétés physico-mécaniques sont déterminées aux différents âges (densité, résistance à la compression, résistance à la flexion, la vitesse propagation d'onde ultrasonique et la porosité).

Vu la chute des propriétés mécaniques de BCR caoutchouc suivant la faible adhérence entre liant-caoutchouc. On a essayé d'améliorer la performance des particules de caoutchouc dans le BCR Plusieurs méthodes de traitement ont été employées traitement chimique par S_2HO_4 et traitement mécanique par le sable-colle et laitier non broyé-colle

Il est important également de noter que le BCR devient ductile sous l'effet de l'addition de caoutchouc et les fissures sont inversement proportionnelles au dosage des agrégats en caoutchouc dans le mélange ce qui permet d'éviter la rupture brutale.

Toutefois, et d'après tous les essais réalisés et les résultats obtenus, on a constaté que le BCR avec de différents pourcentages de caoutchouc comme des agrégats est un béton durable et facile de le mettre en place, de point de vue technique et au même temps un béton non polluant et peu coûteux, de point de vue économique due de leur faible teneur en liant.

Chapitre V : Les résultats et interprétations	58
Introduction :	58
V-1- Effet de caoutchouc sur les propriétés du BCR :	58
V-1-1- A l'état frais :	58
V-1-1-1- La masse volumique :	58
V-1-1-2- La maniabilité (temps de compactage) :	59
V-1-2- A l'état durci :	61
V-1-2-1- La résistance à la compression :	61
V-1-2-2- La résistance à la flexion :	63
IV-1-2-3- La porosité :	66
V-1-2-4- Essai d'ultrason (La vitesse propagation d'onde ultrasonique) :	67
V-2- Les traitements :	68
V-2-1- Traitement par résine :	68
V-2-1-1- L'opération :	68
V-2-1-2- Les résultats à la compression :	69
V-2-1-3- Les résultats à flexion :	72
V-2-2- Traitement chimique par H2S O4 :	73
V-2-2-1- Opération :	73
V-2-2-2- Les résultats à la compression :	74
V-2-2-3- Les résultats à la flexion :	75
IV-3- Comparaison final :	77
IV-3-1- A la compression :	77
IV-3-2- A la flexion :	77
CONCLUSIONS GENERALES.....	79

Tableau 1 - les résultats de la masse volumique à l'état frais.	58
Tableau 2 - temps Vébé en fonction de la teneur en caoutchouc.	60
Tableau 3 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentages de caoutchouc.	61
Tableau 4 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentage de caoutchouc et 5% de laitier à 28j.	61
Tableau 5 - les résultats de la résistance à la compression du BCR avec différents pourcentage de caoutchouc et 10% de laitier à 28 j.	62
Tableau 6 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc à 28 j.	63
Tableau 7- les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc et 5% de laitier à 28j.	64
Tableau 8 - les résultats de résistances à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc et 10% de laitier à 28j.	64
Tableau 9 - variation de la porosité en fonction des pourcentages du caoutchouc.	66
Tableau 10 - les résultats de la vitesse propagation d'onde ultrasonique.	67
Tableau 11 - résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par résine et sable à 28 jours.	69
Tableau 12 - résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par résine et laitier non broyé à 28 jours.	70
Tableau 13- les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine et sable à 28 jours.	72
Tableau 14 - les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine et laitier non broyé à 28 jours.	72
Tableau 15 -les résultats de la compression du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par H₂SO₄.	74
Tableau 16 - les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec différent pourcentage de caoutchouc traité par H₂ S O₄.	75

Bibliographie

- [1] : **S. Tremblay**, « méthodes de formulation des bétons compactés au rouleau et effet des agents entraîneur d'air sur la maniabilité » mémoire de fin étude maitre sciences (M.Sc), université de Laval. Novembre 1997.
- [2]: **M. Umar Rashed**, « roller compacted concrètes (RCC) ».
- [3] : **Pierre Gauthier. Et all.** « Conception et réalisation de revêtements en Béton Compacté au Rouleau au Québec ».
- [4] : **D. Ndiaye, A Sall.** « Conception, formulation et mise en œuvre d'un béton compacte au rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées » : application au tronçon DIAMNIADIO-MBOUR, Projet de fin d'études ingéniorat, université CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, école supérieur polytechnique, 2007.
- [5] : **Jean Paul OTSAMA MBA.** « Contribution à l'étude de l'influence des matériaux fins sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton compacté au rouleau pour barrages. » , Mémoire de maîtrise sciences appliquées. Université de Sherbrooke (Québec), CANADA. Janvier 1997.
- [6] : **ZDIRI-** une solution pour les routes rurales : cas des matériaux de gisement locaux, Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis ENIT BP37.
- [7] : **G. Degoutte et all.** « la technique du béton compacte au rouleau (BCR) » article sur le BCR, janvier 1998.
- [8] : **ZDIRI et al,** « formulation et simulation des bétons compactes au rouleau » application aux matériaux de gisements locaux, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis ENIT BP37, décembre 2005.
- [9] : **Canadian portland cement association**, «thickness design for concrete highway and street pavement Canadian Edition/metric, Engineering Bulletin.
- [10] : **Claude Guo,**” les barrages en BCR : Expérience canadienne”
- [11] :**P. Gauthier, et all.** « conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtement en béton compact é au rouleau, formulation continue GCI-A2455, centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de Génie Civil, Université Laval, 2000, pagination multiple.

[12] : **Ciment Québec**. « BCR béton compacté au rouleau ». 145 boulevard du centenaire, Saint-Basile, comté de port neuf (Québec).

[13] : « devis technique normalisé pour béton compacté au rouleau » 3VM-30, ville de Montréal, service des travaux publics et de l'environnement, division de la voirie, section du laboratoire, février 2001, p 25.

[14]: **NEVILLE AM.** (1980), properties of concrete, Third Edition, pitman Publishing, New York, 686 p.

[15] : **F. Abdelouahab, z. djidjeli** « recherche-valorisation des pneumatique-usages dans la protection de l'environnement »

[16] : **Habib trouzine et al.** « Problématique des pneumatique usagés en algérie »

[17] : **moussai boubaker, seghiri mohamed,** « béton compacté avec des ajouts granulats caoutchoucs » mémoire de fin d'étude, juin 2009.

[18] **Philippe gotteland et all** « réponse défi de la valorisation des déchets de pneus ; comportement mécanique et modélisation numériques de mélanges de copeaux de pneus-sol »

[19] : ministère de l'industrie de la petit et moyenne entreprise et de la promotion de l'investissement « Etude d'un Projet Industriel de Fabrication d'articles en caoutchouc pour automobiles »

[20] : **Ammar Benazzouk, Omar Douzane** « Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment ».

[21] **RAVI K.SHARMA Et Al.** « Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume»