

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique d'Alger
Département de Génie Civil

Thèse de Doctorat en Sciences en Génie Civil

Présentée par :

MEDDAH Abdelaziz

Magister en Génie Civil de l'Université de M'sila

Intitulée :

Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques

Soutenue publiquement le 07 / 05 / 2015 devant le jury composé de :

Présidente :	MORSLI Meriem	Professeur	ENP
Directeurs de Thèse :	BEDDAR Miloud	Professeur	U. M'SILA
	BALI Abderrahim	Professeur	ENP
Examineurs :	KETTAB Ratiba	Professeur	ENP
	OUDJIT Mohamed Nadjib	Professeur	USTHB
	BEDERINA Madani	Professeur	U. LAGHOUAT
	CHAID Rabah	Professeur	U. BOUMERDES

ENP 2015

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger

10 Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200, El Harrach, Alger, Algérie.

www.enp.edu.dz

REMERCIEMENTS

Louange au seigneur unique; le clément et le miséricordieux qui grâce à lui en primauté que ce travail a pu sortir à la lumière.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadreurs ;

M. BEDDAR Miloud, Professeur à l'Université de M'sila, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour son aide, sa disponibilité, sa confiance et de ses conseils pratiques.

M. BALI Abderrahim, Professeur à l'ENP d'Alger, à qui j'exprime ma profonde gratitude de m'avoir aidé dans la préparation des articles. Je le remercie aussi pour sa disponibilité, ses conseils précieux et constants, sa confiance et ses encouragements.

Je remercie vivement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Pendant la préparation de ma thèse, j'ai eu la chance de travailler dans trois Universités ; Khemis-Miliana, Bordj Bou Arréridj et M'sila. Je profite de l'occasion ici d'adresser un merci à tous mes collègues.

Je suis très reconnaissant également au Dr. Slamani F. de l'Ecole de Technologie Supérieure, Université de Montréal pour son aide précieuse et également pour ses encouragements.

Je remercie également Ouellet E., Vice-Président opération de SIMCO de Québec pour son aide au début de cette étude.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes parents, ma femme, mes filles (Douâa et Teqwa), mes frères et mes sœurs pour leur soutien pendant la préparation de cette thèse.

Enfin, J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل إمكانية ترميم نفايات المطاط في الخرسانة المدكوكة على شكل حصى. أضيفت حبيبات المطاط باستبدال جزئي للحجم الكلي للحصى بنسب مختلفة (5، 10، 15، 20، 25، 30٪). يعتمد المنهج التجريبي المتبع في هذه الأطروحة إلى دراسة آثار المطاط على خصائص الخليط في الحالة الطازجة كما في الحالة الصلبة.

أدى استعمال المطاط إلى الحصول على مادة أخف وزنا، أكثر مرونة، أكثر مقاومة للتشققات وأقل نفاذية. من ناحية أخرى أدى استعمال المطاط إلى فقدان الخواص الميكانيكية للخرسانة. من أجل معالجة هذه المشكلة، قمنا بمعالجة جزيئات المطاط وكذلك باستخدام غبار السيليكا. أظهرت النتائج أن أداء الخرسانة المدكوكة والمحتوية على المطاط يمكن تحسينه عن طريق تعديل خشونة سطح حبيبات المطاط. وبذلك تم تصحيح جزء كبير من خسائر المقاومة.

كلمات البحث: الخرسانة المدكوكة، نفايات المطاط، ترميم، المقاومة، تحسين، غبار السيليكا.

RESUME

Cette étude vise à valoriser les déchets caoutchouteux sous forme de granulats dans les mélanges de béton compacté au rouleau (BCR). Les particules de caoutchouc ont été ajoutées aux mélanges en remplacement partiel du volume total de graviers à différents pourcentages (5, 10, 15, 20, 25 et 30%). La démarche expérimentale entreprise dans ce travail de thèse consiste à étudier l'influence du caoutchouc sur les propriétés du BCR, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence du caoutchouc, le BCR est devenu plus léger, plus maniable, plus ductile, plus résistant à la fissuration et moins perméable. Le principal inconvénient lié à l'incorporation du caoutchouc dans le BCR est la chute des propriétés mécaniques. Pour remédier à ce problème, nous avons procédé au traitement du caoutchouc et également à l'addition de la fumée de silice. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'améliorer la performance du BCR caoutchouteux par modification de la rugosité des particules de caoutchouc. En effet, une grande partie de la chute de résistance induite par le caoutchouc a été corrigée.

Mots clés : BCR, déchets de caoutchouc, valorisation, résistance, amélioration, fumée de silice.

ABSTRACT

This study aims to analyze the possibility of valorizing rubber waste in roller compacted concrete (RCC) mixes as aggregates. The rubber particles were added to the mix as partial replacement of the total volume of gravels at different rates (5, 10, 15, 20, 25, 30%). The experimental approach followed in this thesis consisted of studying the effects of the incorporated rubber on the properties of RCC in fresh state as well as hardened state.

In presence of rubber, the RCC became lighter, more workable, more ductile, more resistant to cracking and less permeable. The principal disadvantage of rubber incorporation was the decrease in the mechanical properties of RCC. In order to remedy this problem, the rubber particles were subjected to a treatment and silica fume was added to the mix. The obtained results showed that the performance of rubberized RCC can be improved by modifying the surface roughness of rubber particles. Therefore, a large part of strength losses was corrected.

Key words: RCC, rubber waste, valorization, strength, improvement, silica fume.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUMES	ii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre1: GENERALITES SUR LE BCR

1.1	DEFINITION DU BCR	4
1.2	HISTORIQUE	8
1.3	CONSTITUANTS	11
1.3.1	Granulats	12
1.3.2	Liant	14
1.3.3	Adjuvant	15
1.3.4	Eau	16
1.4	TECHNIQUES DE PRODUCTION, MISE EN PLACE ET COMPACTAGE	16
1.4.1	Production et mise en place	16
1.4.2	Compactage	18
1.5	Techniques de fabrication des éprouvettes de BCR	21
1.6	PROPRIETES DE BCR	26
1.6.1	À l'état frais	26
1.6.2	À l'état durci	27
1.7	METHODES DE FORMULATION	31
1.7.1	Méthode basée sur les limites de maniabilité	32
1.7.2	Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique	33
1.7.3	Autres méthodes	35
1.8	CONCLUSION	36

Chapitre 2:
**VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS UNE MATRICE
CIMENTAIRE**

2.1	INTRODUCTION	37
2.2	LES DECHETS CAOUTCHOUTEUX	38
2.3	NECESSITE DE RECYCLAGE DES PNEUMATIQUES	40
2.4	TECHNIQUES DE VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES	43
2.4.1	Le rechapage	43
2.4.2	Le broyage	44
2.4.3	Combustible	48
2.5	Effet de des granulats en caoutchouc sur les propriétés de béton	48
2.5.1	A l'état frais	48
2.5.2	A l'état durci	51
2.6	Conclusion	57

Chapitre 3:
IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET FORMULATION

3.1	INTRODUCTION	59
3.2	IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS	59
3.2.1	Granulats naturels	59
3.2.2	Caoutchouc	62
3.2.3	Liant	64
3.3	FORMULATION DU BCR	65
3.4	TECHNIQUES EXPERIMENTALES	69
3.4.1	Malaxage	69
3.4.2	Compactage	70
3.5	CONCLUSION	71

Chapitre 4:
ETUDE DES PROPRIETES DU COMPACTAGE DE BCR

4.1	INTRODUCTION	72
-----	--------------	----

4.2	EFFET DU MODE DE COMPACTAGE	73
4.3	EFFET DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE	77
4.4	EFFET DU TYPE DE SABLE	80
4.5	CONCLUSION	82

**Chapitre 5:
EFFET DE CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DE BCR**

5.1	INTRODUCTION	84
5.2	EFFECT DU CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DE BCR	85
5.2.1	À l'état frais	85
5.2.2	À l'état durci	87
5.3	EFFET DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE	105
5.3.1	Densité	107
5.3.2	Propriétés mécaniques	109
5.4	UTILISATION DE LA FUMEE DE SILICE	112
5.5	Conclusion	114

**Chapitre 6:
AMELIORATION DE L'INTERFACE CAOUTCHOUC-PÂTE DE CIMENT**

6.1	INTRODUCTION	115
6.2	TRAITEMENT DU CAOUTCHOUC PAR LA SOUDE (NaOH)	116
6.2.1	Procédure expérimentale suivie	116
6.2.2	Résultats et interprétations	116
6.3	MODIFICATION DE LA RUGOSITE DU CAOUTCHOUC PAR COLLAGE DES GRAINS DE SABLE	120
6.3.1	Procédure expérimentale suivie	120
6.3.2	Résultats et interprétations	121
6.4	CONCLUSION	124

	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	125
--	--	-----

	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	129
--	------------------------------------	-----

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1. Définition d'un béton compacté au rouleau (Tremblay, 1997).	6
Fig. 1.2. Mise en place d'un BCR routier (ACI 325, 2001).	7
Fig. 1.3. Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Bouyge & Forbes, 2007).	7
Fig. 1.4. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930 (Harrington et al., 2010)	9
Fig. 1.5. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique (Serne, 1997).	9
Fig. 1.6. Barrage de Shimajigawa au Japon (ACI 207, 1999).	11
Fig. 1.7. Malaxage du BCR par gachée (Harrington et al., 2010).	17
Fig. 1.8. Schéma d'une centrale de malaxage en continu (Harrington et al., 2010).....	18
Fig. 1.9. Rouleaux compacteurs sur pneus et cylindres.	19
Fig. 1.10. Schéma du compactage typique du BCR (Pittman, 1989; ACI 325, 2001).	20
Fig. 1.11. Principe de la méthode vibro-compactage (Zdiri, 2008).	23
Fig. 1.12. Marteau vibrant (Harrington et al., 2010).....	23
Fig. 1.13. Comparaison entre la méthode de Proctor et la méthode vibro-compactage en terme de densité (Tayabji & Okamoto 1987).	24
Fig. 1.14. Comparaison entre la méthode de Proctor et la méthode vibro-compactage en terme de résistance en compression (Tayabji & Okamoto 1987).	25
Fig. 1.15. Schéma de compactage des éprouvettes prismatiques suivant la méthode vibro-compactage (Zdiri, 2008).	25
Fig. 1.16. Appareil Vebe (ASTM C1170, 2008).	27
Fig. 1.17. Etude de l'anisotropie, comparaison entre un BCR et un béton conventionnel (Zdiri et al. 2010)	28
Fig. 1.18. Préparation d'une éprouvette prismatique à partir d'une carotte (Harrington et al., 2010).	30
Fig. 1.19. Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand, 2001)	32
Fig. 1.20. Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al., 1997; Gauthier & Marchand, 2001).	34
Fig. 1.21. Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001).	34
Fig. 2.1 Modes de traitement des déchets pneumatiques en Europe (Sienkiewicz et al., 2012).	42

Fig. 2.2. Pose d'une bande de roulement sur un pneu usagé.	44
Fig. 2.3. Formes de déchets pneumatiques d'après Flores-Medina et al. (2013); a) déchet de pneu à l'état brut, b) particules de caoutchouc seul, c) textile+caoutchouc+fibres d'acier d) fibres d'acier e)fibres d'acier+caoutchouc, e, f) fibres d'acier+caoutchouc.....	45
Fig. 2.4. Etat de la surface des particules de caoutchouc broyé; A) à la température ambiante, B) cryogéniquement. (Sienkiewicz et al., 2012).	47
Fig. 2.5. Schéma du principe de granulation des pneus usagés (Ademe, 2012).....	47
Fig. 2.6. Variation de l'affaissement du béton en fonction de contenu en caoutchouc (Güneyisi et al., 2004).....	49
Fig. 2.7. Variation de l'affaissement du béton en fonction de la teneur en caoutchouc d'après Boudaoud & Beddar (2012)	50
Fig. 2.8. Variation de la maniabilité du béton en fonction de la teneur en caoutchouc d'après Jingfu et al.(2008)	51
Fig. 2.9. Surface de fracture de l'éprouvette ; dans le cas du caoutchouc à l'état brut (gauche), et dans le cas du traitement du caoutchouc dans la solution de NaOH (droite), d'après Segre & Joeke (2000).	55
Fig. 2.10. Types de rupture (Khaloo et al., 2008).....	56
Fig. 2.11. Taux de réduction des résistances (Batayneh et al., 2008).....	57
Fig .3. 1. Courbe granulométrique du sable utilisé.....	60
Fig .3. 2. Courbes granulométriques des graviers employés.	62
Fig. 3.3. Particules en caoutchouc coupées manuellement.....	63
Fig .3. 4. Particules en caoutchouc utilisées dans le programme expérimental.....	64
Fig .3. 5. Courbe granulométrique du caoutchouc.....	64
Fig. 3.6. Position de la courbe granulométrique combinée entre les limites proposées par Piggot d'après Marchand et al. (1997).....	67
Fig. 3.7. Relation entre la densité et la teneur en eau	68
Fig. 3.8. Résistance en compression en fonction de la teneur en ciment à 7 jours d'âge. .	69
Fig. 3.9. Aspect du BCR après le malaxage.	70
Fig. 3.10. Table vibrante, surcharge de compactage et système de fixation de l'ensemble.	71
Fig .4.1. Compactage des éprouvettes par la presse mécanique (ou hydraulique).	73
Fig. 4.2. Densités des éprouvettes cylindriques compactées par différentes méthodes.....	74
Fig. 4.3. Densités des éprouvettes prismatiques compactées par différentes méthodes....	74
Fig. 4.4. Variations relatives de la résistance en compression.....	76

Fig. 4.5. Variations relatives de la résistance en traction par fendage.....	76
Fig. 4.6. Variations relatives de la résistance en traction par flexion.	77
Fig. 4.7. Effet de l'énergie de compactage sur la résistance en compression.....	79
Fig. 4.8. Effet de l'énergie de compactage sur la résistance en traction.....	79
Fig. 4.9. Effet du type de sable sur la densité du BCR.	81
Fig. 4.10. Effet du type de sable sur la résistance en compression.....	82
Fig. 4.11. Effet du type de sable sur la résistance en traction.....	82
Fig. 5.1. Effet du caoutchouc sur la densité à l'état frais.....	86
Fig. 5.2. Effet du caoutchouc sur la maniabilité.	87
Fig. 5.3 Machine de compression utilisée.....	88
Fig. 5.4. Effet du caoutchouc sur la résistance en compression à 28 jours.....	88
Fig. 5.5. Rupture interfaciale entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment.	89
Fig. 5.6. Evolution de la résistance dans le temps.	90
Fig. 5.7. Effet du caoutchouc sur la résistance en traction par fendage.....	92
Fig. 5.8. Evolution de la résistance en traction dans le temps.	92
Fig. 5.9. Variation de la résistance en flexion contre la teneur en caoutchouc.....	93
Fig. 5.10.Chutes de résistance en fonction de la teneur en caoutchouc.....	94
Fig. 5.11. Relation entre les résistances en traction et en compression.	94
Fig. 5.12. Relation entre les résistances de traction par flexion et de compression.....	95
Fig. 5.13. Relation entre la résistance en compression et la densité.....	96
Fig. 5.14. Simulation de l'effet du caoutchouc sur la résistance en compression,	98
Fig. 5.15. Simulation de l'effet du caoutchouc sur la résistance en traction par flexion...	99
Fig. 5.16. Simulation de l'effet du caoutchouc sur la résistance en traction par fendage.	100
Fig. 5.17. Dispositif de mesure du module d'élasticité.....	101
Fig. 5.18. Module élastique en compression en fonction du dosage en caoutchouc.	101
Fig. 5.19. Aspect des éprouvettes à la rupture.	103
Fig. 5.20. Effet de la teneur en caoutchouc sur le taux d'absorption par capillarité.....	104
Fig. 5.21. Variation de la densité en fonction de la contrainte de compactage.	108
Fig. 5.22. Variation de la densité en fonction la teneur en caoutchouc.	108
Fig. 5.23. Ecart relatifs de la résistance en compression.....	111
Fig. 5.24. Ecart relatifs de la résistance en traction.....	111
Fig. 5.25. Effet de la fumée de silice sur la maniabilité.....	112

Fig. 5.26. Résistance en compression en fonction du dosage en caoutchouc, sans fumée de silice.	113
Fig. 5.27. Résistance en compression en fonction du dosage en caoutchouc, en présence de la fumée de silice.	114
Fig .6.1. Caoutchouc traité par la soude.	116
Fig. 6.2. Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression à 14 jours.	118
Fig. 6.3. Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression à 28 jours.	118
Fig .6.4. Etat de l'interface avant traitement.	119
Fig .6.5. Etat de l'interface après traitement par NaOH.	119
Fig .6.6. Différentes étapes du traitement.	120
Fig. 6.7. Particules de caoutchouc après traitement.	121
Fig. 6.8. Effet du traitement du caoutchouc par le sable collé sur la résistance en compression à 14 jours.	122
Fig. 6.9. Effet du traitement du caoutchouc par le sable collé sur la résistance en compression à 28 jours.	123
Fig. 6.10. Etat de l'interface après le collage des grains de sables.	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage (Marchand et al., 1997)	5
Tableau 1.2. Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après (USACE, 2000).	13
Tableau 1.3. Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après (USACE, 2000).	13
Tableau 1.4. Surcharges utilisées pour le compactage d'après (BaCaRa, 1996).....	22
Tableau 1.5. Résultats de résistance en compression sur carottes prélevées dans des projets réalisés aux Etats Unis (ACI 325, 2001).....	29
Tableau 1.6. Valeurs typiques de résistance sur carottes à partir de quelques projets de BCR, Etats Unis. (ACI 325, 2001).	30
Tableau 2.1. Situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés (Abraham et al., 2011)	39
Tableau 2.2. Composition moyenne d'un pneu de véhicule léger en Europe d'après (Ademe, 2012)	40
Tableau 2.3. Classification des déchets pneumatiques en Europe, Post-Consumer tire Maerials, CEN (2004), et aux Etats Unis, ASTM (1998) (Edeskär, 2006)	45
Tableau 2.4. Chutes de résistance en compression obtenues par Topçu (1995).....	52
Tableau 2.5. Résistance à la compression des bétons à base de granulats en caoutchouc de Brito & Saikia (2013).....	53
Tableau 2.6. Modèles de prévision de la résistance (Khatib & Bayomy, 1999).....	54
Tableau 3.1. Compositions chimiques des granulats.	60
Tableau 3.2. Caractéristiques granulométriques du sable.....	60
Tableau 3.3. Caractéristiques physiques du sable.....	61
Tableau 3.4. Caractéristiques physico-mécaniques du gravier.	61
Tableau 3.5. composition chimique du ciment et de la fumée de silice.	65
Tableau 3.6. Les différentes proportions de mélange.	69
Tableau 3.7. Procédure de malaxage suivie.....	69
Tableau 5.1. Proportions des différents mélanges.	85
Tableau 5.2. Modèles de prévision de la résistance pour le BCR, en présence du caoutchouc.	97
Tableau 5.3. Programme expérimental mis en œuvre.....	106

Tableau 5.4. Résultats des résistances à 28 jours.....	109
Tableau 6.1. Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression.	117
Tableau 6.2. Effet du traitement du caoutchouc par le le sable-collé sur la résistance en compression.	122

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie a entamé dans les dernières années un grand programme de réhabilitation du réseau routier et en même temps a lancé de grands projets autoroutiers : autoroute Est-Ouest et autoroute des hauts-plateaux. Ces projets nécessitent sans doute un volume important de matières premières. La recherche de nouvelles technologies constitue une préoccupation majeure pour les chercheurs et concepteurs de routes afin de préserver les ressources naturelles en matière de granulats et d'hydrocarbures.

Le développement des activités industrielles envisagé de nos jours est accompagné par d'énormes problèmes environnementaux, car les différentes étapes de production et de fonctionnement d'un produit génèrent des sous-produits et des déchets de diverses natures. Cette situation a poussé les scientifiques à la recherche de solutions techniques et des applications pratiques pour absorber une part de ces déchets.

L'incorporation des différents déchets industriels dans les bétons et mortiers constitue, en effet, un défi technologique majeur. Plusieurs matériaux ont été employés comme granulats dans les bétons tels que : les fibres de verre, les fibres métalliques, les déchets plastiques, les déchets de caoutchouc, etc. Ces déchets sont ajoutés généralement au béton par substitution partielle des granulats naturels. Le recyclage des déchets industriels d'origine caoutchouteuse dans les domaines de bâtiments et de travaux publics, constitue un challenge important sur les plans économique, environnemental et technique.

Sur le plan économique, l'utilisation des granulats en caoutchouc dans le béton réduit le coût du produit final et également crée des sources supplémentaires pour répondre aux besoins croissants de ces matériaux dans les routes et bâtiments. Sur le plan environnemental, le recyclage des déchets de caoutchouc peut contribuer à la protection de l'environnement et les ressources naturelles. Sur le plan technique, l'incorporation des particules en caoutchouc apporte au béton une capacité plus grande à se déformer avant la rupture et empêche même le développement des fissures.

Le béton compacté au rouleau (BCR) est composé des mêmes constituants qu'un béton ordinaire (ciment, granulats, eau et éventuellement des adjuvants). Il se distingue des bétons conventionnels par son affaissement qui est nul, une quantité importante de granulats et une quantité plus faible de ciment. Le BCR est un matériau ayant une

apparence raide et très sèche, sa densification nécessite l'application d'une énergie de compactage externe pour le rendre bien consolidé. Il est utilisé principalement pour la réalisation des barrages et des routes. Il est placé et compacté d'une façon similaire à celle utilisée pour le compactage des couches de sol. Le BCR ne nécessite ni un coffrage ni un ferrailage ni une finition de la surface.

Dans les deux dernières décennies, de nombreuses recherches ont été menées sur la possibilité d'utiliser le caoutchouc sous forme de granulats dans le béton. La majorité de ces travaux ont été effectués sur des bétons ordinaires et les études qui traitent de leur effet sur le comportement du BCR sont très limitées.

Le présent travail est inscrit dans le cadre de la contribution à la recherche de nouvelles applications permettant d'absorber une quantité des déchets de caoutchouc. Il vise à analyser les potentialités d'utiliser le caoutchouc sous forme de granulats, dans les mélanges de BCR. Le caoutchouc a été ajouté aux mélanges en remplacement partiel du volume total des graviers : 5, 10, 15, 20, 25 et 30%.

Vu la variabilité des paramètres intervenants, les propriétés intrinsèques des différents constituants et l'interaction entre eux, qui nécessitent un nombre important d'expérimentations, il convient donc de limiter les facteurs analysés. Pour cela nous limitons l'étude aux paramètres suivants ;

- Etude des paramètres influençant le compactage des mélanges de BCR préparés à base de granulats naturels ;
- Caractérisation des mélanges de BCR contenant des granulats en caoutchouc ;
- Amélioration de la performance de l'interface caoutchouc-pâte de ciment.

Pour arriver aux objectifs fixés, nous avons structuré la thèse en six chapitres ;

Le premier chapitre présente un état de l'art sur le BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement.

Les principales connaissances acquises sur l'effet de l'utilisation du caoutchouc sur les propriétés du béton, ont fait l'objet du deuxième chapitre.

Le troisième chapitre décrit les résultats d'identification des matériaux employés pour la confection des mélanges. Les différentes étapes de formulation y seront également présentées. Il en sera de même pour les différentes techniques expérimentales de malaxage et de compactage des éprouvettes à tester.

L'un des objectifs de ce travail est de mettre à la disposition des concepteurs de routes en Algérie, une technologie innovante. Pour cela, nous avons consacré le quatrième chapitre à la caractérisation du BCR à base de granulats naturels (sans caoutchouc).

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats de caractérisation du BCR en présence de granulats en caoutchouc.

Le dernier chapitre de cette thèse, comporte une étude sur les propriétés de l'interface caoutchouc-pâte de ciment afin d'arriver à des solutions aux problèmes liés à l'introduction de caoutchouc.

Finalement, on termine ce travail par des conclusions générales et des recommandations.

1 GENERALITES SUR LE BCR

1.1 DEFINITION DU BCR

Le BCR est un béton à affaissement nul (béton très ferme), qui est composé de mêmes ingrédients qu'un béton ordinaire. Il est préparé comme un béton puis mis en place et compacté comme un sol, à l'aide d'engins des travaux publics (paveuses et rouleaux compacteurs).

Le rapport de l'Institut Américain du Béton ([ACI116](#)) définit le BCR comme un béton compacté à l'aide des rouleaux compacteurs; à son état frais, il va supporter la surcharge induite par les rouleaux vibrateurs ce qui permet de le serrer. L'aspect sec du BCR nécessite l'application d'une énergie de compactage pour le consolider. La consistance du mélange doit être donc, d'une part, suffisamment rigide pour le maintenir stable sous les rouleaux compacteurs et, d'autre part, assez humide et maniable pour éviter les ségrégations ([Tremblay, 1997](#)).

Le BCR est un matériau intermédiaire entre le sol et le béton. Dans les premières heures de son malaxage il se comporte comme un sol (techniques de mise en place et compactage) et après quelques jours, il devient un béton indéformable; entre les deux, c'est un matériau avec des propriétés assez mal connues et nécessite des recherches tant sur les plans théoriques qu'expérimentales pour comprendre ses mécanismes fondamentaux de comportement ([BaCaRa, 1996](#)).

Le matériau BCR a deux approches : approche sol et approche béton. Les deux approches ont été utilisées, séparément, par les ingénieurs concepteurs de BCR pour déterminer les différentes proportions du mélange.

Dans l'approche sol, la démarche consiste à utiliser les principes de géotechnique. Le béton est compacté d'une façon similaire à celle utilisée pour le compactage des sols en laboratoire. Dans l'approche béton, les différents constituants du mélange peuvent être

déterminés sur la base de leurs caractéristiques à l'état frais (consistance). Toutefois, la production de BCR selon l'approche béton génère généralement un mélange plus fluide que l'approche sol, mais les deux philosophies conduisent à produire un béton à affaissement nul.

La [Figure 1.1](#) présente une comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus. En fonction de la teneur en liant, le BCR contient une quantité inférieure par rapport à un béton ordinaire et plus grande que celle utilisée dans la technique du gravier-traité, qui nécessite généralement une quantité de ciment de l'ordre de 4-5% de la masse totale des granulats ([Choi & Hansen, 2005](#)). La composition de BCR génère généralement un mélange ferme, ce qui rend l'opération de serrage du squelette granulaire par vibration insuffisante. Cette phase est souvent réalisée par l'apport d'une énergie de compactage à l'aide des rouleaux compacteurs.

Le BCR est utilisé principalement pour la construction des chaussées et des barrages ([Figs.1.2 et 1.3](#)), sa formulation dépend de la destination du projet. Le [Tableau.1.1](#) présente une comparaison entre deux mélanges de BCR, dont le premier est destiné pour la construction d'un barrage et le second pour un projet routier. Puisque le BCR routier est plus sollicité en service (sollicitations mécaniques et climatiques), il nécessite une résistance mécanique plus élevée ce qui requiert l'utilisation d'une quantité plus grande de liant. En plus, le diamètre maximal de granulats est limité à 20 mm en corps routier, pour éviter le problème de ségrégation.

[Tableau 1.1.](#) Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage ([Marchand et al., 1997](#))

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
teneur en liant (kg/m ³)	60-250	200-350
rapport eau/liant	0,4-0,8	0,3-0,4
diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
résistance à la compression 28 (MPa)	15	45
temps Vébé (s)	10-25	30-60

Outre les barrages et les chaussées, le BCR a été utilisé avec succès dans plusieurs applications telles que : aires de stockage, parking de voitures et de camions, piste de véhicules militaires, routes de transport minière et forestière, autoroutes, parcs de conteneurs intermodaux, etc. (ACI 325, 2001).

D'après Vahedifard et al. (2010), le gain en coût associé à l'utilisation du BCR en tant que matériau de construction alternatif, pour les routes fortement sollicitées, a montré des économies initiales qui peuvent arriver à 58%, par rapport à l'utilisation du béton de pavage classique.

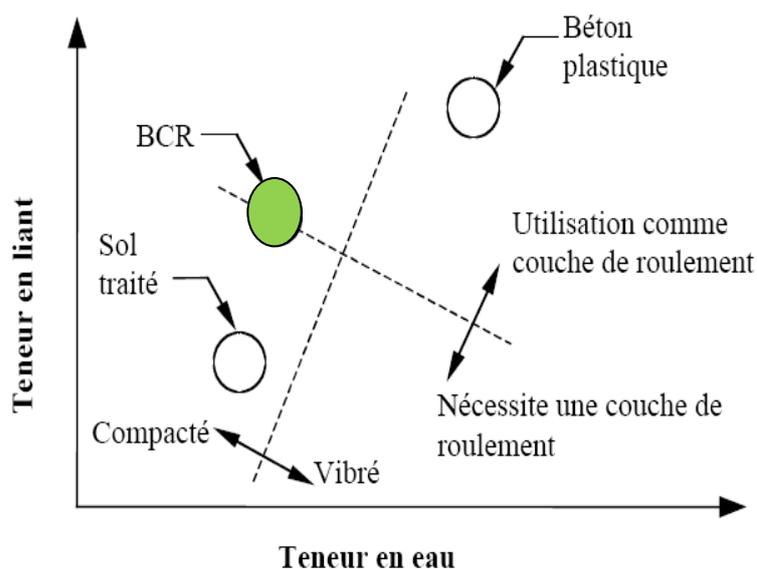


Fig. 1.1. Définition d'un béton compacté au rouleau (Tremblay, 1997).



Fig. 1.2. Mise en place d'un BCR routier (ACI 325, 2001).



Fig. 1.3. Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Bouyge & Forbes, 2007).

1.2 HISTORIQUE

Le BCR a connu un énorme succès dans les domaines de routes et de barrages grâce aux avantages qu'il apporte aux concepteurs et producteurs, sur les plans technique et économique; son faible coût, sa rapidité de mise en place et sa performance mécanique.

Historiquement, le concept du BCR a été utilisé pour la première fois aux Etats Unis en 1942 avec la construction d'une route à Yakima (Washington) par U.S Army Corps of Engineers (Gauthier & Marchand, 2001; ACI 325, 2001).

La technologie du gravier-traité est apparu en Suède en 1930, comme le BCR, il a les mêmes ingrédients que le béton ordinaire, il est mis en place et compacté également de façon similaire au BCR (Fig. 1.4). Le gravier-traité a été employé pour la construction des routes, l'amélioration des sols de fondation, la protection des pentes, et la construction des couches étanches. Il existe cependant une différence essentielle entre le BCR et le gravier-traité, dans la teneur en matériaux cimentaires et la graduation des granulats. Dans la littérature certains ouvrages considèrent le matériau gravier-traité comme une forme de BCR (Harrington et al., 2010; Choi & Hansen, 2005; ACI 325, 2001).

Parmi les plus grands projets routiers réalisés jusqu'à aujourd'hui est la construction de 543464 m² de BCR (avec une épaisseur qui varie entre 203 et 254 mm) à l'Usine de General Motors Saturn au Tennessee. En réalité pour ce projet, une décision a été prise pour transformer l'asphalte par le gravier traité au ciment mais avec une teneur en liant relativement élevée (13%) dans le but d'améliorer la résistance au gel/dégel et à l'usure. Au Canada, la première utilisation de la technologie BCR dans les projets routiers revient en 1976 avec la réalisation d'une aire de triage de billes de bois de surface de 52000 m² en Colombie-Britannique sur l'île de Vancouver (Fig.1.5). Suite au succès du projet de Caycuse, d'autres surfaces de stockage de billes de bois ont été réalisées entre 1976 et 1978 à l'île de la Reine-Charlotte en face de la côte de Colombie-Britannique. Ces surfaces sont encore en service avec un peu de travaux d'entretien.

En 1980, les ingénieurs de l'U.S Army Corps of Engineers ont étudié la possibilité d'utiliser le BCR pour des applications militaires. Deux projets routiers expérimentaux ont été construits en 1983, destinés pour les véhicules à chenilles et les chars, à Fort Gordon (Géorgie) et à Fort Lewis (Washington).

Le premier projet à grande échelle réalisé par U.S Army of Engineers en 1984 sur une superficie de 15175 m². Il présente une surface rigide pour les équipements tactiques. Une résistance à la flexion de l'ordre de 5,5 MPa est atteinte pour une épaisseur de 254 mm de BCR.

Le BCR a été utilisé également durant les années quatre-vingt avec succès pour les installations intermodales où les charges sont très élevées. Des aires ont des surfaces de l'ordre de 44313 m² et 107021 m² ont été réalisées à Houston (Texas) et Denver (Colorado), respectivement. Une grande surface de BCR a été construite, entre 1986 et 1988, au port de Conley et de la Marine de Moran à Boston (ACI 325, 2001).



Fig. 1.4. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930 (Harrington et al., 2010)



Fig. 1.5. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique (Serne, 1997).

La première utilisation du BCR en corps de barrages a été effectuée dans les années soixante avec la réalisation du barrage Gere à Italie et au Manicougan I au Canada avec un béton très ferme placé et compacté à l'aide des bulldozers. Ce béton a été considéré comme un BCR (ACI 207, 1999).

En 1970, Raphael a présenté un papier intitulé "The optimum gravity dam" dans lequel le BCR est proposé comme une technique permettant de réduire le volume des barrages-poids. Il a introduit le concept de placer et de compacter une digue en tout-venant enrichie de ciment utilisant des équipements et des engins de grandes puissances. Raphael, a rapporté que l'augmentation de la résistance au cisaillement du matériau cimenté entraînerait une réduction importante dans la section transversale, comparant avec une digue de barrage-poids classique.

Deux années plus tard, Canon a utilisé les idées de Raphael pour présenter un papier intitulé « Concrete Dam Construction Using Earth Compaction Methods ». Canon a présenté des résultats sur un béton ferme contenant des granulats avec graduation contrôlée. Ce béton est transporté par des camions, mis en place et diffusé avec des chargeurs frontaux puis compacté avec des rouleaux vibrateurs. Il a rapporté comment cette procédure peut être meilleure pour construire un barrage, de même configuration, que la méthode conventionnelle de construction de barrage-poids en béton (Hansen & Reinhardt, 1991).

Au début des années soixante-dix, la philosophie de conception et construction suivant la technique du BCR, est apparue au Japon sous le nom RCD (Roller-Compacted Dam) pour la construction du barrage de Shimajigawa avec utilisation partielle de la technique du BCR (Figure 1.6). Ce barrage a été achevé en 1981 avec un volume total de BCR de 317000 m³. Le barrage de Wilow Creek achevé en 1982 et devenue opérationnel à partir de 1983 a été le premier barrage construit totalement avec la technique du BCR, il présente un volume total de 330 000 m³ (ACI 207, 1999; BaCaRa, 1996).

En Algérie, la technique du BCR a été employée seulement en corps barrage et jusqu'au aujourd'hui, elle n'est pas utilisée pour la construction routière.



Fig .1. 6. Barrage de Shimajigawa au Japon (ACI 207, 1999).

1.3 CONSTITUANTS

La résistance et la durabilité du BCR sont largement influencées par le type et la nature des matériaux choisis. Les matériaux de base constituant le mélange du BCR sont identiques à ceux utilisés pour la préparation du béton ordinaire : granulats, ciment, eau et optionnellement des adjuvants.

Pour arriver à de meilleures performances du BCR, ainsi de répondre aux différentes exigences techniques, il est important de choisir correctement les différents composants. Un bon choix des constituants permet d'atteindre les spécifications techniques exigées et en même temps, d'optimiser la quantité des matériaux employés. La qualité finale d'un mélange du BCR est donc liée de la qualité de ses composants.

1.3.1 Granulats

Dans un mélange du BCR, les granulats représentent approximativement 75 à 85% de son volume total. En effet, le concepteur doit accorder une attention particulière au choix des granulats employés car ils affectent sa propriété physico-mécanique aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

A l'état frais, la maniabilité, le potentiel à ségréguer et la souplesse du mélange sous les rouleaux compacteur sont largement influencés par la nature et le type des granulats utilisés. A l'état durci, la résistance mécanique, le module d'élasticité et les propriétés thermiques sont grandement affectés par les propriétés intrinsèques des granulats. La compactibilité, la densité in situ et conséquemment l'état final de la surface de chaussée (surface de l'usure) sont également influencés par la gradation des granulats ([Harrington et al., 2010](#)).

Les granulats sont soumis à des sollicitations de diverse nature : d'ordre mécanique (lors du malaxage et compactage), d'ordre climatique (gel dégel, mouillage/séchage) et d'ordre chimique (dissolution, sulfatation et réaction alcali-agrégat). De ce fait, un bon choix de la qualité des granulats conduit donc à une optimisation du coût et en même temps assure une bonne durabilité en service.

Le BCR diffère du béton ordinaire par la gradation des granulats, compte tenu que le squelette granulaire, va consolider avec les pressions appliquées par les paveuses et les rouleaux compacteurs. Les différentes proportions de granulats doivent être choisies dans le but de réaliser les objectifs suivants : (i) assurer une consistance appréciable, (ii) aboutir une bonne compactibilité, (iii) satisfaire les spécifications techniques exigées (iv) obtenir un fini de surface appréciable ([Harrington et al., 2010](#)).

La distribution granulométrique combinée des granulats doit être choisie d'une façon adéquate pour minimiser le risque de ségrégation lors de malaxage et de mise en place du BCR. Le squelette granulaire d'un mélange du BCR se compose; des granulats fins (80µm- 5mm) constitués de sable naturel ou artificiel, ou d'un mélange des deux; de granulats grossiers (>5 mm) concassés ou roulés, ou un mélange des deux. Les différentes fractions granulaires peuvent être pré-malaxées et stockées comme une seule fraction dans le cas des grands projets.

Le choix du type de granulats (forme, diamètre, origine) dépend essentiellement des exigences techniques liées à la résistance, la durabilité et de la disponibilité des matériaux.

Pour un mélange de BCR, il est important de limiter le diamètre maximal nominal de granulats grossiers afin de minimiser le risque de ségrégation et de faciliter les conditions de mise en œuvre. Selon la destination du projet, le diamètre maximal de granulats est limité généralement, à 20 mm pour les projets routiers et à 50 mm pour les barrages.

L'emploi de granulats fins dans le BCR permet de remplir les vides intergranulaires et facilite donc le compactage, pour avoir un squelette aussi dense que possible. En effet, et pour arriver à une graduation optimale, il est préférable que la graduation de granulats grossiers et fins se situe entre les limites présentées dans les [Tableaux 1.2 et 2.3 \(USACE, 2000\)](#).

[Tableau 1.2](#). Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après [\(USACE, 2000\)](#).

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)		
	4,75 à 75 mm	4,75 à 50 mm	4,75 à 19 mm
75	100		
63	88		
50	76	100	
37,5	61	81	
25	44	58	
19	33	44	100
12,5	21	28	63
9,5	14	18	41
4,75	-	-	-

[Tableau 1.3](#). Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après [\(USACE, 2000\)](#).

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)
9,5	100
4,75	95-100
2,36	75-95
1,18	55-80
0,6	35-60
0,3	24-40
0,15	12-28
0,075	6-18
Module de finesse	2,1-2,75

1.3.2 Liant

Le choix du type et du dosage de ciment pour la confection du BCR est fonction des exigences requises et de la destination du projet. Pour un BCR routier, la quantité de ciment est plus grande par rapport à un BCR d'ouvrage massif comme le barrage, puisque les sollicitations mécaniques sont plus grandes.

En revanche, il est important de minimiser la quantité de ciment pour un BCR destiné aux barrages afin de réduire la chaleur dégagée pendant l'hydratation.

Pour un mélange de BCR, la quantité de ciment représente 12 à 16% de la masse totale de ses constituants secs. Il est désavantageux d'employer une teneur en ciment trop élevée car elle augmente le phénomène de retrait. Un mélange de BCR peut être confectionné avec n'importe quel type de ciment hydraulique, mais l'expérience montre que l'utilisation d'ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane, fumée de silice, cendres volantes,...) permet d'améliorer la maniabilité, les propriétés mécaniques et de faciliter les opérations de mise en place et de compactage.

En plus de ces avantages techniques, l'emploi des ajouts cimentaires dans le BCR, réduit significativement le coût du projet par diminution de la quantité de ciment dans le mélange. Dans certains cas, l'utilisation des cendres volantes permet d'améliorer la compactibilité et l'aspect de la surface de roulement (finition) par l'augmentation du pourcentage de fines dans le mélange.

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation de ces ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparés au ciment portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans le béton est, en réalité, l'apport des avantages techniques. En effet, dans plusieurs cas, ils sont utilisés de préférence au ciment portland indépendamment des considérations économiques ou environnementales. (Neville, 2000).

Dans de nombreux cas, l'addition des cendres volantes donne des résistances à long terme plus élevées, car la microstructure du mélange résultant est améliorée grâce à des réactions pouzzolaniques supplémentaires occasionnées par leur présence dans le mélange.

Certains chercheurs ont recommandé de limiter le pourcentage maximal des cendres volantes incorporées à 20% (Marchand et al., 1997; Vahedifard et al., 2010). Autres chercheurs (Tayabji & Okamoto, 1987; Ouellet, 1998), ont rapporté que l'utilisation des cendres volantes avec des pourcentages plus élevés n'affecte pas négativement la performance à long terme. Selon ces travaux, l'effet-*filler* des cendres volantes peut compenser sa faible réactivité hydraulique. Suite à ces observations opposées, une attention particulière doit être accordée à l'emploi des cendres volantes, car elles sont diversifiées selon leur origine, leur granulométrie et leur composition chimique (Marchand et al., 1997).

Les additions cimentaires sont ajoutées généralement aux mélanges de BCR par remplacement partiel du ciment. L'expérience montre que l'utilisation de la fumée de silice (composée des particules sphériques extrêmement fines) dans les mélanges de BCR, permet d'améliorer les caractéristiques de résistance à court et à long terme. Tandis que les cendres volantes ont un effet bénéfique sur la réponse mécanique à long terme. D'après (Marchand et al., 1997; Vahedifard et al., 2010), le pourcentage maximal des fumées de silice dans le BCR ne doit pas dépasser 10% de la quantité totale de ciment.

D'après Harrington et al. (2010), l'utilisation du laitier de haut fourneau et de la fumée de silice n'est pas courante dans l'Ouest du Canada ou aux États-Unis. La fumée de silice a, cependant, été utilisée au cours des 10 dernières années dans l'Est du Canada, particulièrement au Québec, pour la production du BCR à haute performance. Dans les régions à temps froid, la fumée de silice peut améliorer les propriétés mécaniques et accélérer le développement de la résistance du BCR. La fumée de silice est principalement utilisée dans les ciments composés à un niveau de 7-8% de remplacement. Les ciments composés à base de pouzzolane et de laitier peuvent être employés également dans la production du BCR.

1.3.3 Adjuvant

Les Adjuvants chimiques couramment utilisés dans le béton conventionnel comme les réducteurs d'eau, les retardateurs, les accélérateurs et super-plastifiants peuvent être incorporés dans les mélanges de BCR.

A cause de l'aspect sec du BCR, les adjuvants doivent être ajoutés avec des quantités supérieures à celles utilisées dans le béton classique pour être efficaces (Gauthier & Marchand, 2001; Harrington et al., 2010).

1.3.4 Eau

La quantité d'eau utilisée pour le gâchage représente généralement 4,5-5,6% de la masse totale des constituants secs. Tandis que la qualité de l'eau de gâchage des mélanges de BCR doit répondre aux mêmes exigences que pour un béton conventionnel. La quantité d'eau nécessaire pour le gâchage est déterminée généralement empiriquement pour atteindre la densité maximale.

1.4 TECHNIQUES DE PRODUCTION, MISE EN PLACE ET COMPACTAGE

1.4.1 Production et mise en place

Vu que la quantité de l'eau est relativement faible dans les mélanges de BCR, par rapport aux bétons ordinaires, une énergie de malaxage plus importante est nécessaire pour distribuer uniformément l'eau dans la matrice. Le BCR peut être produit en centrale fixe puis transporté avec des camions à bennes ou préparé au niveau d'une centrale mobile pour les grands projets.

La mise en place du BCR, en construction routière, est réalisée à l'aide de finisseurs à enrobés bitumineux qui ont une aptitude à consolider le mélange à 80 % de sa densité maximale. Tandis que, pour les barrages la procédure de mise en place est faite généralement à l'aide des niveleuses. Le malaxage du BCR est réalisé généralement suivant deux méthodes : discontinu et continu.

Le malaxage discontinu est utilisé généralement pour les petits projets. Le BCR est mélangé dans un tambour fixe (Fig. 1.7) ou dans les camions mélangeurs. Il est produit par lot (gâchée). Il est important de noter que le tambour doit être vidé complètement après chaque cycle de malaxage. En revanche, Le malaxage continu consiste à produire le BCR avec une vitesse constante dans une centrale alimentée continuellement en granulats, en matériaux cimentaires et en eau (Fig. 1.8). Le BCR frais sort

du deuxième coté à une cadence régulière. Ce type de malaxage est utilisé dans les grands projets (Harrington et al. 2010).

Toutefois, le choix du type de malaxage pour produire le BCR dépend de plusieurs facteurs tels que, l'importance du projet (volume), la disponibilité des équipements, les considérations économiques et les distances. Le temps de malaxage, pour un mélange de BCR, est généralement plus long que pour un béton ordinaire. La période de malaxage dépend des matériaux constituants et de leurs proportions. Pour assurer une bonne uniformité du mélange, le temps de malaxage est déterminé généralement avant de commencer le projet à partir d'essais préliminaires de formulation et de résistance.



Fig .1. 7. Malaxage du BCR par gachée (Harrington et al., 2010).

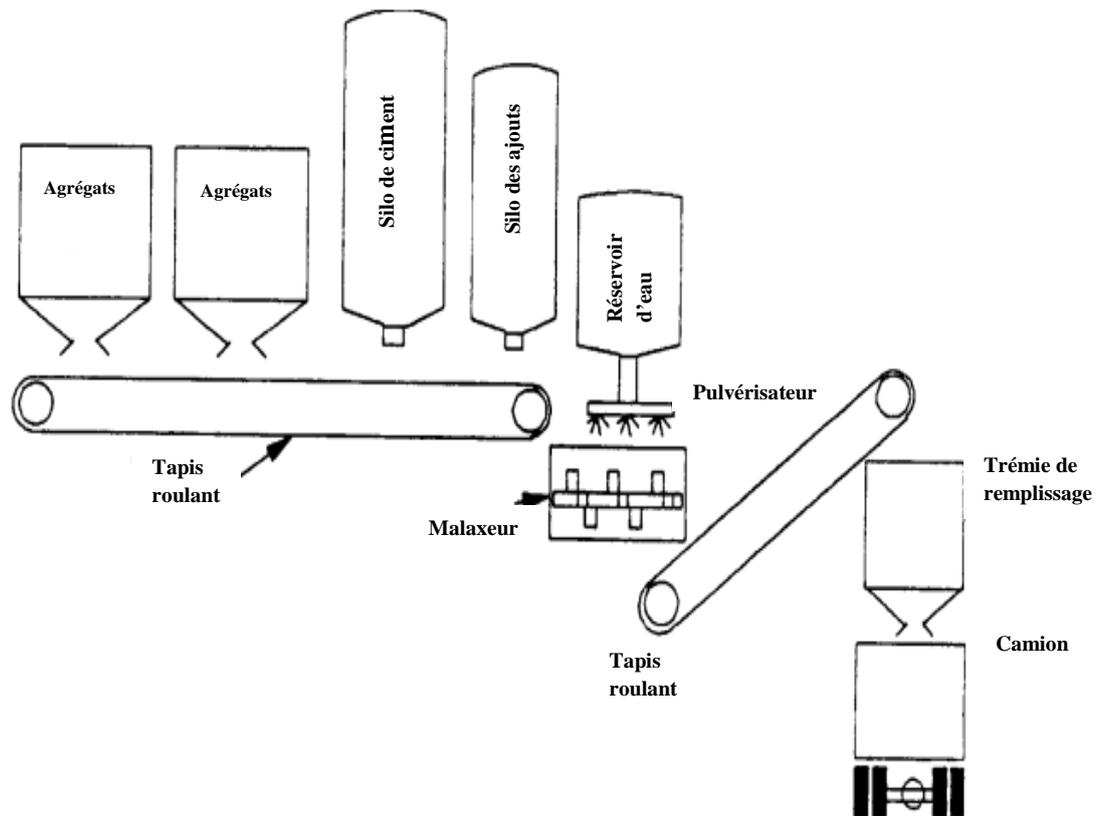


Fig .1. 8. Schéma d'une centrale de malaxage en continu (Harrington et al., 2010).

1.4.2 Compactage

Pour tout type de béton, il est très important d'assurer un bon serrage du squelette granulaire pour atteindre les propriétés mécaniques requises. Les caractéristiques de résistance, de déformabilité et de durabilité d'un mélange de BCR sont largement influencées par le niveau de densification atteint. L'opération de compactage est souvent plus délicate à cause de l'aspect sec du BCR et de sa composition.

En effet, le béton doit être mis en place et compacté en couches successives, que ce soit pour les structures massives ou pour les routes. La phase de compactage commence juste après la mise en place du BCR, généralement à l'aide d'un rouleau compacteur vibrateur de 10 tonnes (Fig. 1.9) (Harrington et al., 2010; Gauthier & Marchand, 2001; BaCaRa, 1996). Dans les endroits où l'accès est difficile, il est nécessaire d'employer des petits compacteurs.



Fig. 1.9. Rouleaux compacteurs sur pneus et cylindres.

Généralement le BCR est compacté dans les 30 minutes qui suivent son malaxage dans la centrale à béton. Toutefois, ce temps peut être allongé à une heure en cas d'un problème imprévu (panne de camion de transport ou de paveuse).

D'après [Pittman \(1989\)](#), un compactage typique consiste à réaliser deux passages (un mouvement de va et vient égal à deux passages) à partir d'un pied (30cm) du bord libre suivis par deux passages le long du joint frais ([Fig. 1.10](#)) et finalement deux passages sont réalisés au centre de la voie. Ce schéma de compactage par rouleaux doit être répété pour un nombre de six passages vibratoires. Ensuite, quatre à huit passages sont réalisés immédiatement par les rouleaux pneumatiques pour resserrer la surface de la chaussée.

La densité et la résistance à la compression des mélanges de BCR sont directement liées à la qualité du compactage réalisé. Pour un mélange correctement formulé, le compactage est considéré comme suffisant, si le pourcentage de vides est inférieur à 1,5%. Un compactage insuffisant avec 5% de vides peut conduire à une chute de résistance de 30%. Alors que 20% de vides produisent une chute de résistance de l'ordre de 80% ([USACE, 2000](#)).

D'après [Berga et al. \(2003\)](#), l'application d'une énergie de compactage insuffisante crée des zones de faibles densités à la partie basse des couches du BCR. Ces zones peuvent créer des problèmes de stabilité, surtout en cas de développement des

contraintes de traction sous l'effet d'un éventuel séisme. Plusieurs facteurs peuvent influencer la compactibilité du mélange de BCR : la composition, la distribution granulométrique des granulats, la quantité de l'eau libre dans le mélange et le niveau d'énergie de compactage appliqué (Kokubu et al., 1996; Shihata, 2000; Meddah et al., 2014a).

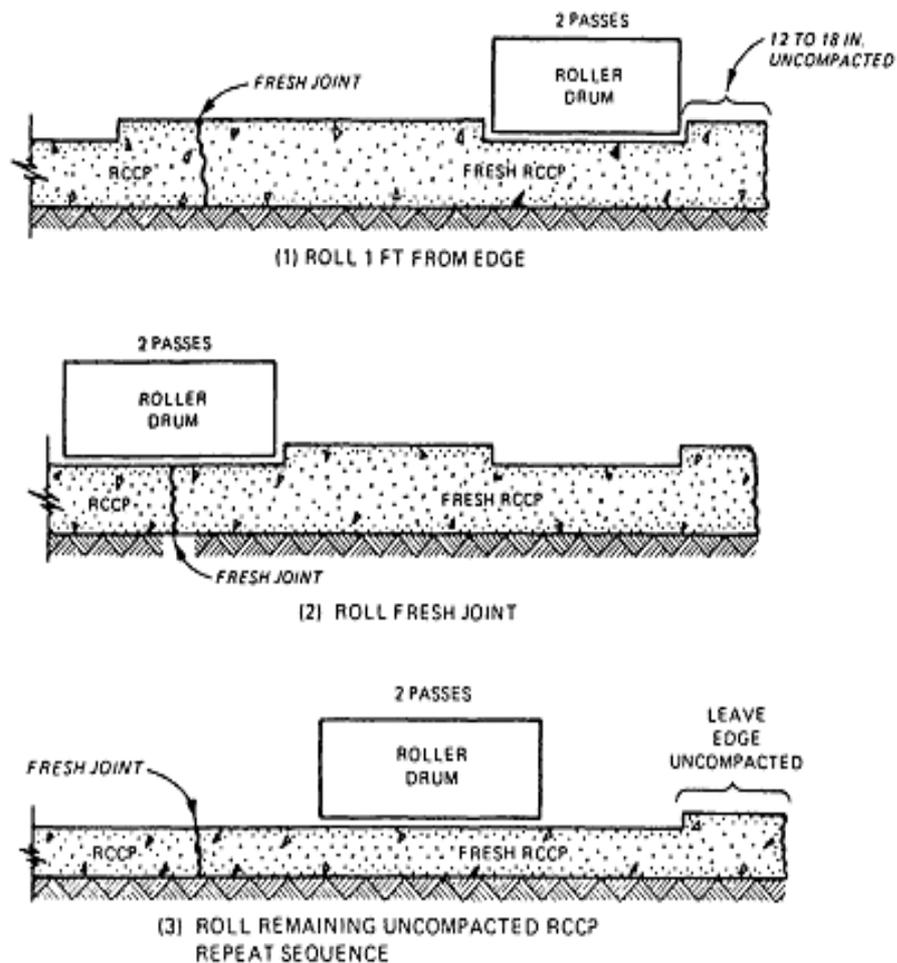


Fig. 1.10. Schéma du compactage typique du BCR (Pittman, 1989; ACI 325, 2001).

1.5 Techniques de fabrication des éprouvettes de BCR

Les méthodes classiques de production des éprouvettes de béton ne sont pas utilisables directement pour produire des éprouvettes de BCR, à cause de son aspect sec et de sa composition (Nanni & Meamarian, 1993). Le problème est de simuler expérimentalement, en laboratoire ou in situ, les conditions de mise en place et de compactage pour que les propriétés étudiées soient le plus proches possible des conditions réelles. Plusieurs méthodes : Proctor, vibro-compactage et le marteau vibrant ont été citées dans la littérature pour réaliser les éprouvettes de BCR.

La méthode Proctor consiste à compacter le béton frais dans un moule rigide de forme cylindrique d'une façon similaire à celle utilisée pour le compactage des sols en laboratoire, essai Proctor modifié. Le béton est mis dans le moule en cinq couches successives de même épaisseur, chacune est ensuite compactée par la chute libre d'une dame de masse 4,5 Kg à partir d'une hauteur de 457 mm.

La méthode Proctor, a été employée par plusieurs chercheurs pour produire des éprouvettes de BCR de différentes dimensions, toutefois, le nombre de couches, le nombre de coups appliqués par couche et la hauteur de chute peuvent être ajustés en fonction du moule employé, pour atteindre l'énergie de compactage de référence. Cette méthode s'adapte bien avec des éprouvettes cylindriques que prismatiques à cause de leur large surface et aussi de la difficulté de compacter les coins (Nanni & Meamarian, 1993).

Shihata (2000) a réalisé une étude intensive sur la méthode de Proctor, dans laquelle, l'effet de la variation de l'énergie de compactage appliqué sur la densité et de la résistance a été évalué. Il a utilisé dans son étude des éprouvettes cylindriques de dimensions (100 x 200) mm. Il a varié le nombre de couches et le nombre de coups par couche afin de contrôler l'énergie de compactage. Celle-ci a été exprimée comme le pourcentage de l'énergie de référence de l'essai Proctor normal, Elle varie de 300 kN-m/m³, soit 50% de l'énergie de référence, jusqu'à 2698 kN-m/m³, soit 446% de l'énergie de référence de l'essai Proctor normal.

Les résultats obtenus par Shihata (2000), montrent un effet significatif de l'énergie de compactage sur la densité et les propriétés mécaniques (résistances en compression et en traction). Il a également rapporté que les propriétés mécaniques du BCR sont plus sensibles aux petits changements de densité que les bétons ordinaires. Certains chercheurs

de la littérature ont rapporté que le nombre de couches n'est pas aussi important que le type de la dame et l'intensité d'effort de compactage appliqué (Hansen & Reinhardt, 1991; Shihata, 2000).

Il est possible de fabriquer des éprouvettes de BCR en utilisant une table vibrante et une surcharge. Cette méthode est connue sous le nom vibro-compactage. Le principe de cette technique est inspiré de la méthode de la mesure de la consistance des bétons fermes (essai Vébé). Elle consiste à placer le béton dans un moule rigide de forme cylindrique de dimensions 150x300 mm, ensuite une surcharge de l'ordre de 9 kg est placée sur le béton. L'ensemble (moule, béton et la surcharge) est ensuite fixé sur la table vibrante comme illustré à la Figure 1.11. La méthode est actuellement standardisée par ASTM, mais uniquement pour les éprouvettes cylindriques (ASTM C1176, 2008).

Dans la littérature, cette procédure est couramment employée pour fabriquer des éprouvettes de BCR, quelque soit leur forme et leur taille, par ajustement de la surcharge appliquée sur le béton frais pour arriver à la pression de référence standardisée, de l'ordre de 4,9 kPa.

Le Tableau 1.4, inspiré du mode opératoire de Projet BaCaRa (1996), regroupe les différentes surcharges qui peuvent être utilisées en fonction des éprouvettes employées.

Tableau 1.4. Surcharges utilisées pour le compactage d'après BaCaRa (1996).

Dimensions du moule (cm)	16x32	25x50
Squelette (mm)	0/40	0/63
Surcharge (kg)	13	43
Nombre de couches	2	4
Piquage (coups/couche)	25	25

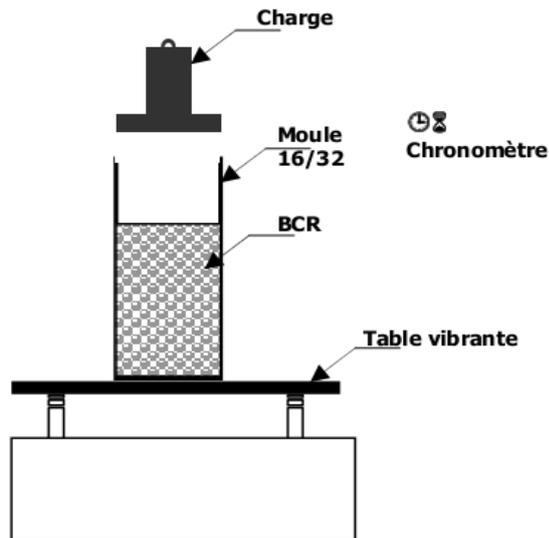


Fig .1.11. Principe de la méthode vibro-compactage (Zdiri, 2008).

Les éprouvettes de BCR peuvent être fabriquées également par un marteau vibrant. Cette technique est fréquemment employée tant en chantier qu'en laboratoire, grâce à son utilisation simple. Elle consiste à appliquer, directement sur le béton frais, un marteau vibrant électrique équipé d'un arbre et d'une plaque circulaire (Fig. 1.12).

Le béton frais est placé en quatre couches d'égale épaisseur. La consolidation d'une couche se termine, conventionnellement, lorsqu'on observe la formation d'une couche de mortier autour de la plaque circulaire. La procédure est décrite dans la norme ASTM C1435.



Fig. 1.12. Marteau vibrant (Harrington et al., 2010).

Tayabji & Okamoto (1987) ont réalisé une étude comparative entre la méthode Proctor et la méthode vibro-compactage. Les Figures 1.13 et 1.14 illustrent les résultats trouvés et une bonne corrélation entre les deux méthodes est signalée par les auteurs. Ils ont rapporté que les densités et les résistances développées par les éprouvettes compactées suivant la méthode Proctor sont plus grandes que celles obtenues par la méthode vibro-compactage. Dans une autre étude menée par Shihata (2000), on constate le contraire, les propriétés mécaniques des éprouvettes préparées par la méthode vibro-compactage sont supérieures à celles des éprouvettes confectionnées par la méthode Proctor. Cependant, en terme de densité, il a confirmé les résultats de Tayabji & Okamoto (1987).

Nanni & Meamarian (1993), ont réalisé une étude sur les méthodes de fabrication des éprouvettes de BCR. Ils ont étudié plusieurs facteurs ; la méthode de compactage, la taille de l'éprouvette et la teneur en eau. Deux types d'éprouvettes ont été employés dans leur étude ; (152 x 305 mm), (102 x 203 mm). Ils ont rapporté que la méthode vibro-compactage donne de faibles densités et des résistances plus élevées que les méthodes de compactage par l'impact (Proctor et marteau vibrant). En terme de taille d'éprouvette, les auteurs ont recommandé l'utilisation de petites éprouvettes pour leur simplicité d'utilisation et la corrélation avec des carottes découpées. Hansen & Reinhardt (1991), ont rapporté que la fréquence du marteau vibrant est plus proche de l'action de compactage par rouleaux vibrateurs que la procédure Proctor modifié.

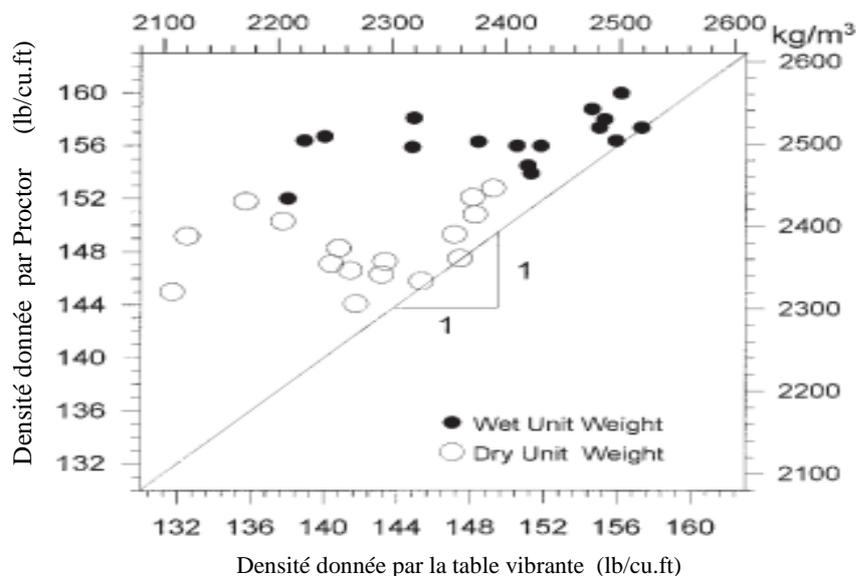


Fig. 1.13. Comparaison entre la méthode de Proctor et la méthode vibro-compactage en terme de densité (Tayabji & Okamoto 1987).

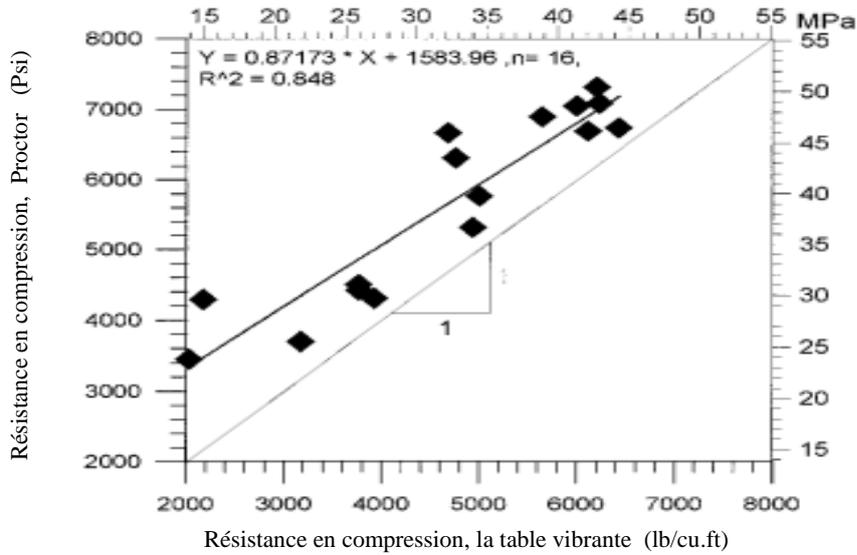


Fig. 1.14. Comparaison entre la méthode de Proctor et la méthode vibro-compactage en terme de résistance en compression (Tayabji & Okamoto 1987).

Aucune méthode parmi celles citées précédemment n'est standardisée pour la fabrication des éprouvettes prismatiques, vue la difficulté de les compacter. Malgré cela, plusieurs chercheurs ont employé la méthode vibro-compactage et la méthode du marteau vibrant pour compacter les prismes. Zdiri (2008), a utilisé des éprouvettes cubiques et prismatiques pour les essais de compression et de flexion, respectivement. Il a placé des surcharges de compactage de mêmes dimensions transversales avec l'éprouvette soumise à l'essai (Fig 1. 15). Une pression comparable à celle donnée par la norme ASTM C1176 a été appliquée pendant le compactage.

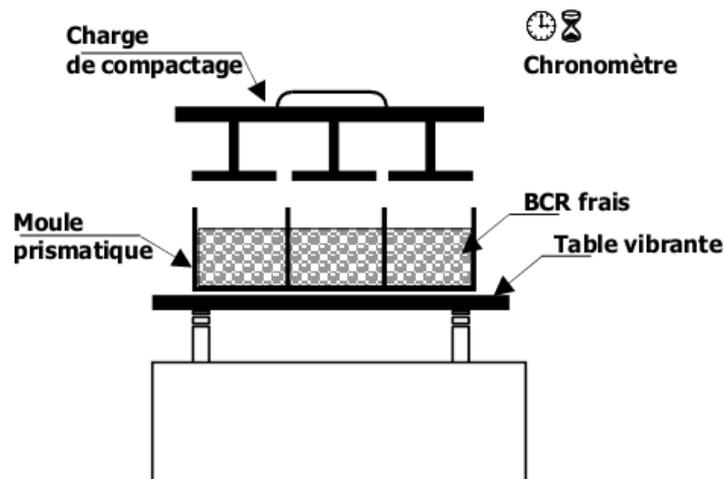


Fig. 1.15. Schéma de compactage des éprouvettes prismatiques suivant la méthode vibro-compactage (Zdiri, 2008).

1.6 PROPRIETES DE BCR

1.6.1 À l'état frais

A l'état frais, les principales caractéristiques physiques qui décrivent la rhéologie des mélanges du BCR sont la masse volumique et la maniabilité. Cette dernière est considérée comme étant un élément clé pour la préparation d'un mélange de BCR, car elle a un effet direct sur le déroulement des opérations de mise en œuvre et le développement des propriétés mécaniques.

La détermination de la maniabilité d'un mélange de BCR permet de contrôler son uniformité. Elle donne une appréciable indication sur l'effort qui devra être appliqué dans la phase de consolidation. La maniabilité du BCR peut être définie comme le temps nécessaire pour compacter le mélange sous l'action d'une énergie externe. Elle est mesurée généralement à l'aide de l'appareil Vébé (Fig. 1.16)

L'essai Vébé, comme il est décrit dans la norme [ASTM C1170](#), consiste à mesurer le temps nécessaire pour consolider le mélange. Le compactage se termine lorsqu'on observe la formation d'un cordon de mortier autour du plexiglas sur lequel repose une surcharge.

La mesure de la masse volumique à l'état frais permet de contrôler l'uniformité du mélange et aussi de comparer sa densité, par rapport aux valeurs théoriques ou par rapport aux valeurs idéales trouvées pendant les essais préliminaires. La détermination de la masse volumique humide est indispensable puisqu'elle permet de connaître l'indice de compactibilité ou simplement le niveau de densification atteint. D'après [Pittman \(1989\)](#), plusieurs facteurs peuvent influencer la densité in situ du BCR : le type de la paveuse employée, le nombre de passages effectué par le rouleau compacteur, le temps mis jusqu'au premier compactage et l'épaisseur de la couche.

La masse volumique du BCR à l'état frais est généralement mesurée avec trois procédures : Proctor ([ASTM D1557](#)), vibro-compactage ([ASTM C1176](#)) et marteau vibrant ([ASTM C1435](#)).

La masse volumique humide finale du BCR peut être mesurée après la mise en place avec le nucléo-densimètre afin de comparer les valeurs trouvées à celles de référence (mesurées sur des éprouvettes).

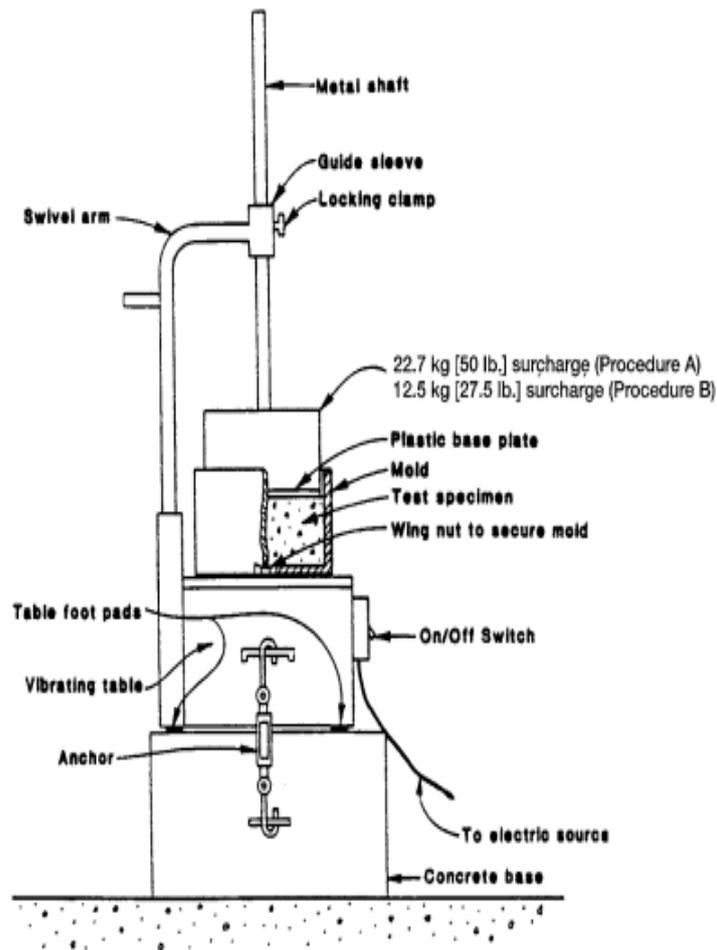


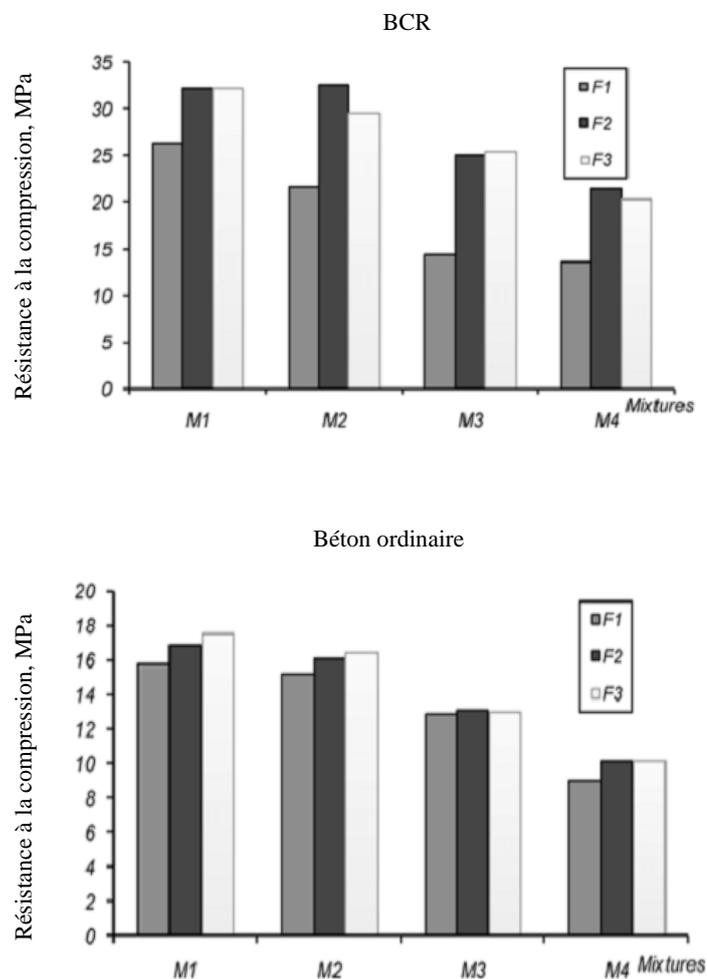
Fig. 1.16. Appareil Vebe (ASTM C1170, 2008).

1.6.2 À l'état durci

Les caractéristiques mécaniques du BCR doivent être choisies pour qu'il puisse supporter les différentes sollicitations qui lui seront appliquées. Ces propriétés dépendent de la quantité et du type de ciment employé, du rapport E/C, de la qualité des granulats utilisés et du niveau de densification atteint. Le squelette granulaire des mélanges de BCR est généralement dense ce qui permet de développer des résistances élevées. La résistance en compression du BCR est une caractéristique de grande importance, puisqu'elle est utilisée pour déterminer l'épaisseur de la couche.

Le degré de compactage joue un rôle prépondérant dans la production de la résistance des mélanges de BCR. Généralement les vides sont créés lorsqu'une quantité insuffisante des granulats fins et/ou de pâte de ciment a été employée. L'augmentation de l'énergie de compactage permet de réduire ces vides et d'améliorer la résistance (Hansen & Reinhardt, 1991).

Le compactage intensif du BCR dans le sens vertical, génère un matériau fortement anisotrope, par rapport à un béton ordinaire. Dans ce contexte, [Zdiri et al. \(2010\)](#) ont examiné l'anisotropie causée par le compactage unidirectionnel. Ils ont comparé les propriétés mécaniques des cubes de BCR, testés dans les trois directions, avec celles du béton ordinaire ([Fig. 1.17](#)). Les auteurs ont étudié plusieurs mélanges avec des compositions différentes. Les résultats rapportés par les auteurs montrent que les mélanges de BCR sont fortement anisotropes. Ils ont indiqué également que sous l'effet de la surcharge appliquée associée à un mouvement vibratoire, les granulats grossiers suivent une direction privilégiée.



[Fig. 1.17](#). Etude de l'anisotropie, comparaison entre un BCR et un béton conventionnel ([Zdiri et al. 2010](#))

La résistance à la compression est souvent déterminée dans la phase de sélection des différentes proportions du mélange. Elle peut être considérée comme un indicateur

important pour d'autres propriétés du BCR, telle que la durabilité. Généralement la résistance à la compression des mélanges de BCR varie entre 28 et 41 MPa. Pour certains ouvrages, la résistance peut atteindre des valeurs élevées dépassant 48 MPa (Harrington et al., 2010).

Le [Tableau 1.5](#) montre les résultats de résistance à la compression sur des carottes prélevées après une période de service. Il est clair que la résistance à la compression peut atteindre des valeurs élevées voire même comparables à celles des bétons ordinaires.

Pour un BCR destiné à un projet routier, il est important de déterminer la résistance à la flexion car la rupture dans un corps de chaussée est faite généralement sous une sollicitation de flexion. En réalité, le comportement des mélanges de BCR sous l'effet des sollicitations de flexion est assez mal connu et les données sont très limitées, à cause de la difficulté de produire des éprouvettes prismatiques à partir des projets préexistants ([Fig. 1.18](#)).

Tableau 1.5. Résultats de résistance en compression sur carottes prélevées dans des projets réalisées aux Etats Unis ([ACI 325, 2001](#)).

Projet	Age, mois	Epaisseur nominale de la couche testée, mm	Résistance à la compression spécifiée à 28 jours, MPa	Résistance à la compression moyenne, MPa		
				Partie supérieure de la carotte	Partie inférieure de la carotte	Carotte non coupée
A	9	178	31	56	43,8	46,6
B	19	165	34,5	-	-	32,7
C	19	216	34,5	29,9	16,9	31,4
D	18	216	25,3	-	-	48,5
E	12	254	13,8	15,8	31,9	-
F	28	178	31	32,3	29,2	-
G	32	216	34,5	47,5	33,9	-

Tableau 1.6. Valeurs typiques de résistance sur carottes à partir de quelques projets de BCR, Etats Unis. (ACI 325, 2001).

Projet	Age, jours	Résultats des essais sur les prismes découpés et carottes	
		Résistance moyenne à la flexion, MPa	Résistance moyenne à la traction par fendage, MPa
Ft. Stewart	90	6,96	-
Ft. Hood	7	4,56	-
	28	5,72	-
Harvey Barracks	7	-	2,33
	28	5,4	2,77
Ft. Campbell	7	4,46	2,74
	28	-	-
Aberdeen Proving Ground	7	3,81	2,61
	28	4,32	3,11

La résistance à la flexion pour un BCR généralement varie entre 3,5 et 7 MPa. Quelques valeurs typiques sont présentées dans le Tableau 1.6. La résistance à la traction par fendage généralement varie entre 2,3 et 4,1 MPa. Comparant au cas de la flexion, l'essai de traction par fendage peut être effectué sur carottes prélevées à partir des projets préexistants.



Fig. 1.18. Préparation d'une éprouvette prismatique à partir d'une carotte (Harrington et al., 2010).

A partir des essais sur carottes et des prismes coupés, il a été montré que la relation entre les résistances en compression et en flexion, pour le BCR, est similaire à celle pour un béton ordinaire.

La relation s'écrit :

$$f_r = C \cdot \sqrt{f_c}$$

f_r : résistance à la flexion (essai trois-points)

f_c : résistance à la compression

C : constant entre 9 et 11.

Un autre modèle a été proposé par [Zdiri et al. \(2009\)](#), permet d'estimer la résistance à flexion à partir de la résistance à la compression à 28 jours.

$$f_r = 0.24 \cdot f_c^{0.91}$$

1.7 METHODES DE FORMULATION

La formulation du béton consiste en général en la détermination des différentes proportions qui permettent d'obtenir une composition optimale. La combinaison la plus économique permette de satisfaire aux différentes exigences techniques liées aux critères de résistance, durabilité et de maniabilité.

Vu la spécificité du BCR comme un béton à affaissement nul, très ferme, qui contient une grande quantité de granulats et une faible teneur en ciment, les méthodes classiques de formulation du béton ne sont pas applicables directement sur le BCR. Plusieurs méthodes ont été citées dans la littérature, et sont présentées dans les paragraphes suivants, permettent de sélectionner les différentes proportions pour le BCR. Toutefois, le choix entre ces méthodes dépend de la destination du projet (routes ou barrages) et des moyens disponibles.

Le rapport [ACI 325](#) présente deux procédures pour la formulation des mélanges de BCR destiné au corps routier. La première est basée sur la recherche d'une limite de maniabilité alors que la seconde est reposée sur le principe de définir l'état le plus dense du mélange utilisant les concepts de la Géotechnique. Les deux méthodes, peuvent être utilisées séparément pour les routes et pour les barrages.

1.7.1 Méthode basée sur les limites de maniabilité

Cette méthode consiste à déterminer les proportions du mélange de telle sorte à atteindre une maniabilité optimale qui peut satisfaire aux exigences techniques. La maniabilité du béton est mesurée à l'aide de l'appareil Vébé. Elle est exprimée en secondes. La procédure de formulation est composée de plusieurs étapes : détermination du volume de pâte minimal, choix du rapport eau/liant et enfin l'ajustement des proportions de granulats.

Dans la première étape, une série de mélanges de mortiers est préparée à différents rapports eau/ciment et à différents rapports sable/ciment sont étudiés, afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chaque rapport eau/sable des mélanges sont préparés à différents rapports eau/ciment et la masse volumique est mesurée (Fig. 1.19).

La deuxième étape consiste en la détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges correspondants aux masses volumiques optimales (à différents rapports E/C). Le choix du rapport eau/ciment est fait selon les propriétés mécaniques requises. La troisième étape consiste à optimiser des granulats fins et grossiers selon la maniabilité voulue.

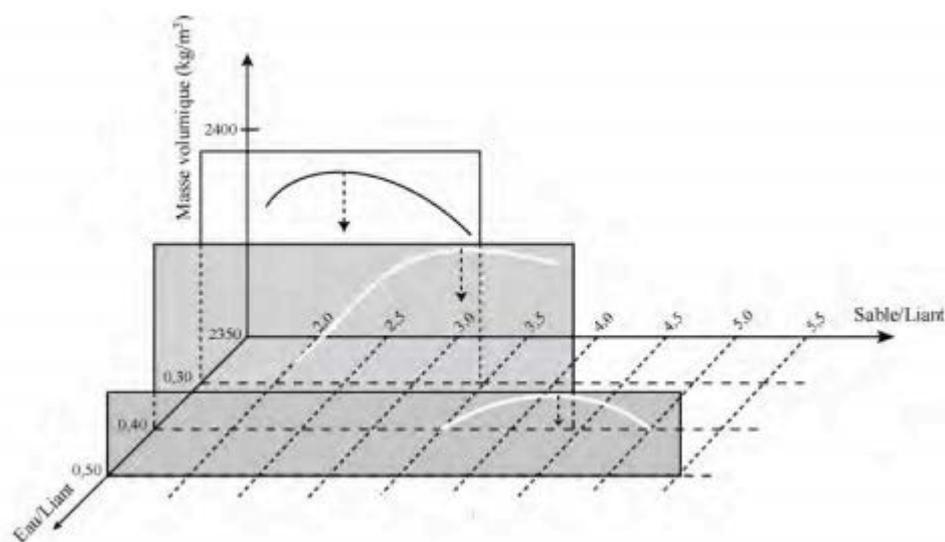


Fig. 1.19. Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand, 2001)

1.7.2 Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique

Dans cette méthode, le principe de la détermination des différentes proportions est basé sur le concept de compactage des sols en laboratoire. Elle consiste à utiliser l'essai Proctor modifié, suivant le mode opératoire de la norme [ASTM D1557](#), afin d'obtenir la relation de la variation de la densité en fonction de la teneur en eau.

La teneur en ciment est déterminée selon les caractéristiques mécaniques exigées, généralement entre 200 et 350 kg/m³. Tandis que, la teneur en eau optimale est estimée sur la base des essais de compactage du béton frais.

Cette méthode est plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont utilisés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée, ce que l'on trouve généralement avec les mélanges de BCR destinés aux projets routiers ([Marchand et al., 1997](#); [Gauthier & Marchand, 2001](#)).

Les proportions en granulats fins et grossiers sont déterminées par rapport à un fuseau granulométrique ([Fig. 1.20](#)). Puis une série de mélanges du béton est préparée variant chaque fois la teneur en matériaux cimentaires, entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs.

Pour chacune des teneurs en liant, des éprouvettes sont préparées à différentes teneurs en eau puis compactées dans le moule Proctor modifié à une énergie spécifique. Les éprouvettes sont fabriquées en cinq couches d'égale épaisseur et compactées de la même manière (56 coups par couche). La masse volumique du moule compacté est ensuite mesurée et la densité sèche est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_d = \left(\frac{\rho_h}{\omega + 100} \right) 100$$

ρ_d : densité sèche.

ρ_h : densité humide maximale mesurée.

ω : teneur en eau réelle (la teneur en moyenne calculée à partir des pesées de prélèvement de béton frais, avant et après étuvage).

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est tracée dans un graphique (Fig. 1.21). La teneur en eau correspondant à la densité sèche maximale (sommet de la courbe) représente la teneur en eau optimale. Des essais de résistance en compression sont réalisés sur des éprouvettes préparées à différentes teneurs en eau optimales. Le mélange ayant la teneur en liant minimale et possédant les propriétés mécaniques requises est alors choisi (Marchand et al., 1997).

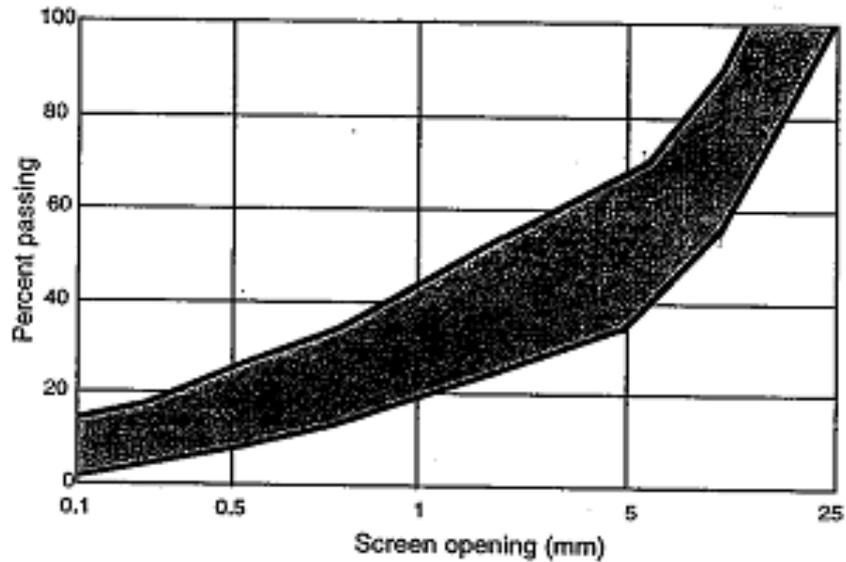


Fig. 1.20. Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al., 1997; Gauthier & Marchand, 2001).

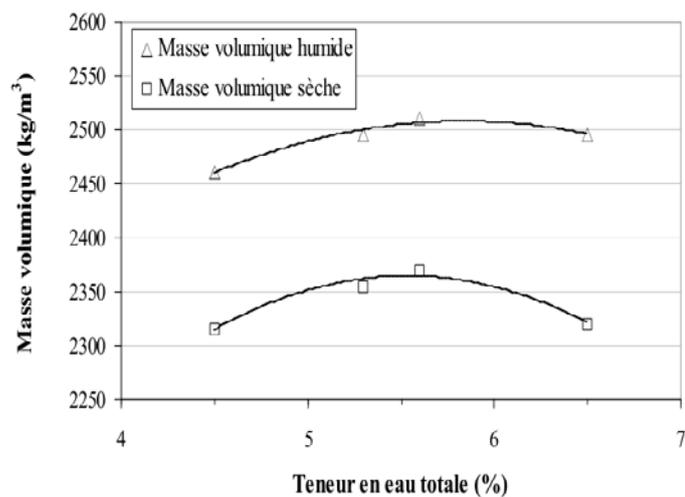


Fig. 1.21. Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001).

1.7.3 Autres méthodes

Outre les méthodes présentées précédemment, dans le rapport [ACI 207](#) on y présente d'autres procédures, qui permettent de formuler le BCR. Mais il semble qu'elles sont plus appropriées aux mélanges de BCR destinés aux barrages. Parmi ces méthodes ; la méthode de l'U.S Corps of Engineers et la méthode du volume optimal, y sont citées.

La procédure de formulation selon l'approche de l'US Army Corps of Engineers, consiste dans une première étape à sélectionner les proportions des granulats, en effet, des distributions granulométriques idéales sont proposées. Le rapport du granulat fin au granulat grossier peut être aussi déterminé à partir des valeurs tabulées, en fonction du diamètre maximal de granulat et du type de granulat grossier.

La deuxième étape consiste à choisir la teneur en ciment empiriquement à partir d'un abaque. La teneur en eau est ensuite fixée selon la maniabilité voulue et des essais Vébé sont nécessaires. Finalement, la teneur en ciment est fixée à partir de la teneur en eau choisie et du rapport E/C.

La méthode du volume optimal comporte trois étapes ; la première consiste en la sélection d'une granulométrie sur la base de la formule modifiée de Fuller-Thompson, utilisée généralement pour la formulation des bétons bitumineux. Cette formule permet d'obtenir une courbe granulométrique produisant un squelette dense. La deuxième étape consiste en la sélection du volume de pâte pour une maniabilité désirée.

La dernière étape dans cette procédure consiste à choisir le rapport E/C et le type de ciment permettant d'obtenir la résistance mécanique spécifiée. Le rapport E/C satisfaisant les propriétés mécaniques désirées dépend à la fois du type de ciment utilisé et des propriétés mécaniques des granulats employés. A cet effet, deux à trois gâchées sont requises pour déterminer le rapport E/C optimal.

Toutes les méthodes citées sont basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques. Il existe néanmoins, d'autres méthodes qui s'appuient sur des approches théoriques. Une méthode a été développée au niveau du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par De Larrard. Elle est basée sur le modèle d'empilement compressible, appelé également modèle de suspension solide. Le principe de la méthode consiste à optimiser la compacité (ou porosité) d'un empilement de grains de différentes dimensions.

Ce modèle est délivré à partir des travaux de Mooney (1950) sur la viscosité des suspensions concentrées des particules solides.

Le modèle d'empilement compressible permet d'optimiser les différentes proportions de mélange (granulats, matériaux cimentaires). Il permet aussi de tenir compte, non seulement des dimensions des grains, mais également de la forme, de l'angularité et de la texture de la surface qui peuvent influencer considérablement la compacité du squelette granulaire (Tremblay, 1997; Pouliot, 2001). Le modèle d'empilement compressible permet de faire des calculs rapides, surtout que cette méthode est actuellement programmée. Cet avantage est très utile sur chantier pour recalculer les différentes proportions en cas de changement de matériaux (Gauthier & Marchand, 2001).

1.8 CONCLUSION

Ce chapitre présente un état de l'art sur le BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement. La synthèse bibliographique a mis en évidence que le BCR est un matériau performant, économique et durable. Pour un mélange de BCR, le compactage est l'élément clé de son comportement. De ce fait, la performance et la durabilité du BCR sont fortement liées à la qualité du compactage réalisé.

Les méthodes de formulation du béton ordinaire ne sont pas utilisées directement pour le BCR. Plusieurs méthodes ont été citées dans la littérature permettent de formuler ce type de béton. Ces méthodes sont parfois basées sur des approches expérimentales (la méthode basée sur les paramètres de Géotechnique, la méthode basée sur limites de maniabilité, la méthode du volume optimal, etc.) ou purement théoriques (modèle d'empilement compressible). Le choix entre ces méthodes dépend de la destination du projet et des moyens disponibles.

2 VALORISATION DES DECHETS DE CAOUTCHOUC DANS UNE MATRICE CIMENTAIRE

2.1 INTRODUCTION

Les déchets d'origine caoutchouteuse sont considérés comme encombrants et non respectueux de l'environnement. L'industrie automobile est une activité qui consomme un volume important de caoutchouc et par conséquent elle est la source principale des déchets de caoutchouc. Il devient donc indispensable, avec l'accroissement continu du nombre de véhicules dans le monde, de trouver des technologies innovantes pour absorber une quantité de ces déchets.

La valorisation des déchets et des sous-produits industriels d'origine caoutchouteuse dans les applications de Génie Civil a fait l'objet de nombreuses recherches dans les dernières décennies. Ces recherches s'inscrivent dans le cadre d'une politique environnementale, vu que la gestion des déchets solides est considérée comme un souci majeur pour tous les pays à cause de son effet direct sur l'environnement et la santé de l'être humain.

D'un autre côté, l'utilisation intensive des granulats minéraux dans les infrastructures de transport et de bâtiment, qui sont considérés parmi les plus grands consommateurs des granulats naturels, peut conduire à des problèmes écologiques. Il est de ce fait nécessaire de rechercher de nouvelles ressources de matériaux.

Les déchets de caoutchouc ont été utilisés avec succès dans plusieurs applications de Génie Civil; dans les bétons et mortiers sous forme de granulats, en géotechnique pour les remblais légers et également dans les mélanges d'asphaltes. Les études rapportées dans la littérature ont montré que le recyclage des caoutchoucs dans le domaine de Génie Civil, permet non seulement de réduire le coût, mais également d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton et du sol en bénéficiant de leur déformabilité, étanchéité et de leur capacité d'absorption de chocs.

Le présent chapitre présente un état de l'art sur le recyclage des déchets d'origine caoutchouteuse dans les bétons. Une synthèse bibliographique sur les principales connaissances sur l'impact du caoutchouc sur les propriétés du béton, est présentée.

2.2 LES DECHETS CAOUTCHOUTEUX

Le caoutchouc peut être produit à partir de sources naturelles, pour le caoutchouc naturel, ou artificielles, pour le caoutchouc synthétique. Le caoutchouc naturel est fabriqué par transformation du latex d'origine végétale (*Hévéa brasiliensis*), alors que, le caoutchouc synthétique est fabriqué par polymérisation. Il est largement utilisé dans l'industrie grâce à ses caractéristiques techniques telles que l'étanchéité, l'élasticité, la souplesse, l'absorption de chocs, l'isolation phonique et électrique, etc.

Les applications du caoutchouc sont très diversifiées. Il entre pratiquement dans toutes les industries, notamment dans l'industrie automobile qui est le grand consommateur du caoutchouc (pneus, joints, support, courroies, durites). Il est utilisé également en géotechnique (barrières étanches et renforcement de remblais), en hydraulique (tuyaux), en structures (appuis de ponts), etc.

Les produits fabriqués en caoutchouc sont en nette croissance grâce aux propriétés qui lui sont propres. D'après [Abraham et al. \(2011\)](#), il existe plus de 100000 articles et produits fabriqués à base de caoutchouc. Ces applications génèrent, sans doute, de grandes quantités de déchets après la durée de service.

La quantité prépondérante de déchets de caoutchouc (massique et volumique) provient des pneumatiques usagés, vu que le nombre des véhicules est en perpétuelle augmentation. Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations pour l'environnement à travers le monde. Des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés chaque année aux Etats-Unis et aux autres pays à travers le monde ([Trouzine et al., 2011](#)).

D'après [Batayneh et al. \(2008\)](#), plus de 275 millions de pneus usagés sont stockés à travers les Etats Unis. [Siddique & Naik \(2004\)](#), ont rapporté que le poids approximatif de pneus usagés généré chaque année aux Etats Unis est environ de 3,6 millions de tonnes. Selon un rapport récent de l'Agence Américaine de protection de l'environnement (U.S EPA), plus de deux milliards de pneus usagés sont stockés à travers les Etats Unis avec des difficultés d'exploitation de ces stocks à cause du coût élevé ([Abraham et al. 2011](#)).

Le [Tableau 2.1](#) regroupe la situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés. On peut remarquer que certains pays Européens et le Japon ont pu minimiser la quantité des déchets pneumatiques placée dans les décharges par d'autres modes de traitement.

[Tableau 2.1](#). Situation des déchets de caoutchouc dans les pays développés ([Abraham et al., 2011](#))

Type de traitement	USA (%)	U.K (%)	Allemagne (%)	France (%)	Italie (%)	Belgique (%)	Pays-Bas (%)	Japon (%)	Suède (%)
Décharge	58	23	9	45	40	10	-	12	5
Retraitement	19	31	18	20	22	20	60	24	12
Energie	11	27	45	15	23	30	28	39	64
Export	5	3	16	4	2	25	-	6	7
Recyclage	7	16	12	16	12	15	12	19	12

La composition moyenne d'un pneu de véhicule léger en Europe, d'après l'association européenne de recyclage, est présentée dans le [Tableau 2.2](#). Les pneus usagés peuvent être classés en deux catégories ([Faten, 2010](#)) ;

- les pneus usagés réutilisables ; après une certaine durée de service, l'état de solidité des pneus est contrôlé par des experts, s'ils sont encore solides, les pneus peuvent être vendus au marché d'occasion. Les pneus usagés peuvent faire l'objet de rechapage d'une bande de roulement, ce qui permet d'offrir au pneu un nouveau cycle de service.
- les pneus usagés non réutilisables ; ces sont des pneus impropres à la procédure de rechapage. Ils peuvent être valorisés soit énergétiquement, par granulation ou simplement placés dans les décharges. Mais la dernière solution peut poser un sérieux problème environnemental.

Un déchet est défini dans la réglementation Algérienne, selon la loi 01-19 du 12 Décembre 2001, comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'élimination.

Tableau 2.2. Composition moyenne d'un pneu de véhicule léger en Europe d'après (Ademe, 2012)

Matériau/ élément	Pourcentage massique (%)
caoutchouc	48
Noir de carbon	22
Acier	15
Textile	5
Oxyde de zinc	1
Soufre	1
Additifs	8

Dans le même décret, on retrouve dans l'article 5, que les déchets peuvent être classifiés comme suit : (i) déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux, (ii) déchets ménagers et assimilés, (iii) déchets inertes. Dans le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, le caoutchouc et les pneus sont considérés comme des déchets spéciaux.

Depuis 2004, selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur, chaque année l'Algérie importe en moyenne 50000 tonnes de pneumatiques en caoutchouc. 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 46000 tonnes de pneus usagés, chaque année (Trouzine et al., 2011).

2.3 NECESSITE DE RECYCLAGE DES PNEUMATIQUES

Le développement de l'industrie automobile et l'utilisation croissante de la voiture comme principal moyen de transport ont généré d'énormes quantités de déchets pneumatiques. Des travaux de recherches approfondis ont été réalisés pour aboutir à la valorisation de ces déchets dans diverses applications. Comme les déchets de caoutchouc sont non dégradables dans la nature, son accumulation génère d'énormes stocks et crée de sérieux problèmes environnementaux.

Récemment, de nombreux pays ont interdit la mise en décharge des pneus usagés et donc le recyclage de ce matériau dans les cycles de fabrication d'autres produits présente une grande importance. L'utilisation des déchets de caoutchouc dans la production du béton est une voie prometteuse et peut fournir plusieurs options de gestion (de Brito & Saikia, 2013).

Garrick (2005), a rapporté que l'emplacement des pneumatiques usagés entiers dans les décharges nous oblige à rechercher de nouveaux espaces pour palier à son nombre croissant. C'est parce que les pneumatiques sont des produits volumineux (75% de l'espace occupé par un pneu entier représente des vides). En revanche, le processus de déchiquetage et broyage permet de réduire considérablement le volume occupé, mais augmente le coût.

La mise en décharge est de plus en plus difficile en raison de l'exploitation rapide des sites disponibles pour l'élimination des déchets. Par exemple la France, qui produit plus de 10 millions de pneus usagés par an, présente une tendance de diminution de décharges à partir du Juillet 2002, en raison d'une nouvelle loi qui interdit toute nouvelle décharge à travers le pays (Siddique & Naik, 2004).

En Europe, on peut observer une diminution spectaculaire de la mise en décharge des pneus usagés de 62% en 1994 à 4% en 2010. Alors que dans la même période, 96% des pneumatiques usagés sont réutilisés par rechapage, recyclage ou comme source d'énergie (Fig. 2.1).

Du point de vue environnemental, l'emplacement des déchets caoutchouteux dans les décharges présente un vrai risque écologique en cas d'incendie notamment à cause des fumées toxiques dégagées, d'autant plus, en présence du caoutchouc, il est très difficile d'éteindre l'incendie. Le volume des vides élevé occupé par les pneus, alimente également le feu en oxygène et rend l'opération d'extinction encore plus difficile. Un grand feu de pneus peut durer plusieurs semaines, et même des mois, parfois avec un effet dramatique sur l'environnement. En 1983, un incendie de 7 millions de pneus en Virginie (Etats-Unis) a brûlé pendant près de neuf mois, ce qui a conduit à la pollution des sources d'eau situées à proximité (Garrick, 2005; Oikonomou & Mavridou, 2009).

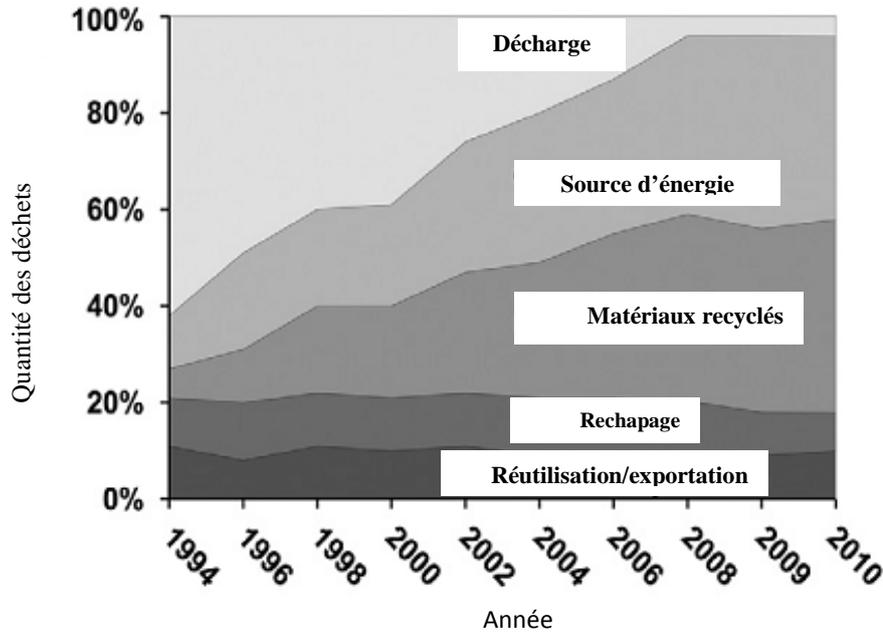


Fig. 2.1 Modes de traitement des déchets pneumatiques en Europe (Sienkiewicz et al., 2012).

Les déchets pneumatiques sont non seulement encombrants, polluants et non biodégradables, leur accumulation dans les centres d'enfouissement technique peut créer un milieu favorable à la reproduction des moustiques, vermines et rats, en raison de la forme et de l'imperméabilité des pneus, ils peuvent contenir de l'eau pendant de longues durées (Naik & Singh, 1991; Garrick, 2005; Siddique & Naik, 2004).

Les différents ingrédients tels que les stabilisants, les agents ignifugeants, les colorants, les plastifiants, sont mélangés au caoutchouc pendant le processus de fabrication. Après élimination des pneumatiques par leur mise en décharge, il y a une probabilité d'infiltration des différents additifs dans les sols. Ces additifs polluent l'environnement et peuvent détruire les bactéries nécessaires au sol. La mise en décharge cause ainsi un grave problème environnemental (Abraham et al., 2011).

Les déchets de caoutchouc peuvent être recyclés pour les raisons suivantes (Abraham et al., 2011);

- la récupération des déchets de caoutchouc permet de réduire le coût.
- le caoutchouc récupéré nécessite moins d'énergie dans le processus de production que le caoutchouc brut.
- il conserve les produits pétroliers (non renouvelables) entrant dans la fabrication du caoutchouc synthétique.

- les activités de recyclage créent de l'emploi.
- plusieurs produits peuvent être fabriqués à partir des déchets de caoutchouc.
- les déchets pneumatiques peuvent être une source d'énergie pour les cimenteries.

2.4 TECHNIQUES DE VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES

Les pneus retirés de la circulation en raison de leur composition et de leurs propriétés peuvent être une source de matières premières intéressantes. Le développement des méthodes de récupération ont conduit à leur transformation efficace en énergie et en matériaux utilisés pour élaborer de nouveaux produits pratiques et utiles. L'interdiction de stockage des pneus dans des décharges a stimulé les autres modes de traitement (Sienkiewicz et al., 2012).

L'élimination des pneus usagés dans les décharges devient de plus en plus inacceptable en raison de l'épuisement rapide des sites disponibles pour leur stockage. Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour le recyclage des pneus usagés : le rechapage, la transformation en granulats et la combustion.

2.4.1 Le rechapage

Cette technique permet d'étendre la durée de vie du pneu. Elle consiste à remplacer la couche de revêtement (bande de roulement) du pneu usagé réutilisable lorsqu'il a atteint sa limite d'utilisation pour le remettre de nouveau en service. Après une phase de triage, seulement les pneus avec carcasses non endommagées peuvent être rechapés. Ceux-ci subissent un traitement de raclage et brossage avant l'emplacement d'une nouvelle bande de roulement (Fig. 2.2). Cette technique produit elle-même des déchets sous forme de poudrette de caoutchouc.

Le rechapage des pneus peut être réalisé à chaud ou à froid. Dans le procédé à froid, la carcasse convenablement préparée est revêtue d'une couche d'un mélange de caoutchouc, agissant en tant que liant, et une bande de roulement initialement vulcanisée. Le tout est pressé sur la carcasse utilisant des enveloppes spéciales en caoutchouc puis vulcanisé dans un autoclave à environ 100° C pour 4-5 heures.



Fig. 2.2. Pose d'une bande de roulement sur un pneu usagé.
Source : <http://www.sustainablecitiesnet.com/tag/waste/page/2/>

Dans le procédé à haute température, le mélange de caoutchouc frais avec le volume nécessaire est placé sur la carcasse, puis l'ensemble est vulcanisé dans des moules produisant le motif de bande de roulement. Le processus se déroule à une température de 150-180°C. Le rechapage est économiquement très rentable: il ne nécessite que 30% de l'énergie et 25% des matières premières pour produire de nouveaux pneus. (Sienkiewicz et al., 2012)

2.4.2 Le broyage

Cette technique consiste à déchiqueter le pneu en particules de diverses tailles et formes. Aujourd'hui, il est normal de déchiqueter les pneus en grains de haute qualité de caoutchouc recyclé, après avoir séparé les fils métalliques et les textiles, qui peuvent être valorisés de leur côté. L'extraction de l'acier est obtenue par des aimants et les fibres de tissu par des aspirateurs industriels. Avec le développement des broyeurs de caoutchouc, il est possible de produire actuellement des particules en caoutchouc issue du broyage des pneus contenant des quantités négligeables de fils métalliques, avec un taux résiduel inférieur à 0,05% (Aliapure, 2010)

Les copeaux de caoutchouc peuvent être valorisés dans diverses applications, notamment comme drain dans les décharges, comme remblai léger et également pour contrôler l'isolation thermique. Ils ont également été utilisés comme granulats dans le béton. Par ailleurs, les fils métalliques récupérés des pneumatiques ont été utilisés sous forme de fibres dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques (Flores-Medina et al., 2013),

Tableau 2.3. Classification des déchets pneumatiques en Europe, Post-Consumer tire Maerials, CEN (2004), et aux Etats Unis, ASTM (1998) (Edeskär, 2006)

prEN 14243:2004 (Europe)		ASTM D6270-98 (Etats Unis)	
Désignation	Dimension	Désignation	Dimension
poudre fine	< 500 µm	granulé	425 µm- 12mm
poudrette	< 1 mm	broyé	425 µm- 2mm
granulé	1-10 mm	copeaux	12-50 mm
copeaux	10-50 mm	déchiqueté	50- 305 mm
déchiquetât	50-300 mm	copeaux rugueux	50x50x50 < X < 762<50<100

Le **Tableau 2.3** montre des classifications de déchets pneumatiques. Elles sont basées sur les dimensions de particules obtenues après le déchiquetage. Dans une étude récente, **Flores-Medina et al. (2013)**, ont proposé une simple classification basée sur l'homogénéité du produit obtenu après déchiquetage (**Fig. 2.3**). Les particules de caoutchouc résultant de cette étape (granulats, poudrette) peuvent être exploitées sous forme de granulats dans les bétons destinés aux revêtements, de salles sportives, de jeux pour enfants ou de routes. Elles peuvent être utilisées également pour fabriquer les tapis et les semelles de chaussures, etc.

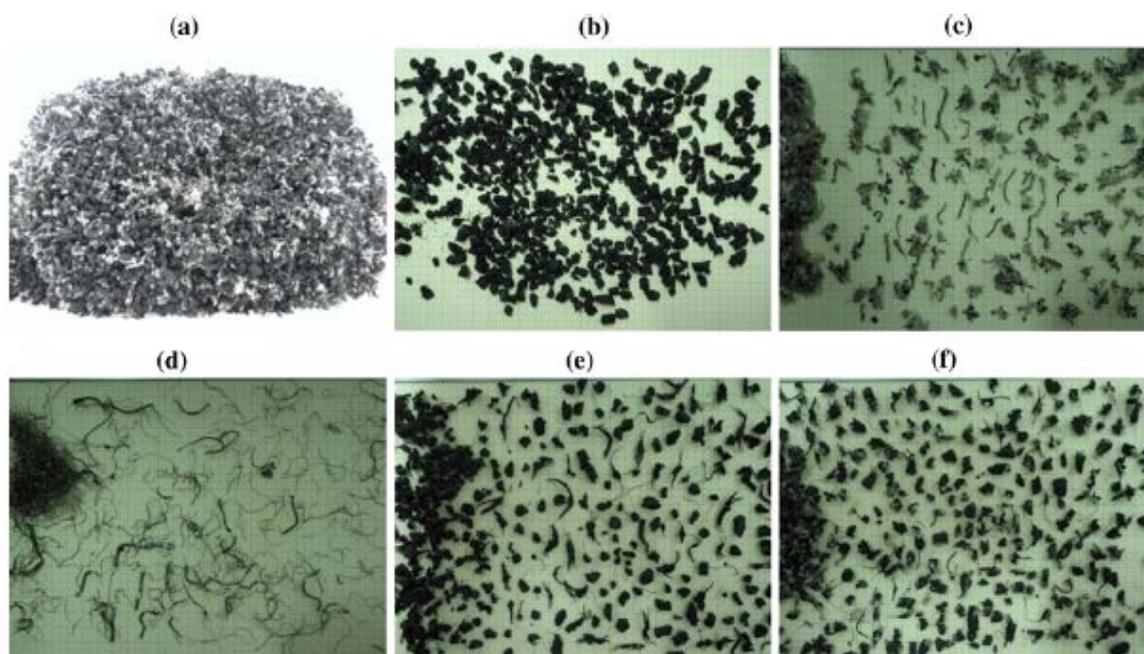


Fig. 2.3. Formes de déchets pneumatiques d'après **Flores-Medina et al. (2013)**; a) déchet de pneu à l'état brut, b) particules de caoutchouc seul, c) textile+caoutchouc+fibres d'acier d) fibres d'acier e)fibres d'acier+caoutchouc, e, f) fibres d'acier+caoutchouc.

L'opération de broyage des pneus est souvent réalisée selon l'une des méthodes suivantes (Sienkiewicz et al., 2012; Oikonomou & Mavridou, 2009; Torgal et al., 2011);

- la première méthode consiste au découpage des pneus suivant un processus mécanique répété à une température ambiante normale, jusqu'à l'obtention des dimensions souhaitées. Cette procédure permet d'obtenir des particules avec surfaces plus au moins rugueuses. La limite de taille inférieure dans cette technique est de 0,3mm. Le broyage mécanique des pneus produit des quantités considérables de chaleur, la ligne de traitement doit être donc équipée d'un dispositif de refroidissement afin d'éviter la combustion spontanée de caoutchouc broyé.
- la seconde méthode consiste au déchiquetage cryogénique, par l'utilisation de l'azote liquide, à des températures au-dessous de la température de transition vitreuse. Dans le broyage cryogénique, l'azote liquide est utilisé pour refroidir les pneus précédemment coupés jusqu'à une température inférieure à celle de la transition vitreuse. Le caoutchouc congelé à une température de -80 °C est ensuite envoyé dans des broyeurs à marteaux, qui écrasent les pneus en fractions appropriées. Ce type de broyage permet d'obtenir des particules de caoutchouc très fines (inférieures à 75µm).

La [Figure 2.4](#) montre des vues microscopiques de caoutchouc broyé suivant les deux méthodes citées précédemment. Le déchiquetage mécanique donne des particules de caoutchouc plus au moins rugueuses, tandis que le broyage cryogénique permet d'obtenir des particules plus fines sous forme de poudrette et avec des surfaces lisses. Le broyage cryogénique est plus propre que le processus mécanique, mais n'est pas économique à cause du coût élevé de l'azote liquide.

Dans les deux procédures de déchiquetage, les cordons de textiles et les fibres d'aciers sont séparés par des aspirateurs industriels et des électro-aimants, respectivement (Oikonomou & Mavridou, 2009; Sienkiewicz et al., 2012; Flores-Medina et al., 2013; Torgal et al., 2011). La [Figure 2.5](#) illustre un schéma typique des différentes étapes de granulation des pneus usagés.

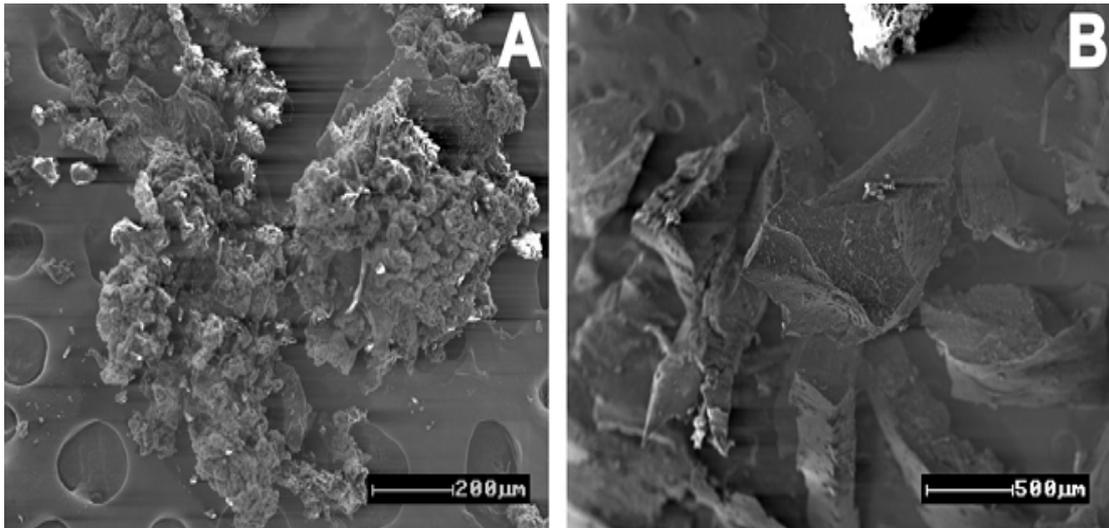


Fig. 2.4. Etat de la surface des particules de caoutchouc broyé; A) à la température ambiante, B) cryogéniquement. (Sienkiewicz et al., 2012).

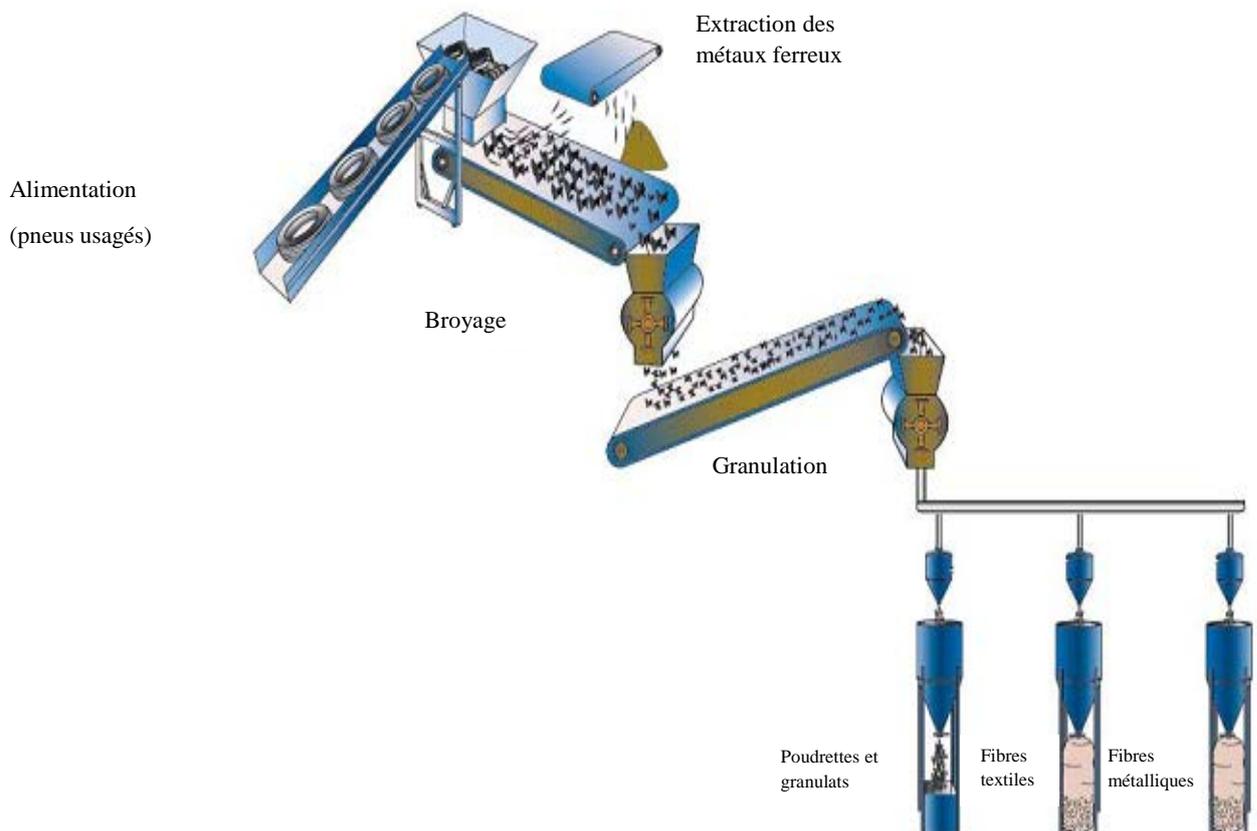


Fig. 2.5. Schéma du principe de granulation des pneus usagés (Ademe, 2012).

2.4.3 Combustible

Les pneus usagés peuvent être employés comme une source d'énergie dans les cimenteries. Un kilogramme de déchets pneumatiques peut fournir jusqu'à 32 Mj d'énergie, qui les rend compétitifs devant d'autres type de combustible, en particulier le charbon, qui a un pouvoir calorifique nettement inférieur (18,6 – 27,9 MJ/kg) (Srinivasan et al., 2007; Sienkiewicz et al., 2012).

Par ailleurs, la combustion des pneus dans les fours à ciment est respectueuse de l'environnement en raison de l'émission beaucoup plus faible, par rapport à la combustion du charbon, de poussières, de dioxyde de carbone, oxydes d'azote et les métaux lourds (à l'exception du zinc).

En dehors de l'industrie du ciment, les pneus usagés sont également utilisés en tant que combustible pour la production de vapeur, d'énergie électrique, du papier, de la chaux et de l'acier. C'est parce que la combustion du charbon avec du caoutchouc broyé améliore l'efficacité thermique des chaudières et des fours à vapeur, et les quantités de gaz d'échappement et les poussières ne dépassent pas les limites admissibles (Sienkiewicz et al., 2012).

2.5 Effet de des granulats en caoutchouc sur les propriétés de béton

2.5.1 A l'état frais

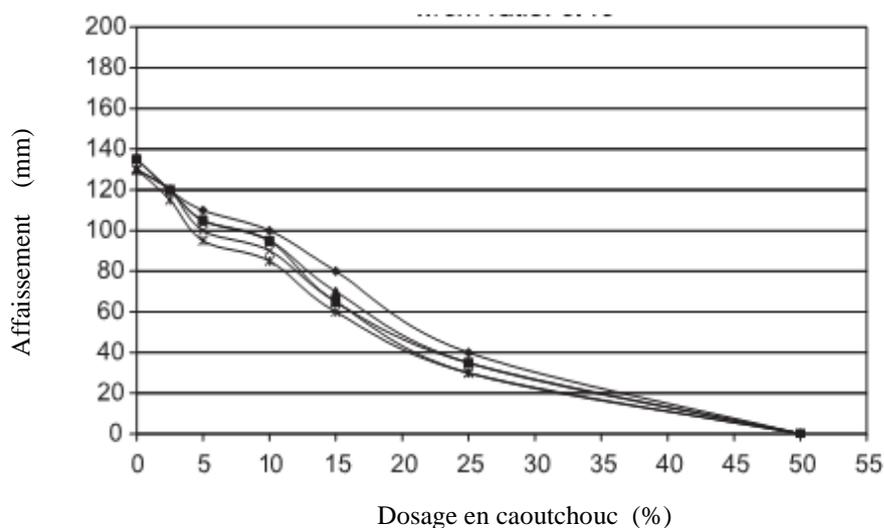
L'effet de l'ajout des particules de caoutchouc à une matrice cimentaire sur la consistance de béton, a été analysé par plusieurs chercheurs. En effet, il a été rapporté dans la littérature que la présence des granulats en caoutchouc dans une matrice cimentaire rend le béton plus léger. La réduction de la densité de béton est due à la faible densité du caoutchouc par rapport aux granulats naturels (Khatib & Bayomy, 1999; Skripkiūnas et al., 2007; Siddique & Naik, 2004).

Skripkiūnas et al. (2007), ont indiqué qu'une teneur en air occlus plus élevée est responsable de cette réduction. D'autres chercheurs (Khatib & Bayomy, 1999; Siddique & Naik, 2004; Boudaoud & Beddar, 2012) ont aboutir à la même constatation. D'après Siddique & Naik, 2004, la cause de l'augmentation de l'air occlus est due à la nature des particules de caoutchouc et de leur tendance à emprisonner de l'air dans leurs surfaces

rugueuses. En effet, la quantité de l'air occlus est proportionnelle au pourcentage de caoutchouc dans le mélange, ce qui contribue à la diminution de la densité.

L'ouvrabilité du béton peut être définie comme étant la facilité avec laquelle le béton est malaxé, transporté et mis en place. [Khatib & Bayomy \(1999\)](#); [Albano et al. \(2005\)](#); [Khaloo et al. \(2008\)](#), ont étudié l'ouvrabilité des bétons caoutchouteux. Les auteurs ont rapporté une tendance à la réduction de l'affaissement avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats par les particules de caoutchouc. Ils ont indiqué également que les mélanges préparés à base de particules fines de caoutchouc présentent une ouvrabilité plus grande par rapport à ceux préparés avec des particules plus grossières.

Dans le même contexte et dans le but d'examiner l'effet de la substitution partielle du volume total de granulats (de 2,5 à 50%) par le caoutchouc sur les propriétés du béton, des essais ont été menés par [Güneyisi et al. \(2004\)](#). Les résultats obtenus montrent que l'affaissement du béton est inversement proportionnel à la teneur en caoutchouc dans le mélange ([Fig. 2.6](#)). Pour un taux de remplacement de 50%, l'affaissement est presque nul. Ils ont signalé des difficultés lors du compactage des mélanges, où un effort supplémentaire via une dameuse a été employé pour assurer le compactage. Contrairement aux résultats précédents, [Boudaoud & Beddar \(2012\)](#) ont observé une légère amélioration de l'ouvrabilité du béton en présence du caoutchouc. Cela se traduit par l'augmentation de l'affaissement avec la concentration de caoutchouc ([Fig. 2.7](#)).



[Fig. 2.6](#). Variation de l'affaissement du béton en fonction de contenu en caoutchouc ([Güneyisi et al., 2004](#)).

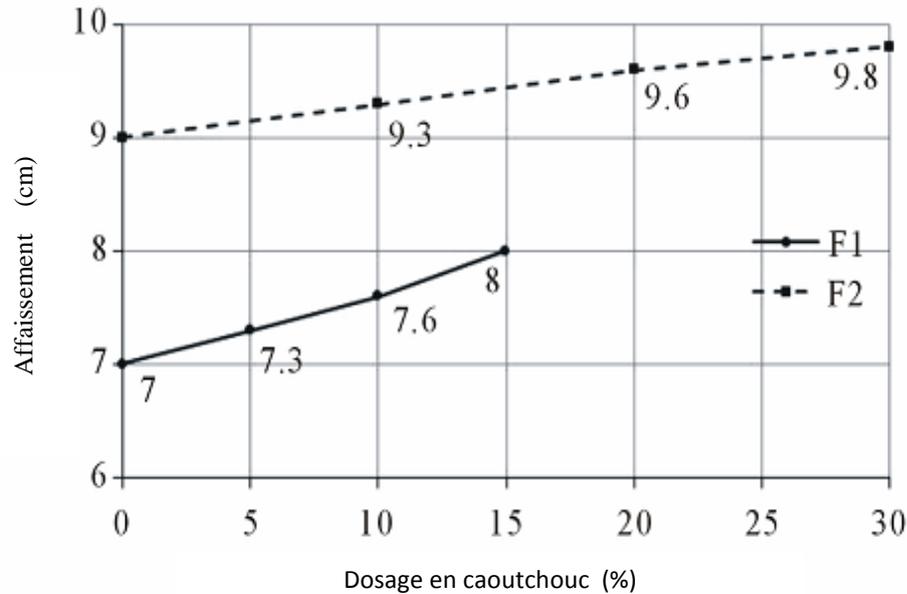


Fig. 2.7. Variation de l'affaissement du béton en fonction de la teneur en caoutchouc d'après Boudaoud & Beddar (2012)

Batayneh et al. (2008), ont obtenu que l'affaissement du béton varie de 75,33 mm, pour le mélange de référence jusqu'à 4,7 mm lorsque la totalité des granulats fins ont été substitués par les particules de caoutchouc. Malgré la réduction de l'affaissement, les auteurs ont observé, visuellement, que pendant le malaxage et la confection des éprouvettes, le béton était plus ouvrable en présence du caoutchouc. La même observation a été faite par Eldin NN & Senouci, 1994; Khaloo et al., 2008). Ils ont indiqué que la méthode classique de mesure de la consistance (essai d'affaissement), n'est pas représentative de l'état réel de l'ouvrabilité du béton avec caoutchouc.

Raghavan et al. (1988), ont étudié l'effet de l'ajout de caoutchouc aux éprouvettes de mortiers. Ils ont adopté l'essai Vébé pour mesurer la consistance des mélanges. Leurs résultats montrent que les mélanges contenant des copeaux de caoutchouc ont une maniabilité comparable ou supérieure à celle obtenue avec le mélange sans caoutchouc. Jingfu et al. (2008), ont incorporé du caoutchouc à un mélange de BCR par remplacement partiel des granulats fins (Fig. 2.8), ils ont indiqué que la présence du caoutchouc influence un peu le temps de compactage. Une tendance à la diminution de l'ouvrabilité est signalée par ces auteurs.

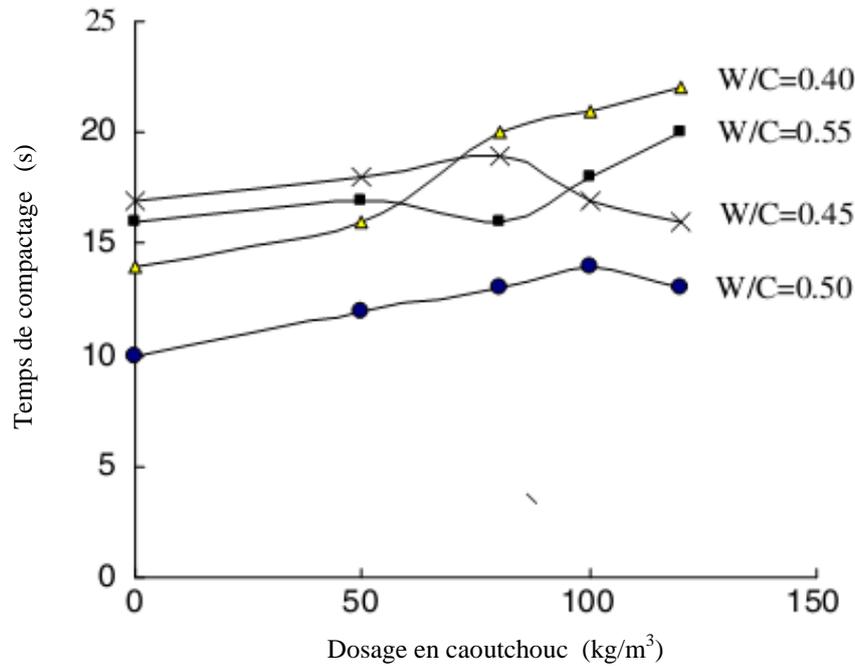


Fig. 2.8. Variation de la maniabilité du béton en fonction de la teneur en caoutchouc d'après Jingfu et al.(2008)

Toutefois, vu la variabilité des résultats rapportés dans la littérature, qui apparaissent parfois contradictoires. Il semble que l'ouvrabilité du béton en présence du caoutchouc dépend de la forme et de l'origine des particules de caoutchouc utilisées, d'une part, et de la procédure expérimentale suivie pour évaluer cette propriété, d'autre part.

2.5.2 A l'état durci

La résistance à la compression est une caractéristique fondamentale dans le processus de caractérisation des matériaux à bases cimentaires. Les résultats de plusieurs recherches indiquent que la résistance en compression du béton est influencée par la taille et le taux de substitution des particules de caoutchouc.

Eldin NN & Senouci (1994), ont indiqué que le béton préparé à base de granulats de caoutchouc présente une résistance plus faible que le béton conventionnel. Ils ont observé une chute de résistance de l'ordre de 85% lorsque la totalité des granulats grossiers ont été remplacés par le caoutchouc et 65% lorsque le sable est remplacé par le caoutchouc.

Tableau 2.4. Chutes de résistance en compression obtenues par Topçu (1995).

Caoutchouc	Sur cylindre (%)			Sur cube (%)	
	7 jours	28jours	6 mois	28 jours	6 mois
Fin	40	37	78	56	71
grossier	59	57	77	81	75

Topçu (1995), de son côté, a examiné le comportement d'un béton avec caoutchouc. Il a étudié l'effet de la taille et le taux de remplacement. Il a utilisé le caoutchouc sous deux formes, poudrette (0/1mm) et particules (1/4 mm). Les chutes maximales de résistance en compression obtenues par Topçu (1995), correspondant à un taux de remplacement de 45%, sont présentées dans le Tableau 2.4. Les résultats montrent que les mélanges contenant la poudrette fine sont moins sensibles par rapport à ceux préparés à base des particules plus grossières.

L'effet de la taille des particules de caoutchouc sur la résistance à la compression a été étudié par de nombreux chercheurs. Le Tableau 2.5 présente quelques résultats rassemblés par de Brito & Saikia (2013). Ils ont comparé les dimensions des particules de caoutchouc, le type de substitution et le type de béton. Les résultats rapportés indiquent que la résistance d'un béton à base des déchets caoutchouteux est sensiblement affectée par les dimensions des particules de caoutchouc.

La résistance à la compression développée en présence des particules grossières de caoutchouc est généralement plus faible que celle pour un béton avec des particules plus fines (Khatib & Bayomy, 1999; Topçu, 1995). D'autres chercheurs (Ali et al., 2000; Fattuhi & Clark, 1996; Emiroglu et al., 2007), ont trouvé l'inverse. Topçu (1995), a indiqué que la liaison de l'interface entre le caoutchouc et la pâte de ciment est plus faible avec les particules grossières.

Tableau 2.5. Résistance à la compression des bétons à base de granulats en caoutchouc de Brito & Saikia (2013)

Référence	Taille de particule/type de remplacement	Type de béton	Taux de remplacement (%)	Résistance à la compression (MPa)
Ailello et Leuzzi (2010)	12,5- 20mm/volume	Normal	0	45,8
			25	23,9
			50	20,87
			75	17,42
	10-12,5mm/volume	Normal	0	27,11
			15	23,97
			30	20,41
			50	19,45
			75	17,06
Bignossi et Sandrolini (2006)	Sand/Volume	SCC	0	33,0
			22,2	24,7
			33,3	20,2
Emiroglu et al. (2007)	0-4mm/volume	Normal	0	45,69
			5	41,71
			10	33,69
			15	24,75
			20	22,14
	4-8 mm/volume	Normal	0	45,69
			5	42,49
			10	37,3
			15	26,96
			20	23,91
Futtuhi et Clark (1996)	Caoutchouc de mauvaise qualité/masse	normal	0	37,45
			~9,9	12,66
	Particules de caoutchouc			~11,2

D'après [Ganjian et al. \(2009\)](#), la chute résistance est due aux facteurs suivants :

- réduction de la quantité de matières solides supportant la charge.
- la souplesse et l'état de surface des particules de caoutchouc réduit l'adhérence entre les frontières de caoutchouc et la pâte de ciment.
- la non uniformité de distribution des particules de caoutchouc dans le béton, conduit à la rupture dans les zones de concentration de caoutchouc.

[Khatib & Bayomy \(1999\)](#), ont proposé des fonctions mathématiques, pour estimer le facteur de réduction de la résistance (FRR) des mélanges de béton ordinaire à base de granulats de caoutchouc. Ils ont proposé plusieurs formalismes en fonction du type de résistance recherchée (compression, traction et flexion), l'âge du béton et également la taille des granulats (fins ou grossiers).

L'équation proposée par les auteurs est la suivante ;

$$FRR = a + b(1 - R)^m ; \quad \text{avec } a + b = 1$$

Où :

FRR : facteur de réduction de résistance.

R : teneur en caoutchouc, taux de substitution volumique

A, b, m : paramètres (paramètre désigne de degré de courbure).

Tableau 2.6. Modèles de prévision de la résistance ([Khatib & Bayomy, 1999](#)).

Temps	Modèle pour la compression	Modèle pour la traction	Modèle pour la flexion
	Granulats fins de caoutchouc (poudrette)		
7j	$FRR = 0,18 + 0,82(1 - R)^6$	-	$FRR = 0,3 + 0,7(1 - R)^{10}$
28j	$FRR = 0,1 + 0,9(1 - R)^7$	-	$FRR = 0,1 + 0,9(1 - R)^{17}$
Granulats grossiers de caoutchouc			
7j	$FRR = 0,18 + 0,82(1 - R)^4$	$FRR = 0,3 + 0,7(1 - R)^4$	-
28j	$FRR = 0,1 + 0,9(1 - R)^3$	$FRR = 0,1 + 0,9(1 - R)^2$	-

Des études ont indiqué que les particules de caoutchouc qui présentent des surfaces rugueuses adhèrent mieux avec la matrice cimentaire et peut par conséquent développer une résistance plus grande (Segre & Joekes, 2000; Siddique & Naik, 2004). Dans les bétons conventionnels l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment est excellente. Par contre en présence de particules de caoutchouc, l'adhérence est plus faible (Segre & Joekes 2000; Oikonomou & Mavridou 2009).

Segre & Joekes (2000) ont indiqué dans leur étude, que la baisse des propriétés mécaniques des bétons avec caoutchouc est due à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. Ils ont suivi l'état de la surface d'interface entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB). Segre & Joekes (2000) ont comparé des mélanges contenant le caoutchouc à l'état naturel (10% de remplacement partiel du granulat), avec ceux contenant le même pourcentage de caoutchouc traité avec une solution de NaOH (Fig. 2.9). Les microscopies obtenues par les auteurs montrent que l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment est meilleure dans le cas du caoutchouc traité.

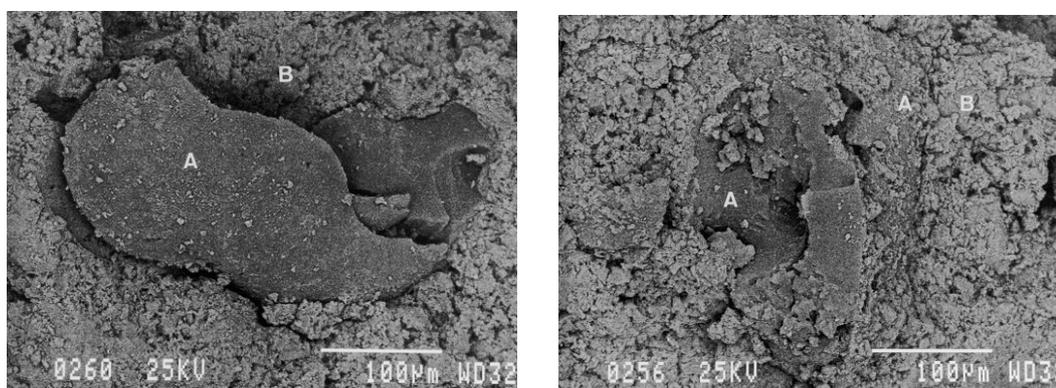


Fig. 2.9. Surface de fracture de l'éprouvette ; dans le cas du caoutchouc à l'état brut (gauche), et dans le cas du traitement du caoutchouc dans la solution de NaOH (droite), d'après Segre & Joekes (2000).

khaloo et al. (2008) ont analysé le comportement à la rupture du béton contenant le caoutchouc par le suivi de l'aspect visuel et dimensionnel des éprouvettes à la rupture (Fig. 2.10). Ils ont rapporté que l'emploi des granulats en caoutchouc dans le mélange influe sur le type de rupture de l'éprouvette. D'après les auteurs, la présence du caoutchouc augmente l'indice de l'endurance tant que le taux d'incorporation est inférieur à 25%. Au-delà de ce seuil, le caoutchouc a un effet négatif sur l'endurance.



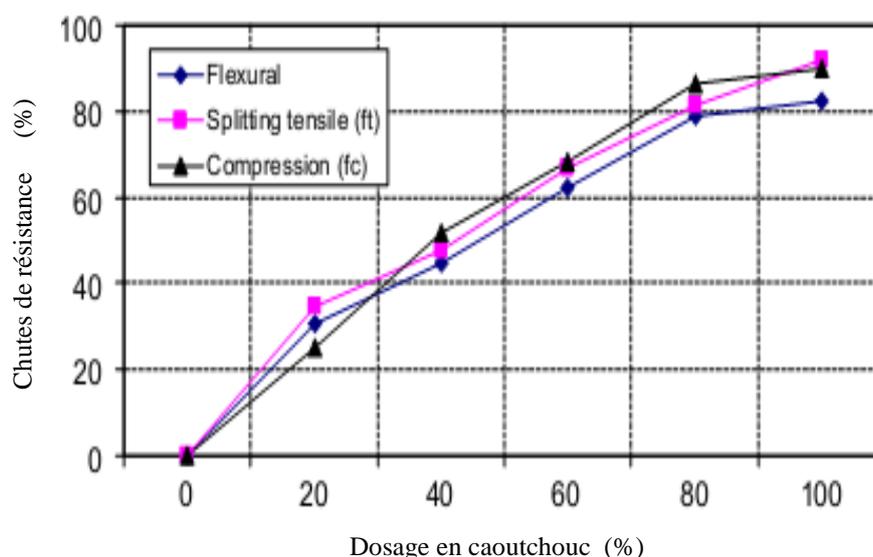
Fig. 2.10. Types de rupture (Khaloo et al., 2008)

Le temps de rupture, défini comme la durée de détérioration du béton, pour un béton ordinaire est brutal et explosif. En revanche, il évolue progressivement en présence du caoutchouc puisque les déformations à la rupture augmentent graduellement. Les granulats en caoutchouc permettent du béton de supporter des charges additionnelles au-delà de la charge maximale, appelée également charge de rupture (Raghavan et al., 1988; Khaloo et al., 2008).

L'application continue de la charge de compression génère plusieurs fissures ainsi que l'élargissement de celles existantes. Au cours de ce processus, l'échantillon est capable d'absorber une importante énergie plastique et supporter de grandes déformations sans désintégration totale. Ce processus se poursuivra jusqu'à ce que les contraintes rompent la liaison entre la pâte de ciment et les granulats en caoutchouc. (Nehdi & Khan, 2001).

Comme pour la résistance à la compression, l'ajout de granulats de caoutchouc au béton réduit également la résistance à la traction par fendage et à la flexion. [Oikonomou & Mavidou \(2009\)](#), ont signalé que la résistance à la traction par fendage et à la flexion sont moins sensibles au caoutchouc que la résistance à la compression. Des auteurs ([Batayneh et al., 2008](#)), ont constaté que les taux de réduction des différentes résistances sont très proches ([Fig. 2.11](#)).

Le développement de microfissures en raison de la faible liaison entre les granulats en caoutchouc et la pâte de ciment ainsi que d'une ségrégation de surface entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment sous l'effet des contraintes appliquées, sont les principales causes de réduction de la résistance à la traction du béton avec caoutchouc ([Ganjian et al., 2009](#)).



[Fig. 2.11](#). Taux de réduction des résistances ([Batayneh et al., 2008](#))

2.6 Conclusion

La gestion des déchets caoutchouteux constitue une préoccupation majeure pour tous les pays à cause de son effet direct sur l'environnement. L'utilisation du caoutchouc dans les domaines de bâtiments et de travaux publics comme un matériau de construction présente des avantages majeurs sur les plans économique et environnemental.

Dans ce chapitre nous avons fait une synthèse bibliographique sur les principales connaissances actuelles sur l'influence du caoutchouc sur les propriétés des matériaux à bases cimentaires, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

La faisabilité de l'utilisation du caoutchouc dans les matériaux à bases cimentaires sous forme de granulats était l'objet de nombreuses recherches de littérature. La majorité de ces études ont été réalisées sur des bétons ordinaires et les résultats obtenus n'ont pas été projetés sur les mélanges de BCR. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui consiste à analyser les potentialités d'utiliser les déchets caoutchouteux sous forme de granulats dans un BCR destiné aux applications routières.

Les études rapportées dans la littérature montrent que l'incorporation du caoutchouc dans une matrice cimentaire affecte négativement les propriétés mécaniques suite à une mauvaise adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment. D'un autre côté, ces travaux ont indiqué que la présence du caoutchouc améliore d'autres propriétés techniques souhaitées comme la ductilité et la résistance au développement des fissures.

3 IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET FORMULATION

3.1 INTRODUCTION

Plusieurs recherches expérimentales ont été menées à travers le monde sur la possibilité de valorisation des déchets d'origine caoutchouteuse dans les mélanges à base cimentaire. La majorité de ces travaux ont été effectués sur des bétons ordinaires.

L'objectif principal de la démarche expérimentale de ce travail de thèse est d'analyser la faisabilité d'utiliser ce genre de déchets sous forme de granulats dans un BCR destiné au corps routier. Les particules de caoutchouc ont ajoutées par substitution partielle du volume total de gravier. Avant de mener les essais de caractérisation des mélanges de BCR en présence et en l'absence des particules en caoutchouc. Nous avons procédé à la réalisation d'essais d'identification des matériaux utilisés. Ensuite, nous avons déterminé la formulation du BCR suivant la méthode qui basée sur les paramètres de Géotechnique.

Le présent chapitre présente dans sa première partie, les résultats d'identification des matériaux utilisés pour la préparation des différents mélanges. La méthodologie suivie pour déterminer les différentes composantes des mélanges fait l'objet de la deuxième partie.

En fin, les techniques expérimentales suivies pour le malaxage et la fabrication des éprouvettes de BCR sont également présentées et discutées.

3.2 IDENTIFICATION DES CONSTITUANTS

3.2.1 Granulats naturels

Deux types de sables ont été utilisés dans cette étude, dunaire et concassé. Le sable dunaire provient de la région de Boussaâda. Il est largement utilisé dans les hauts plateaux et au Sud de l'Algérie dans le domaine du bâtiment. La composition chimique de ce sable montre qu'il est composé principalement de silice ([Tableau 3.1](#)). Le sable concassé provient de la carrière d'EL-EUCH (wilaya de Bordj Bou Arréridj). Les distributions

granulométrique des sables sont montrées à la [Figure 3.1](#), tandis que, leurs caractéristiques granulométriques sont présentées dans le [Tableau 3.2](#). Les caractéristiques physiques des sables sont groupées dans le [Tableau 3.3](#). D'après les essais de caractérisation, le sable de Boussaâda est un sable moyen, propre, et de haute teneur en silice. Suivant la classification du Laboratoire des Ponts et Chaussées (LPC), il est considéré comme un sable propre mal gradué.

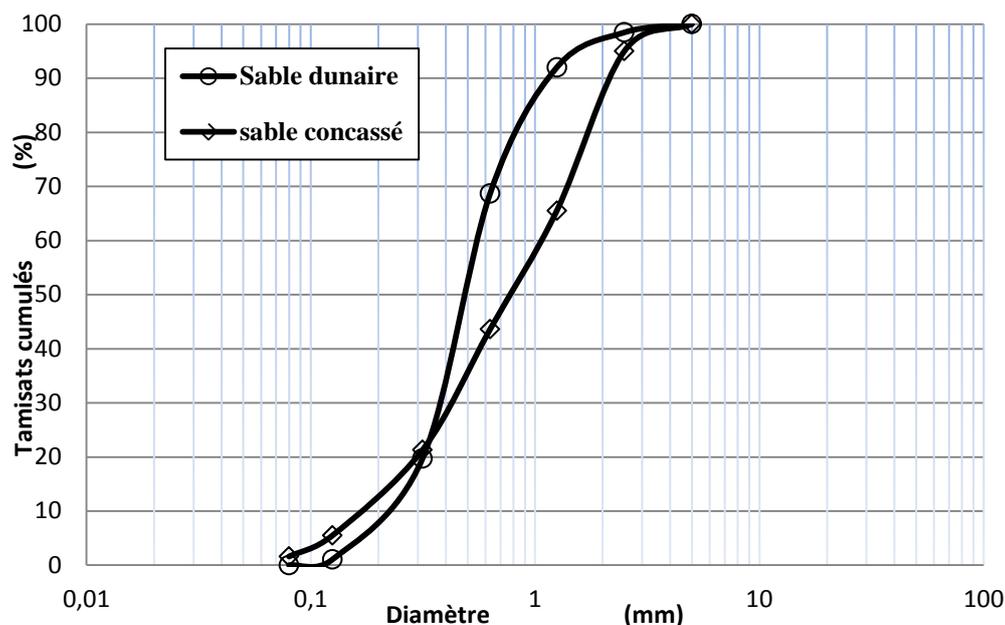


Fig .3. 1. Courbe granulométrique du sable utilisé.

Tableau 3.1. Compositions chimiques des granulats.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P.A.F
Sable de Boussaâda	90,46	1,38	1,92	1,63	0,39	0,2	2,56
Gravier	0,72	0,46	1,04	53,76	1,81	0,04	42,1

Tableau 3.2. Caractéristiques granulométriques des sables.

Désignation	Diamètre correspond à 10% de tamisâts (mm)	Diamètre correspond à 30% de tamisâts (mm)	Diamètre correspond à 60% de tamisâts (mm)	Coefficient d'uniformité	Coefficient de courbure
Symbole	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	Cu	Cc
Dunaire	0,225	0,38	0,55	2,44	1,17
concassé	0,18	0,42	1,1	6,11	0,89

Tableau 3.3. Caractéristiques physiques du sable dunaire

Propriétés	Symbole	Plage de variation	Moyenne
Masse volumique apparente	ρ [g/cm ³]	1,32-1,63	1,45
Masse volumique absolue	ρ_{abs} [g/cm ³]	2,63-2,65	2,64
Equivalent de sable	E.S [%]	79,8-83,35	82,4
Absorption d'eau	A %	1,81	-
Module de finesse	M _f	2,2	-
compacité	C (%)	62	-

Tableau 3.4. Caractéristiques physiques du sable concassé

Propriétés	Symbole	Plage de variation	Moyenne
Masse volumique apparente	ρ [g/cm ³]	1,45-1,7	1,62
Masse volumique absolue	ρ_{abs} [g/cm ³]	2,52-2,54	2,53
Equivalent de sable	E.S [%]	79,1-82	80,5
Absorption d'eau	A %	1,77	-
Module de finesse	M _f	3,29	-
compacité	C (%)	61,39	-

Tableau 3.5. Caractéristiques physico-mécaniques du gravier.

Propriétés	Symbole	Plage de variation	Moyenne
Masse volumique apparente	ρ [g/cm ³]	2,595 - 2,622	2,6
Masse volumique absolue	ρ_{abs} [g/cm ³]	2,59-2,6	2,59
Absorption d'eau	A (%)	1,01-2,25	-
compacité	C (%)	51-52	51,5
Los Angeles	LA	20,7-21	21

Un gravier calcaire concassé provenant de la région d'EL-EUCH (wilaya de Bordj Bou Arréridj), a été utilisé. Pour tous les mélanges, trois classes de graviers 3/8, 8/15 et 15/20 ont été prises en considération. Puisqu'il s'agit d'un BCR destiné au corps routier, le diamètre maximal des gros granulats a été limité à 20 mm.

Les caractéristiques physico-mécaniques des graviers employés sont données dans le [Tableau 3.4](#). Les distributions granulométriques des trois classes granulaires sont illustrées dans la [Figure 3.2](#). La composition chimique de ce gravier est présentée dans le [Tableau 3.1](#). Le gravier utilisé présente une absorption assez faible et un coefficient de Los Angeles variant de 17 à 25 (<35), qui est acceptable.

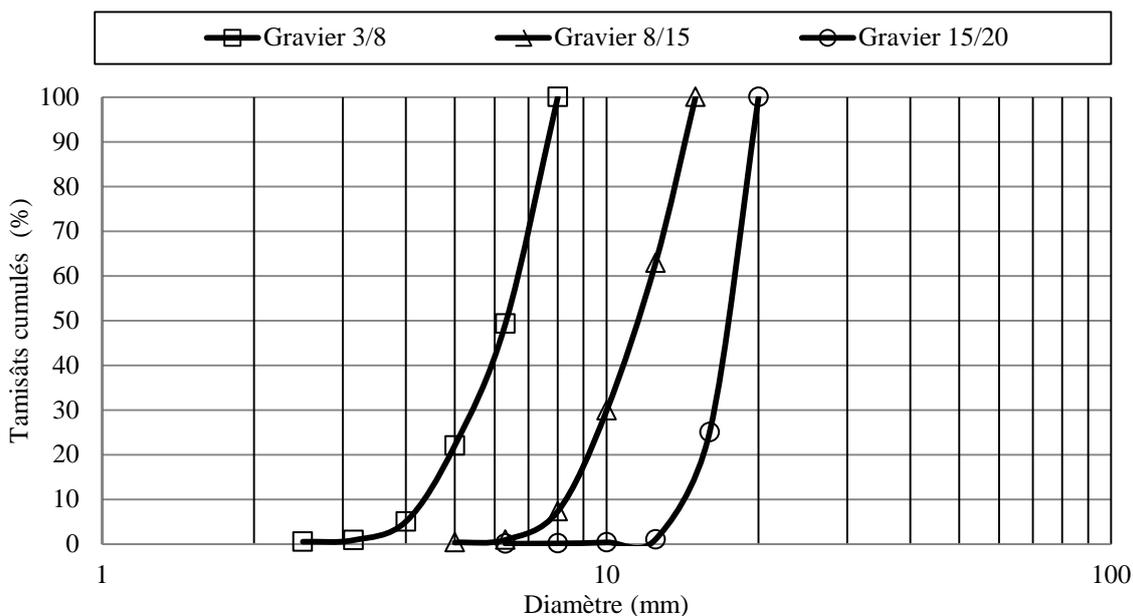


Fig .3. 2. Courbes granulométriques des graviers employés.

3.2.2 Caoutchouc

L'objet de ce travail est d'examiner les potentialités de valoriser les déchets issus du broyage des pneus usagés. Vu l'absence de stations de traitement de ce genre de déchets en Algérie, nous avons essayé de les déchieter manuellement. La photographie de la [Figure 3.3](#) présente un échantillon des particules obtenues.

La transformation manuelle de pneumatiques usagés en granulats est une opération difficile à cause de la résistance à la coupure élevée du caoutchouc et, surtout, de l'existence de fils métalliques et de fibres textiles. Par ailleurs, en pratique, cette procédure ne permet pas d'obtenir des grandes quantités de granulats en caoutchouc parce qu'elle demande énormément du temps et d'effort. De plus, le déchiètement manuel du caoutchouc génère des particules grossières avec des formes régulières.

Pour atteindre les objectifs de l'étude des granulats en caoutchouc livrés par la société SAEL (Alger) ont été utilisés. Cette société est dotée d'une unité de recyclage des déchets de caoutchouc résultants des différentes étapes de fabrication de leurs produits (les joints, les semelles de chaussures, durites, supports, etc.).

A cet effet, l'approche de valorisation des déchets pneumatiques est toujours valable pour les raisons suivantes;

- Les nouvelles technologies de broyage des pneus permettent de séparer le caoutchouc à partir des autres composantes (fils métalliques, fibres textiles), générant ainsi des particules en caoutchouc pratiquement pures (avec un taux résiduel inférieur à 0,05%).
- Les particules de caoutchouc utilisées dans le programme expérimental présentent des formes similaires à celles de granulats naturels et également comparables à celles résultant des broyeurs à pneus (Fig. 3.4).

Les particules en caoutchouc utilisées ont une densité de 1,27, un coefficient d'absorption d'eau de 0,5 et une compacité de 37 %, leur distribution granulométrique est présentée dans la Figure 3.5.



Fig. 3.3. Particules en caoutchouc coupées manuellement.



Fig .3. 4. Particules en caoutchouc utilisées dans le programme expérimental.

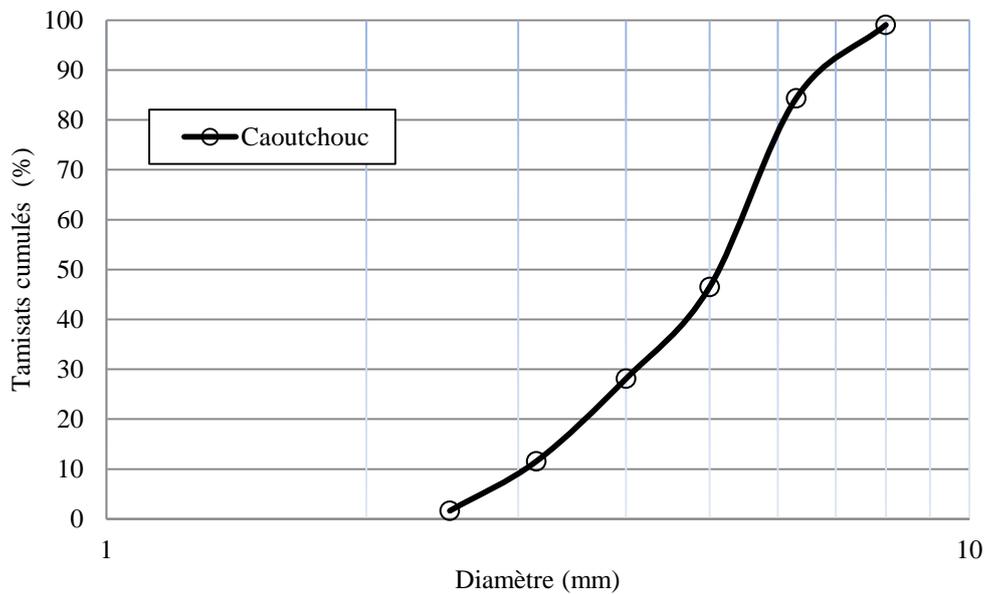


Fig .3. 5. Courbe granulométrique du caoutchouc.

3.2.3 Liant

Le type de ciment utilisé pour la préparation du BCR a un effet significatif sur la vitesse d'hydratation et le taux de développement de la résistance et, par conséquent, affecte de manière significative la résistance aux jeunes âges. Un mélange de BCR peut être confectionné par n'importe quel type de ciment. Toutefois, le choix du type de ciment dépend essentiellement des performances requises liées aux critères de résistance et de durabilité, autrement dit, il est fonction de la destination et de l'importance de projet.

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment ordinaire, de classe CPJ-CEMII/A 42.5 de densité 3,15, répondant à la norme (NA 442 :2000) et provenant de la cimenterie d'Ain El-kebira (Algérie). La composition chimique du ciment utilisé est présentée dans le [Tableau 3.5](#).

Nous avons utilisé également dans cette étude de la fumée de silice, obtenue chez la société Granitex (Oued Smar, Algérie). Cette matière a été fournie comme produit manufacturé sous le nom MEDAPLAST HP. Elle se présente sous forme de particules sphériques extrêmement fines ayant un diamètre variant de 0,1 à 2 µm. Sa composition chimique est présentée dans le [Tableau 3.5](#). Par ailleurs, au sixième chapitre une résine a été utilisée pour le collage des particules de sable sur le caoutchouc. Ce produit (MEDAPOXY-AL) est également fourni par la société Granitex sous forme de kit pré-dosé, composé de colle et de durcisseur.

[Tableau 3.6](#). composition chimique du ciment et de la fumée de silice.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
ciment	20,7	4,75	3,75	62,92	1,9	1,98	0,09
Fumée de silice	>85%	-	-	-	-	<2,5	-

3.3 FORMULATION DU BCR

La formulation du béton consiste en général à déterminer les différentes proportions qui conduisent d'une part, à un matériau aussi économique que possible et d'autre part, permettent de répondre aux exigences techniques liées aux critères de résistance, de durabilité et parfois de maniabilité.

Le BCR est caractérisé principalement par sa consistance très ferme (béton à zéro-affaissement). Il nécessite généralement une action mécanique plus importante pour assurer un bon serrage du squelette granulaire que le béton ordinaire. Suite à la spécificité du BCR, les méthodes classiques de formulation des bétons ordinaires ne sont pas utilisées directement pour le BCR.

Le succès de cette technologie, dans les domaines des routes et des barrages, pousse les chercheurs et les concepteurs à travers le monde à développer des méthodes de formulation spécifiques à ce genre de béton. La majorité de ces méthodes est basée sur des approches empiriques qui nécessitent un certain nombre de gâchées pour déterminer

la combinaison optimale permettant de satisfaire les différentes exigences techniques avec un minimum de moyens.

Il existe une différence essentielle, du point de vue composition, entre un BCR destiné au barrage et un autre destiné au corps routier. Les concepteurs de barrages utilisent une quantité plus faible de ciment contre une quantité plus grande de cendres volantes, afin de réduire la chaleur d'hydratation libérée. De plus, la grosseur maximale des granulats est limitée à 20 mm pour les routes. Puisqu'elles sont conçues pour supporter des sollicitations mécaniques plus grandes. De ce fait, il existe des méthodes de formulation qui sont plus appropriées à un BCR routier et, d'autres, à un BCR de barrage.

La méthode de formulation adoptée dans la présente étude est la méthode de Géotechnique proposée par [ACI 325](#). Cette méthode est basée sur la relation entre la densité sèche et la teneur en eau. Le choix de cette méthode est lié à la destination du béton, puisqu'elle s'adapte bien avec les mélanges du BCR destiné aux projets routiers.

La première phase dans cette méthode consiste à choisir les différentes proportions permettant de produire un squelette granulaire avec le minimum de vides et en même temps évitant la ségrégation. Pour cela, il est nécessaire que la courbe granulométrique combinée soit située entre les limites d'un fuseau granulaire. La [Figure 3.6](#) illustre la position de la courbe combinée entre les limites proposées par Piggot (1986).

La combinaison qui permet d'obtenir une courbe granulométrique combinée incluse dans le fuseau proposé par ([USACE, 2000](#)) est : 13% de gravier classe 15/20, 16% de gravier classe 8/15, 32% de gravier classe 3/8 et 39% de sable.

L'étape suivante dans la séquence de formulation consiste à déterminer la teneur en eau optimale dans le mélange. Elle est déterminée par la relation densité-teneur en eau suivant le mode opératoire de l'essai Proctor modifié, tel qu'il est décrit dans la norme [ASTM D1557](#).

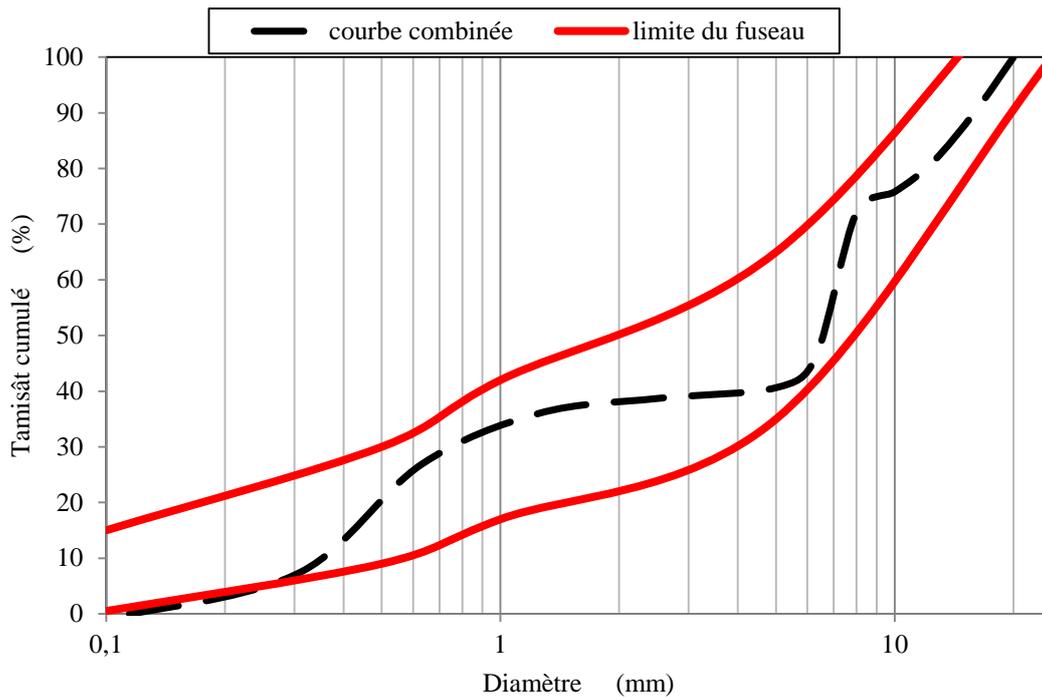


Fig. 3.6. Position de la courbe granulométrique combinée entre les limites proposées par Piggot d'après Marchand et al. (1997).

Dans cette étude, on a introduit une modification à cette méthode, en variant la procédure de production des éprouvettes. Le principe de la méthode de formulation reste toujours basé sur la relation densité-teneur en eau (courbe Proctor).

Les éprouvettes ont été préparées suivant le mode opératoire de la norme [ASTM C1176](#). Pour chacun des dosages en ciment (11-14%), la densité du BCR est mesurée à différentes teneurs en eau (3-6%), puis la courbe de variation des densités en fonction de la teneur en eau est tracée (Fig 3.7).

La densité sèche du BCR (γ_d/γ_ω) est calculée par la formule suivante ;

$$(\gamma_d/\gamma_\omega) = \frac{(\gamma_h/\gamma_\omega)}{1 + \omega}$$

avec :

(γ_h/γ_ω) : la densité humide

ω : la teneur en eau

La dernière phase consiste à choisir le pourcentage convenable en ciment sur la base des propriétés mécaniques développées. Cette étape consiste en la confection des éprouvettes de BCR correspondant aux valeurs optimales de teneurs en eau, obtenues à partir des courbes Proctor.

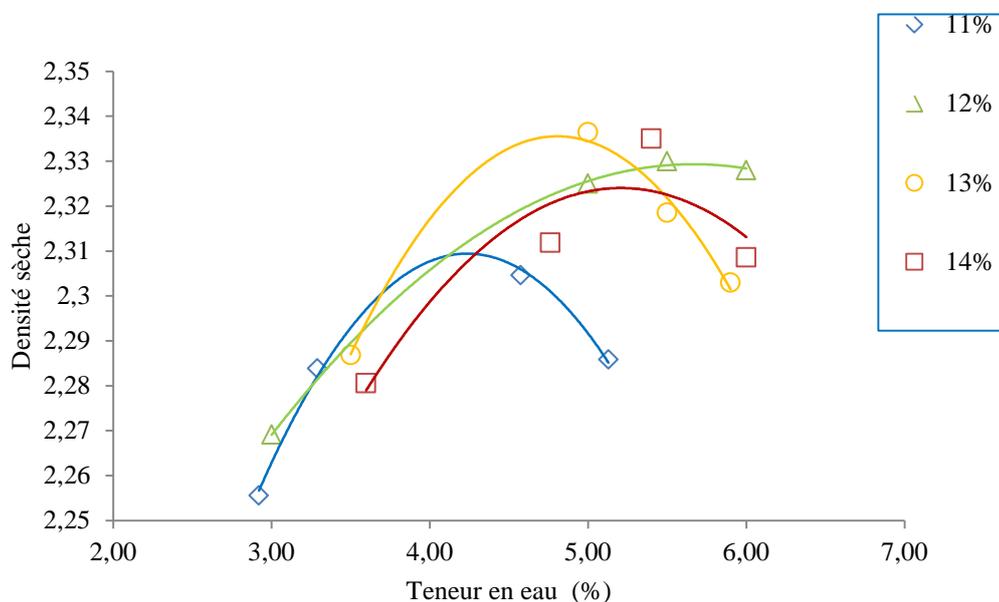


Fig. 3.7. Relation entre la densité et la teneur en eau .

En pratique, la teneur en ciment pour la préparation de BCR est une caractéristique intrinsèque du projet considéré. Elle dépend des propriétés des constituants de mélange et des différentes sollicitations qui seront supportées par la chaussée.

Gauthier & Marchand (2001) ont indiqué que le dimensionnement des routes en BCR est basé sur le principe de limitation des contraintes de traction engendrées par les charges appliquées au-dessous des limites acceptables. Selon le rapport ACI325, une résistance finale à la compression de 27 MPa est nécessaire pour une route en BCR. Cependant, cette valeur n'est qu'à titre indicatif car la détermination de l'épaisseur d'une route en BCR est basée sur les caractéristiques de chargement (intensité du trafic), les caractéristiques du sol (portance) et les propriétés mécaniques du BCR (Gauthier & Marchand, 2001). En effet, une résistance à la compression à 7 jours de 22 MPa, est retenue dans cette étude. Cette résistance est atteinte lorsqu'on utilise une teneur en ciment de 13% et une teneur en eau de 5% (Fig. 3.8).

Le Tableau 3.6 présente les différentes proportions utilisées pour le programme expérimental.

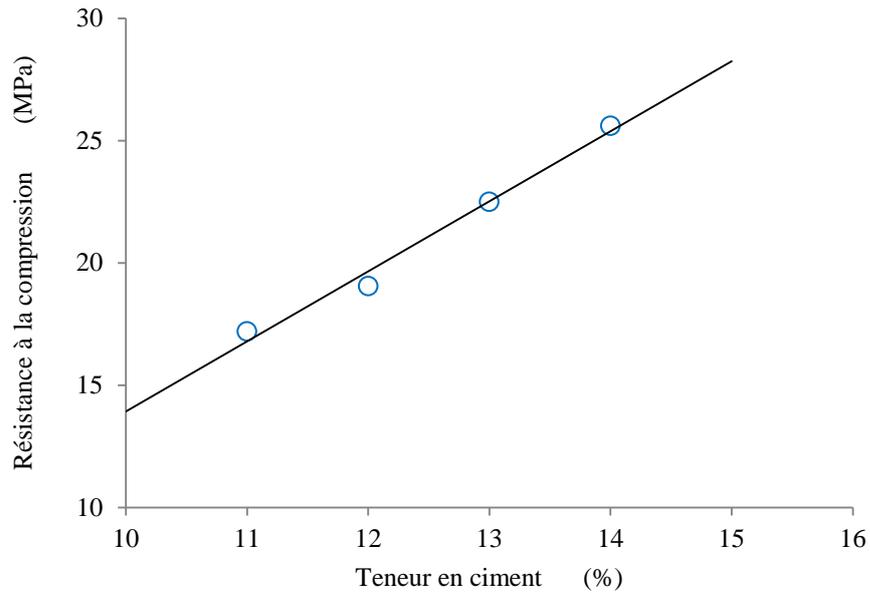


Fig. 3.8. Résistance en compression en fonction de la teneur en ciment à 7 jours d'âge.

Tableau 3.7. Les différentes proportions de mélange.

Constituant (kg/m ³)				
Ciment	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/20
295	727	596	299	241

3.4 TECHNIQUES EXPERIMENTALES

3.4.1 Malaxage

La séquence adoptée pour le malaxage du BCR est présentée au [Tableau 3.7](#). Cette procédure est basée sur le travail réalisé par ([Debieb et al. 2009](#)). Une fois le mélange malaxé, les propriétés du BCR à l'état frais sont déterminées et les éprouvettes des essais sont préparées dans les 20 minutes qui suivent leur malaxage. La photographie de la [Figure 3.9](#) illustre l'aspect du BCR après le malaxage.

Tableau 3.8. Procédure de malaxage suivie.

Temps	$t_0 - 4'$	$t_0 - 2'$	$t_0 - 1'$	$t_0 + 1'$	$t_0 + 2'$
Additions	granulats	-	ciment	eau	-
tâche	Malaxage	repos	Malaxage	Malaxage	fin

3.4.2 Compactage

Les éprouvettes ont été compactées suivant la procédure de la table vibrante/surcharge, dite simplement vibro-compactage (décrite dans la section 1.5). Le béton frais est placé dans le moule en couches successives ; pour chacune d'elles, une surcharge est directement placée pendant la vibration. La [Figure 3.10](#) illustre la table vibrante, la surcharge de compactage et le système de leur fixation.

La phase de compactage est terminée lorsqu'on observe la formation d'une couche de mortier autour de la masse de compactage. Vu la variabilité des moules employés dans cette étude, un ajustement est fait sur la surcharge appliquée pendant le compactage, en fonction des dimensions de l'éprouvette. Les moules et les conditions de cure sont présentés au début de chaque section.



[Fig. 3.9](#). Aspect du BCR après le malaxage.



Fig. 3.10. Table vibrante, surcharge de compactage et système de fixation de l'ensemble.

3.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les constituants entrant dans la composition des mélanges étudiés. Nous avons décrit ensuite les différentes étapes de formulation du BCR.

Les proportions des mélanges ont été déterminées suivant la méthode qui est basée sur les paramètres de Géotechnique. Nous avons choisi cette méthode puisqu'elle est plus appropriée aux mélanges de BCR routier. Elle est basée sur le principe de l'étude de la relation entre la densité la teneur en eau, d'une façon similaire à celle utilisée pour l'étude des propriétés de compactage des sols en laboratoire.

Enfin, nous avons présenté la procédure expérimentale suivie pour le malaxage et le compactage du BCR.

4 ETUDE DES PROPRIETES DU COMPACTAGE DE BCR

4.1 INTRODUCTION

Suite au développement de la technologie du BCR dans le domaine routier, plusieurs travaux tant sur le plan théorique qu'expérimental ont été réalisés à travers le monde. Ces recherches visent la compréhension des mécanismes fondamentaux de comportement de ce matériau. Malgré l'avantage du BCR d'être à la fois économique et performant, son utilisation est restée limitée aux pays développés, notamment au Canada et aux Etats Unis.

En plus de valoriser les déchets de caoutchouc dans le BCR, cette recherche vise surtout à vulgariser cette technique en Algérie, d'autant plus, tous les matériaux employés dans le programme expérimental sont disponibles localement.

La différence fondamentale entre le BCR et les autres types de béton réside dans le compactage, qui est considéré comme étant l'élément clé de leur comportement.

A cet effet, une attention particulière a été accordée à ce facteur. Plusieurs paramètres liés au compactage ont été examinés dans ce chapitre :

- Influence du mode de compactage utilisé (statique ou dynamique). Nous avons réalisé une étude comparative entre les différentes méthodes de compactage des mélanges de BCR.
- Influence de l'énergie de compactage sur les propriétés du BCR. La relation reliant le taux d'énergie de compactage réalisé avec le taux de résistance développée et le niveau de densification achevé, a été étudiée.
- Influence du type de sable utilisé sur la compactibilité et la résistance du BCR.

4.2 EFFET DU MODE DE COMPACTAGE

Dans le but d'étudier l'effet du type de l'effort de compactage utilisé sur les propriétés de BCR. La densité et la résistance des éprouvettes, cylindriques et prismatiques, ont été comparées en fonction de la méthode utilisée pour son compactage. Différentes procédures ont été étudiées : vibro-compactage (VC), marteau vibrant (MV) et Proctor. Il est important de rappeler que seulement les deux premières méthodes sont actuellement standardisées pour les éprouvettes cylindriques. La méthode Proctor est couramment utilisée pour la production des éprouvettes de BCR, mais elle n'est pas encore standardisée.

En plus de ces méthodes, une autre procédure a été utilisée et qui consiste à employer un effort statique. Ce dernier, a été appliqué à l'aide d'un piston hydraulique, comme il est illustré dans la photographie de la [Figure 4.1](#).

Les éprouvettes cylindriques testées sont de dimensions (160 x 320) mm, tandis que les prismes sont de dimensions (70 x 70 x 280) mm. Il est important de noter que pour la méthode du piston, des éprouvettes (100 x 200) mm ont été utilisées, en raison du dimensionnement de la presse mécanique.

Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures puis conservées dans les conditions de laboratoire (25C° et 50-60% RH), jusqu'à la date d'essai.



Fig .4.1. Compactage des éprouvettes par la presse mécanique (ou hydraulique).

La Figure 4.2 représente les densités, à l'état durci, des éprouvettes cylindriques en fonction de la méthode de compactage utilisée. Les résultats obtenus indiquent que les éprouvettes consolidées par les méthodes Proctor, de la table vibrante et du marteau vibrant présentent des densités très proches, avec des variations relatives de moins de 1%. Tandis que les densités données par la méthode du piston restent faibles par rapport aux autres méthodes, avec une variation relative avec les autres méthodes atteignant 10%.

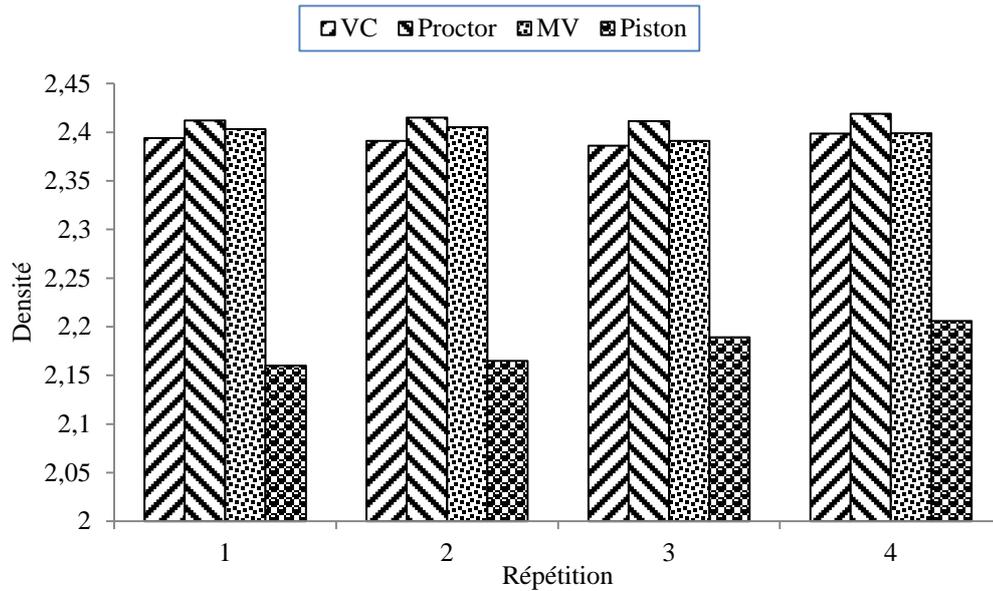


Fig. 4.2. Densités des éprouvettes cylindriques compactées par différentes méthodes.

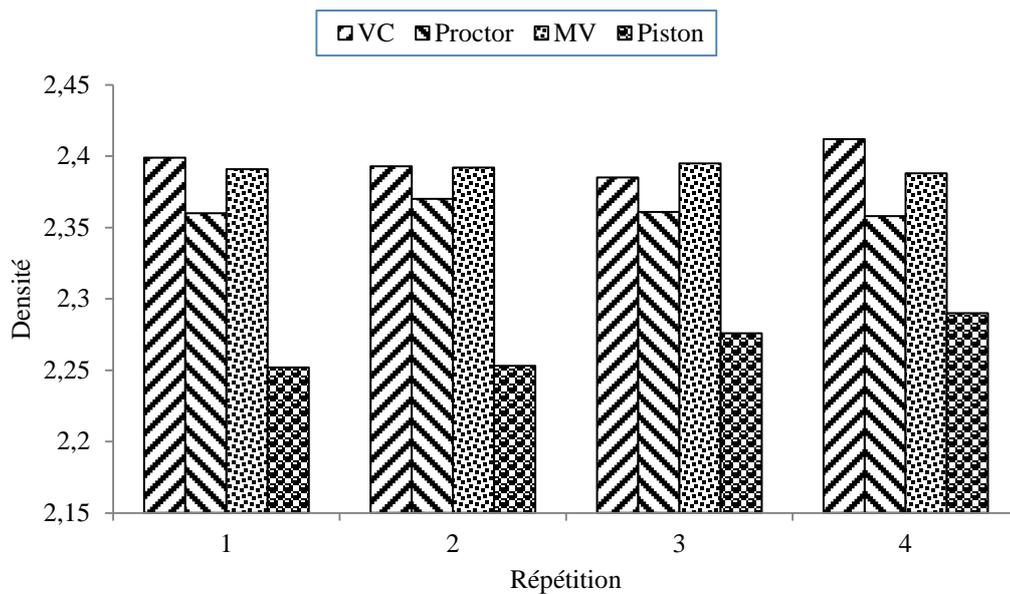


Fig. 4.3. Densités des éprouvettes prismatiques compactées par différentes méthodes.

Pour les éprouvettes prismatiques (Fig. 4.3), les résultats montrent des différences plus significatives que celles notées avec les éprouvettes cylindriques. Les meilleures densités sont celles données par la méthode de la table vibrante et du marteau vibrant avec des variations relatives entre elles inférieures à 1%. La méthode Proctor présente des densités plus faibles avec des variations relatives de l'ordre de 3%, par rapport aux méthodes dynamiques. Les éprouvettes compactées par le piston présentent toujours de faibles densités par rapport aux autres méthodes.

Afin d'obtenir une comparaison fiable, les mêmes éprouvettes ont été employées pour mesurer les résistances en compression, en traction et en flexion, à différents âges. Les variations relatives des résistances ont été déterminées par rapport à la méthode qui donne les meilleures valeurs de densité. Les résultats obtenus sont présentés dans les Figures 4.4, 4.5 et 4.6.

Les résistances développées par les éprouvettes cylindriques, en compression et en traction, avec les méthodes du vibro-compactage et du marteau vibrant sont plus grandes que celles obtenues avec la méthode Proctor, alors que cette dernière génère des valeurs de densité plus grandes. Cela, pouvait être expliqué par l'impact de la dameuse de compactage qui peut endommager les granulats grossiers. Les variations relatives entre la résistance développée avec la méthode Proctor et les autres méthodes (vibro-compactage et marteau vibrant) peut arriver jusqu'à 28%.

Cette explication est en accord avec une étude réalisée par [Casias et al. \(1988\)](#). Les auteurs ont rapporté que l'application d'un effort de compactage correspondant à l'énergie de référence de Proctor modifié peut causer des cassures au niveau de granulats. En contre part, les résultats obtenus sont en contradiction avec ceux observés par [Tayabji & Okamoto \(1987\)](#). Ils ont indiqué que la méthode de Proctor donne des résistances plus grandes que la méthode vibro-compactage.

Les éprouvettes cylindriques compactées par le piston présentent de faibles résistances aussi bien en compression qu'en traction avec des variations relatives arrivant jusqu'à 70%, par rapport à la méthode Proctor.

Pour les éprouvettes prismatiques destinées aux essais de flexion, dans la majorité des cas testés, la méthode vibro-compactage donne des résistances de traction plus grandes que la méthode du marteau vibrant, malgré que cette dernière génère des densités

plus grandes. Les deux autres méthodes, Proctor et Piston, donnent de faibles résistances avec des variations relatives entre 37 et 60% respectivement, par rapport à la méthode du marteau vibrant.

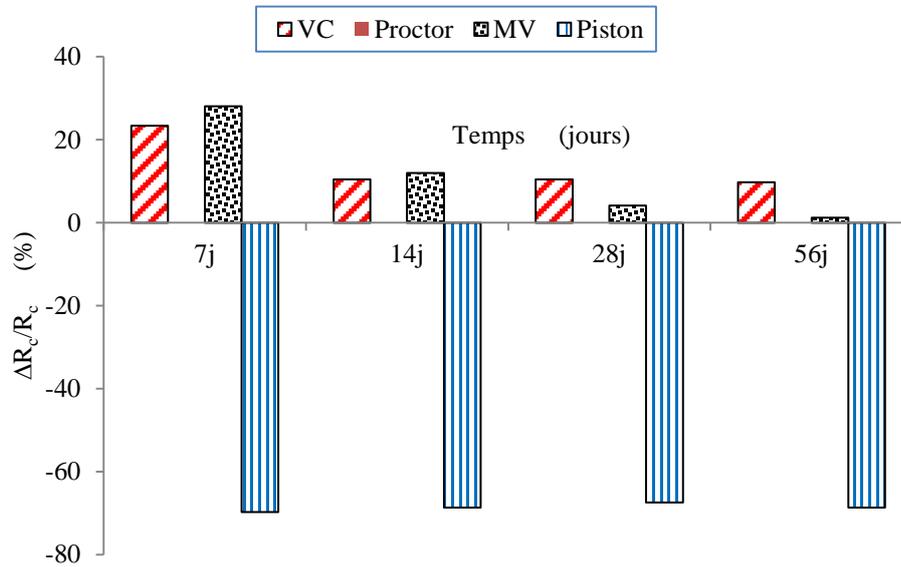


Fig. 4.4. Variations relatives de la résistance en compression.

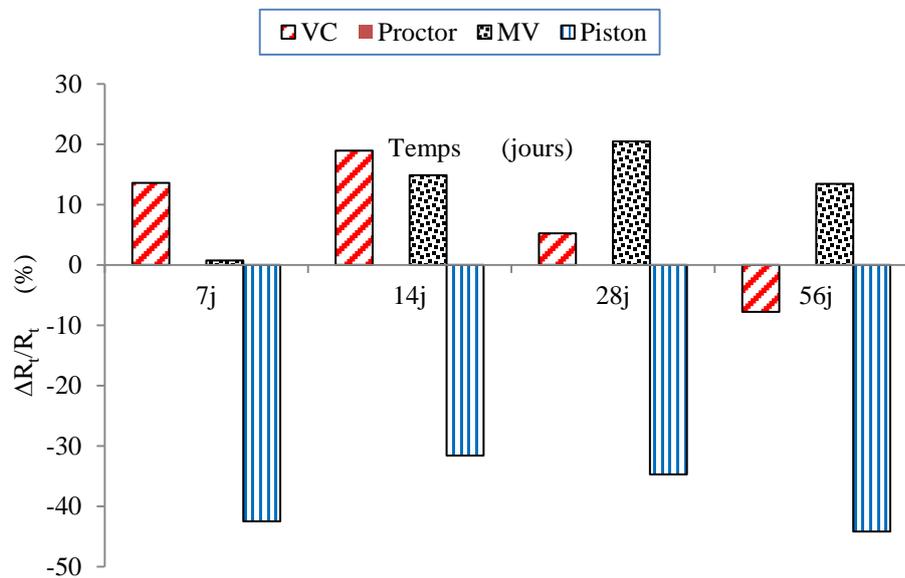


Fig. 4.5. Variations relatives de la résistance en traction par fendage.

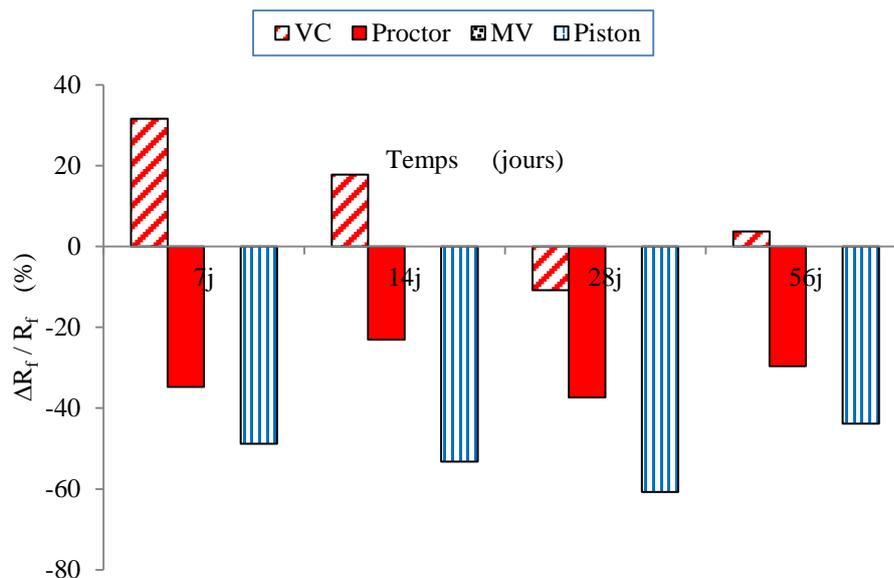


Fig. 4.6. Variations relatives de la résistance en traction par flexion.

En résumé, il est plus efficace et plus rentable de compacter les éprouvettes cylindriques avec les méthodes basées sur une action dynamique (vibro-compactage, marteau vibrant) que d'utiliser la dameuse de Proctor modifié. A échelle granulaire, l'application d'un effort de compactage associé à une action de vibration, met en mouvement les différents constituants, ce qui permet de diminuer les forces de contacts inter-granulaires et par conséquent faciliter son réarrangement. En revanche, la méthode Proctor permet d'atteindre un niveau de densification plus élevé, mais peut conduire à des cassures au niveau des granulats grossiers, ce qui affecte la résistance du BCR.

Par ailleurs, le compactage des éprouvettes prismatiques est plus difficile, ce qui explique l'absence, jusqu'à présent, d'une méthode standardisée, néanmoins, les méthodes dynamiques peuvent conduire à des résultats satisfaisants. La méthode de Proctor et du piston ne conviennent pas à ce type d'éprouvette.

4.3 EFFET DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE

Pour étudier l'impact de l'énergie de compactage sur les propriétés mécaniques développées, des éprouvettes de BCR ont été compactées sous différentes contraintes de compactage; 60%, 80%, 100% et 120%. Ces niveaux sont calculés comme pourcentages de la contrainte de compactage de référence, donnée par la norme en vigueur, pour chacune des méthodes retenues.

Cette démarche est adoptée dans le but de simuler, en laboratoire, un faible compactage appliqué sur terrain, pour les niveaux inférieurs à l'énergie de référence, et un excès de compactage appliqué, pour le niveau dépassant l'énergie de référence. Deux méthodes de compactage sont considérées pour cette démarche : Proctor et vibro-compactage.

L'énergie de compactage de référence pour la méthode Proctor modifiée est de $2700 \text{ KN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, suivant le mode opératoire de la norme ASTM D1557. Le contrôle de l'énergie de compactage est réalisé par variation du nombre de coups par couche. Pour la méthode vibro-compactage, l'énergie de référence est celle correspondant à la contrainte de référence (4,9 kPa), donnée par la norme ASTM C1176. Le contrôle de l'énergie est fait par variation de la surcharge appliquée pendant la vibration.

Pour les essais de compression et de traction par fendage, des éprouvettes cylindriques de dimensions (160 x 320) mm ont été utilisées, tandis que pour l'essai de traction par flexion, des prismes de dimensions (70 x 70 x 280) mm ont été testés. Les résistances en compression et en traction ont été évaluées après 28 jours de conservation dans des conditions de laboratoire (25°C et 50-60% RH).

Afin d'analyser et d'apprécier les conséquences de l'application d'une énergie de compactage inférieure (ou supérieure) à l'énergie de référence, sur la densité et la résistance du BCR, la relation entre le rapport de l'énergie appliqué et le taux de la résistance développée est représentée dans les [Figures 4.7](#) et [4.8](#).

avec :

- R_c/R_{cr} : rapport entre la résistance en compression développée à l'énergie considérée et la résistance en compression développée à l'énergie de référence.
- R_t/R_{tr} : rapport entre la résistance en traction par fendage développée à l'énergie considérée et la résistance en traction développée à l'énergie de référence.

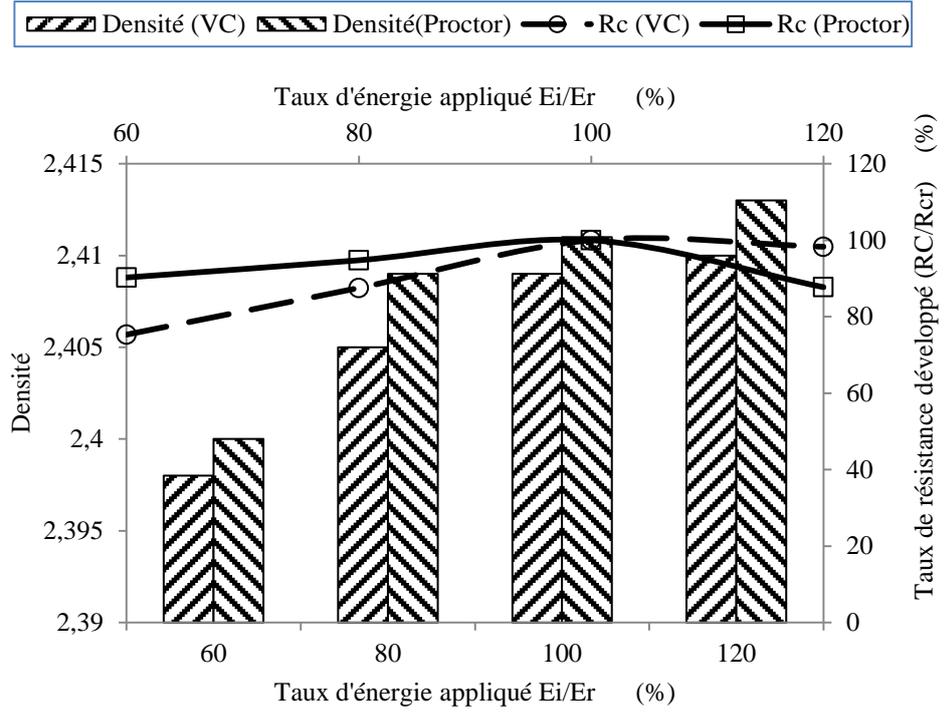


Fig. 4.7. Effet de l'énergie de compactage sur la résistance en compression.

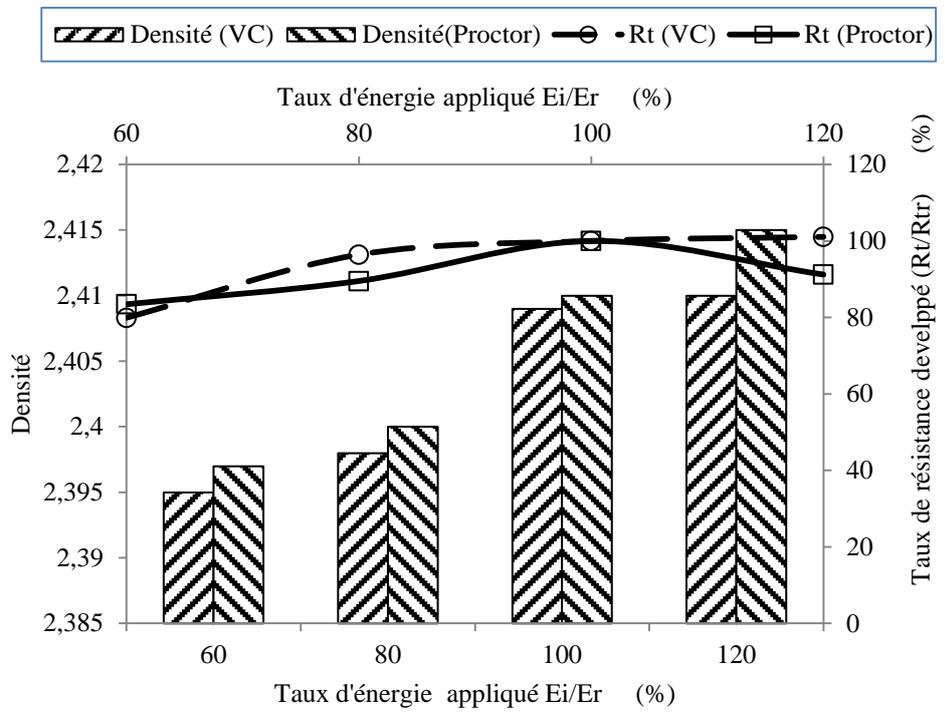


Fig. 4.8. Effet de l'énergie de compactage sur la résistance en traction.

Les résultats obtenus montrent que la densité des éprouvettes est proportionnelle au niveau de l'énergie de compactage appliqué. La méthode Proctor permet d'obtenir des niveaux de densification supérieurs par rapport à la méthode vibro-compactage. A partir des courbes (Fig. 4.7 et 4.8), on remarque que les propriétés mécaniques sont proportionnelles à l'énergie de compactage appliquée, tant que cette dernière reste inférieure ou égale à l'énergie de référence. Dans le cas où l'énergie appliquée dépasse l'énergie de référence, les propriétés mécaniques demeurent pratiquement inchangées, pour les éprouvettes consolidées par la méthode vibro-compactage, alors que, pour la méthode Proctor elles diminuent.

La chute de résistance, avec la méthode Proctor, peut être expliquée par l'effet de l'impact de compactage qui induit des cassures aux niveaux des granulats. D'après [Casias et al. \(1988\)](#), l'énergie de compactage du Proctor modifié utilisant une dameuse standardisée peut causer des fractures au niveau des granulats grossiers, toutefois, le niveau de dégradation dépend de leurs propriétés intrinsèques. Les granulats doivent en principe être capables d'absorber plus d'énergie durant le compactage sans endommagement. Il a été rapporté également qu'il est plus approprié d'appliquer un effort de compactage plus faible que l'énergie de référence pour le Proctor modifié.

Toutefois, pour assurer de meilleures performances des mélanges de BCR, il est important que l'énergie de compactage appliqué soit toujours la plus proche possible de l'énergie de référence.

4.4 EFFET DU TYPE DE SABLE

Dans cette section, on compare la densité et la résistance du BCR préparé à base de deux types de sable : dunaire et concassé. Deux méthodes de compactage, Proctor et vibro-compactage, ont été retenues pour cette étude. La densité et les propriétés mécaniques (résistances en compression et en traction) sont mesurées après 28 jours de cure dans des conditions de laboratoire. Les [Figures 4.9, 4.10 et 4.11](#), présentent les résultats obtenus.

L'analyse des résultats montre que la compactibilité et les propriétés mécaniques du BCR sont grandement influencées par la nature et la forme des granulats fins utilisés.

En terme de compactibilité, les mélanges préparés à base de sable concassé et compactés par la méthode vibro-compactage présentent de faibles valeurs de densité, par rapport à ceux compactés par la méthode Proctor et préparés avec le même type de sable. Sachant que, la méthode vibro-compactage est plus représentative de la procédure de compactage in situ (une surcharge appliquée est associée à un mouvement vibratoire). En revanche, les mélanges préparés à base de sable de dunes présentent des densités comparables, quelque soit la méthode de compactage adoptée.

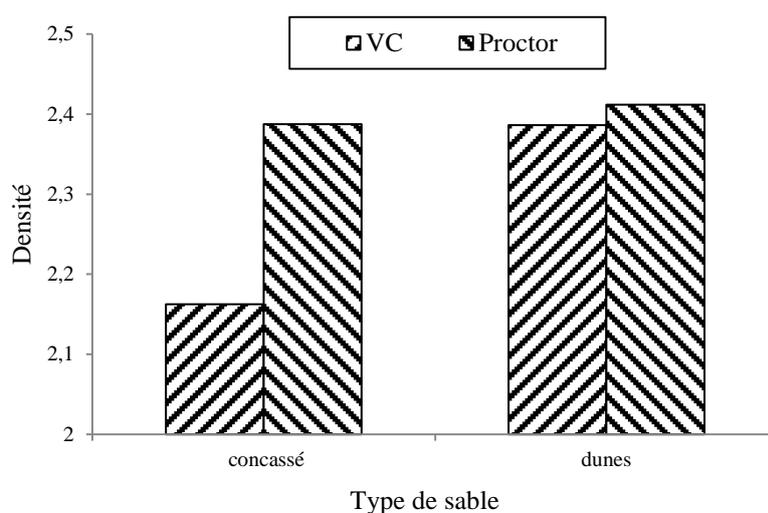


Fig. 4.9. Effet du type de sable sur la densité du BCR.

En terme de propriétés mécaniques, l'effet du type de sable est plus remarquable surtout en compression. Les mélanges préparés à base de sable de dunes développent des résistances meilleures que celles obtenues avec le sable concassé, soit plus de trois fois lorsque la méthode vibro-compactage est employée. La différence entre les deux types de sables est réduite lorsque les mélanges sont compactés par la méthode Proctor, mais cette procédure est moins représentative de l'opération de compactage sur terrain et même peut causer des cassures au niveau des granulats ce qui affecte les propriétés mécaniques.

En résumé, la forme irrégulière et allongée des particules de sables concassés, en plus de l'aspect sec du BCR, rend l'opération de serrage du squelette granulaire encore plus difficile. En effet, l'utilisation du sable concassé pour la production de BCR nécessite peut être d'autres techniques pour assurer un bon serrage du mélange. Puisque les propriétés mécaniques du BCR sont fortement liées au niveau de densification atteint.

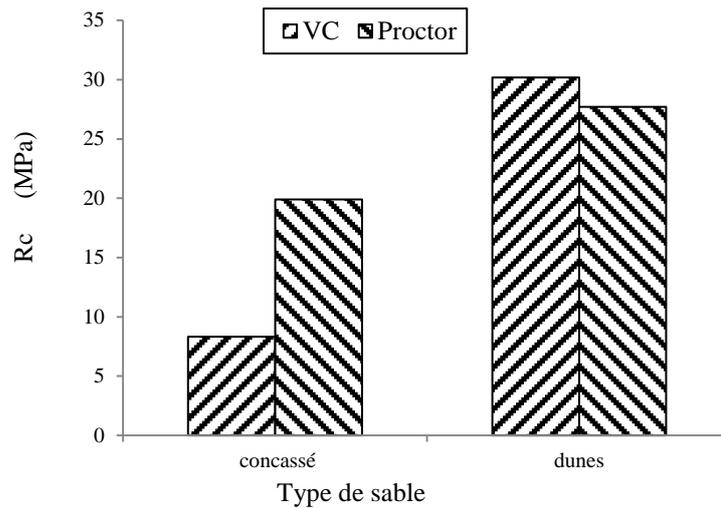


Fig. 4.10. Effet du type de sable sur la résistance en compression.

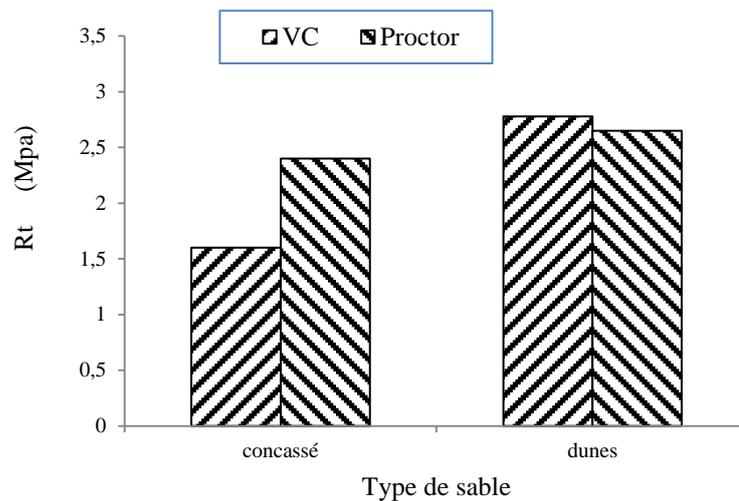


Fig. 4.11. Effet du type de sable sur la résistance en traction.

4.5 CONCLUSION

Ce chapitre dresse un état lieu sur l'effet de quelques facteurs influant le compactage du BCR : le type d'effort utilisé, le niveau d'énergie appliqué et le type du sable utilisé. Les résultats obtenus montrent que la performance du BCR est largement affectée par ces paramètres.

Pour assurer un bon compactage du BCR, il est plus fiable d'utiliser un effort dynamique que d'employer un effort statique. L'effort dynamique met en mouvement les

différents composants ce qui permet de réduire les forces de contact facilitant ainsi leur réarrangement. De plus, Il est important d'appliquer une énergie de compactage suffisante pour obtenir un squelette granulaire dense et également pour améliorer la cohésion entre les différents composants. De ce fait, et pour obtenir les meilleurs performances il est recommandé d'utiliser une énergie de compactage soit la plus proche possible de l'énergie de référence.

La forme des particules du sable concassé en plus de l'aspect ferme du BCR et de la faible teneur en eau, rend le compactage encore plus difficile. En effet, une attention particulière doit être accordée à la phase de compactage du BCR lorsqu'il est préparé à base d'un sable concassé afin d'assurer les meilleures performances.

5 EFFET DE CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DE BCR

5.1 INTRODUCTION

Le recyclage est l'action de réintroduire des matériaux récupérés à partir des produits et sous-produits, en fin de service, dans le cycle de fabrication de nouveaux produits. Les déchets caoutchouteux sont considérés comme encombrants et polluants, à cause de leur impact direct sur l'environnement. Le recyclage de ce genre de déchets industriels dans les routes en BCR est considéré comme une solution prometteuse sur les plans écologique et économique, car il permet de préserver les ressources naturelles et également de produire un matériau qui respecte l'environnement, d'une part, et de réduire les coûts, d'autre part.

L'objectif principal de cette thèse est de déterminer les potentialités de valorisation des déchets d'origine caoutchouteuse en technique routière. L'étude entreprise consiste en une caractérisation expérimentale en laboratoire d'éprouvettes de BCR préparées à base de granulats en caoutchouc.

Au quatrième chapitre on a présenté et évalué les propriétés des mélanges de BCR préparés à base de granulats naturels. Ce chapitre par contre a pour but d'étudier les effets probables de l'introduction du caoutchouc sur les propriétés du BCR aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Comme indiqué précédemment, le compactage est un élément déterminant dans le processus de production du BCR. En effet, une attention particulière a été portée à ce facteur en présence de granulats de nature élastique.

De plus, nous avons étudié à la fin de ce chapitre l'effet de l'utilisation de la fumée de silice avec 5% du remplacement partiel du ciment sur les propriétés du BCR aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

5.2 EFFECT DU CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DE BCR

Dans cette section, on présente ainsi que leur interprétation, les résultats d'essais réalisés sur des éprouvettes de BCR préparés à partir des matériaux locaux et contenant des granulats en caoutchouc à différents pourcentages. Ces derniers ont été ajoutés par substitution partielle du volume total de graviers. Les différentes compositions de mélanges étudiés sont représentées dans le [Tableau 5.1](#).

Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques (100 x 200 mm) et cubiques (100 x 100 x 100 mm). Des prismes (100 x 100 x 400 mm) ont été utilisés pour l'essai de flexion et des éprouvettes cylindriques (160 x 320 mm) pour l'essai de traction par fendage. Toutes les éprouvettes étudiées, dans cette section, sont démoulées après 24 heures, puis conservées dans les conditions de laboratoire (25C° et 50-60% RH), jusqu'à la date d'essai.

[Tableau 5.1](#). Proportions des différents mélanges.

Mélange	Caoutchouc (%)	Constituants (kg/m ³)				
		Ciment	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/20
BCR ₀	0	295	727	596	299	241
BCR ₅	5	295	727	566,2	284,05	228,95
BCR ₁₀	10	295	727	536,4	269,1	216,9
BCR ₁₅	15	295	727	506,6	254,15	204,85
BCR ₂₀	20	295	727	476,8	239,2	192,8
BCR ₂₅	25	295	727	447	224,25	180,75
BCR ₃₀	30	295	727	417,2	209,3	168,7

5.2.1 À l'état frais

La densité et le temps de compactage ont été mesurés pour chacune des teneurs en caoutchouc. La [Figure 5.1](#) illustre l'effet de l'introduction du caoutchouc sur la densité du BCR à l'état frais. Une diminution régulière de densité est observée avec l'augmentation de concentrations en caoutchouc. La densité varie de 2433 kg/m³ à 2292 kg/m³, lorsque le taux de substitution en caoutchouc est de 30%, donnant ainsi une chute de densité de 5,8%. La réduction de densité est due à la faible densité du caoutchouc par rapport aux granulats naturels.

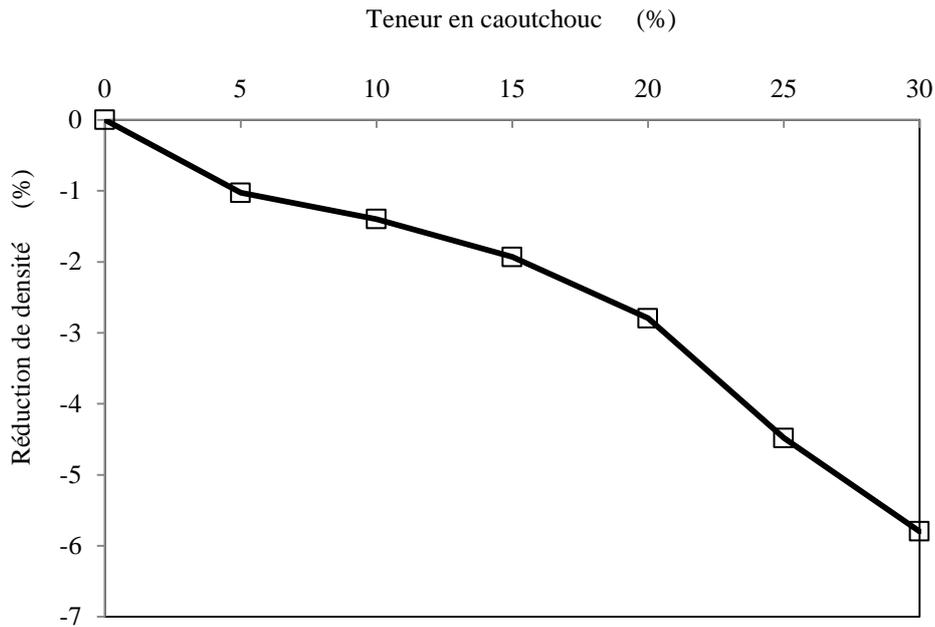


Fig. 5.1. Effet du caoutchouc sur la densité à l'état frais.

Il a été rapporté dans la littérature (Siddique & Naik, 2004), que l'augmentation de l'entraînement de l'air occlus par les particules de caoutchouc allège un peu le béton. Cette justification est peut-être plus valable pour les bétons ordinaires que pour le BCR, puisque ce dernier subit une action mécanique plus élevée lors du compactage ce qui permet de réduire le pourcentage des vides dans le mélange.

Puisque le BCR est un béton ferme, sa consistance est couramment mesurée à l'aide de l'essai Vébé. L'essai a été réalisé suivant le mode opératoire de la norme ASTM C1170. La relation entre le temps de compactage et la teneur en caoutchouc est représentée dans la Figure 5.2.

A partir de la courbe, on peut remarquer une tendance de la diminution du temps Vébé avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Il varie de 33s à 23s lorsque la teneur en caoutchouc passe de 0 à 30%.

La diminution du temps de compactage serait due à la faible absorption du caoutchouc par rapport aux granulats naturels, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans le mélange. Cette dernière facilite l'opération de compactage par la réduction des forces de frottement inter-granulaires.

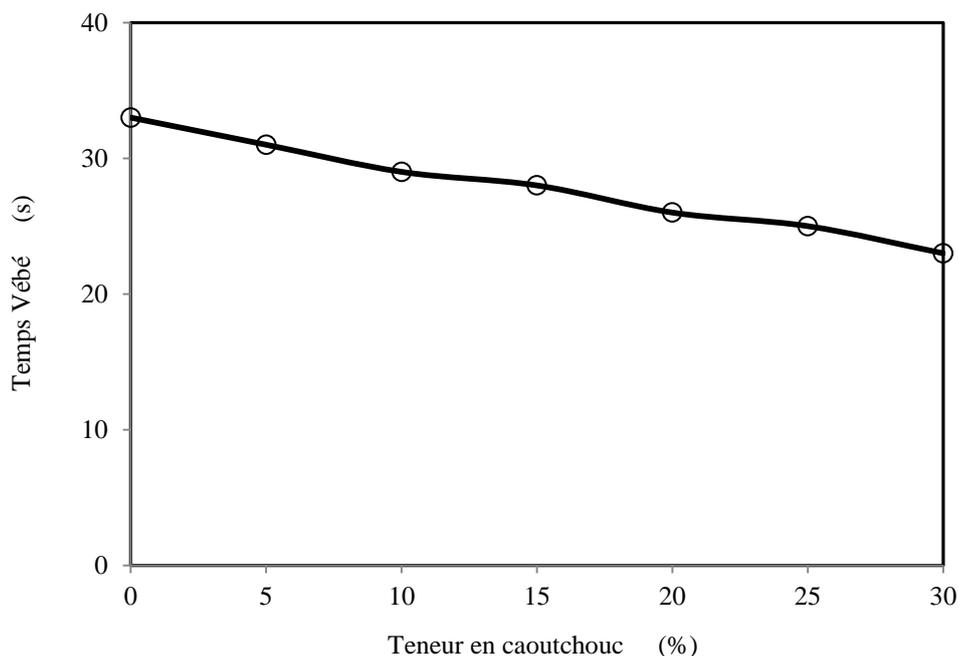


Fig. 5.2. Effet du caoutchouc sur la maniabilité.

Les résultats obtenus sont en accord avec des constatations observées lors du malaxage de BCR, en présence du caoutchouc. Les conditions de mise en œuvre (ouvrabilité) sont rendues plus faciles. En revanche, les résultats obtenues sont en contradiction avec ceux rapportés par [Jingfu et al. \(2008\)](#), qui ont signalé une diminution de l'ouvrabilité du BCR en présence du caoutchouc.

5.2.2 À l'état durci

5.2.2.1 Résistance en compression

La résistance à la compression est une caractéristique fondamentale dans le processus de caractérisation des matériaux cimentaires puisqu'elle est un élément important de la conception et du dimensionnement des routes en BCR. Elle permet également de renseigner sur la qualité du béton.

L'essai de compression ([Fig.5.3](#)) a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (160x320) mm conformément à la norme [ASTM C39](#). Les éprouvettes ont été préparées suivant le mode opératoire de la norme [ASTM C1176](#).



Fig. 5.3 Machine de compression utilisée.

La Figure 5.4 illustre les résultats obtenus de résistances en compression, à 28 jours, en fonction de la teneur en caoutchouc. D'après l'histogramme, on remarque une réduction systématique de la résistance avec l'augmentation du taux d'incorporation du caoutchouc. Lorsque la teneur en caoutchouc varie de 0 à 30%, la résistance chute de 27,12 à 13,58 MPa ; soit une chute de l'ordre de 50%, par rapport au mélange de référence. La chute de résistance mesurée, corrobore les résultats rapportés dans la littérature réalisés sur des matériaux cimentaires à base de granulats d'origine caoutchouteux (Eldin NN & Senouci, 1994; Topçu, 1995; Khatib & Bayomy, 1999; Z. Boudaoud & M. Beddar, 2012).

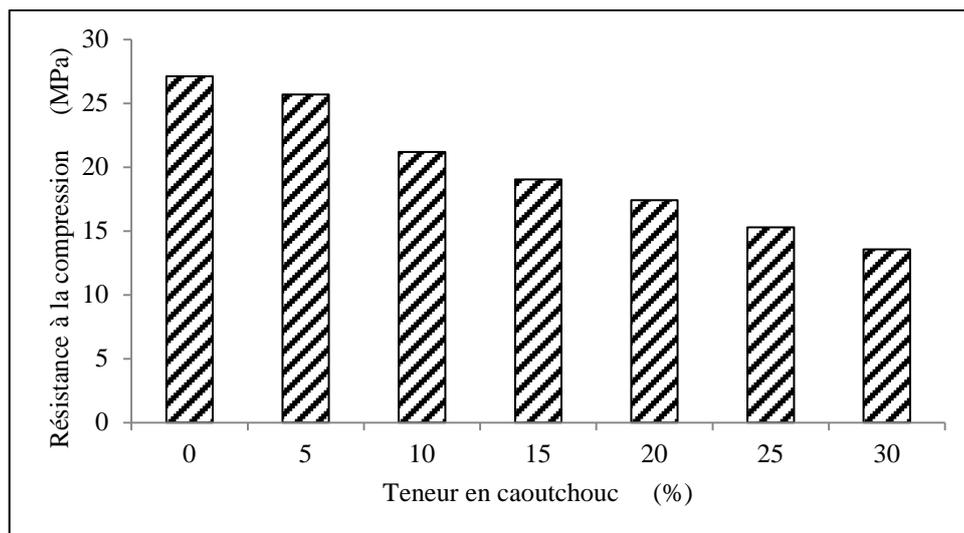


Fig. 5.4. Effet du caoutchouc sur la résistance en compression à 28 jours.

D'après [HO anh \(2010\)](#), l'argument couramment avancé et le plus utilisé par les chercheurs pour expliquer la chute de résistance en compression est la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels. Alors que [Eldin NN & Senouci \(1994\)](#), ont attribué la chute de résistance à une réduction de la matière de charge solide et à des concentrations de contraintes dans la pâte de ciment autour des particules de caoutchouc.

La chute de résistance peut être également justifiée par une faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. Cet argument a été évoqué dans plusieurs travaux qui traitaient du comportement des bétons contenant des granulats en caoutchouc ([Raghavan et al., 1988](#); [Segre & Joekes, 2000](#)).

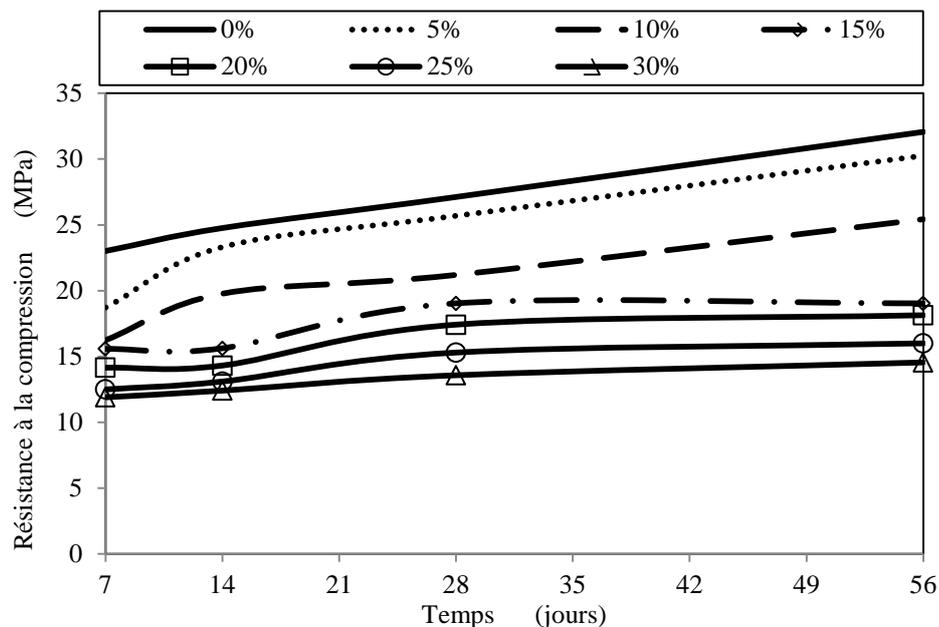
La photographie de la [Figure 5.5](#), montre comment la mauvaise adhérence conduit à la création de zones de faible résistance. La rupture commence par la dislocation des particules de caoutchouc à partir de la matrice cimentaire, ce qui conduit à des concentrations des contraintes dans les zones voisines.



[Fig. 5.5](#). Rupture interfaciale entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment.

La résistance en compression a été également mesurée à l'âge de 7, 14 et 56 jours, dans le but de quantifier l'évolution de la résistance dans le temps en présence du caoutchouc. Les résultats obtenus sont présentés dans la [Figure 5.6](#).

A partir des courbes, le mélange confectionné avec 5% du caoutchouc présente pratiquement le même comportement que le mélange de référence, à l'exception du point correspondant à 7 jours, avec un changement relatif de l'ordre de 5%. Les mélanges avec des teneurs en caoutchouc relativement plus élevées (plus de 15%), présentent également des comportements semblables. On peut remarquer clairement que la vitesse de développement de la résistance dans le temps diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Cette réduction est serait due à la diminution du volume de matières solides dans le mélange avec l'accroissement du taux de caoutchouc.



[Fig. 5.6](#). Evolution de la résistance dans le temps.

5.2.2.2 Résistance en traction par fendage

Il est possible d'évaluer la résistance en traction à partir de l'essai de flexion, mais vu la difficulté de produire des éprouvettes prismatiques de BCR, l'essai de traction par fendage a été largement utilisé dans la littérature pour caractériser le BCR ([Ludwig et al. 1994](#)).

Pour évaluer la résistance en traction, les mêmes moules aux mêmes conditions de cures utilisés en compression ont été conservés. L'essai a été réalisé conformément à la norme [ASTM C496](#).

La résistance à la traction par fendage est calculée par la formule suivante :

$$f_t = \frac{2F}{\pi Ld}$$

avec:

f_t : l'effort maximal.

L : longueur de la génératrice du cylindre.

d : diamètre de l'éprouvette.

Les résultats de la résistance en traction par fendage, à 28 jours, sont présentés dans l'histogramme de la [Figure 5.7](#), en fonction de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Comme dans le cas de la compression, la résistance à la traction diminue également avec l'accroissement de la teneur en caoutchouc. A la [Figure 5.8](#), l'évolution de la résistance en fonction du temps, est mise en évidence. Il est important de signaler que l'effet du caoutchouc sur la résistance à la traction par fendage est moins remarquable qu'en compression. Les mêmes justifications données précédemment pour expliquer la chute de résistance en compression, à savoir la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment, restent valables.

La faible sensibilité de la résistance en traction par rapport à celle en compression, vis-à-vis de l'introduction du caoutchouc, peut être justifiée par la forte anisotropie du BCR, suite à son compactage intensif dans le sens vertical qui pousse les gros granulats à prendre une direction privilégiée. Dans l'essai de traction, la force est appliquée perpendiculairement au sens de la force de compactage, tandis qu'en compression les deux forces sont parallèles.

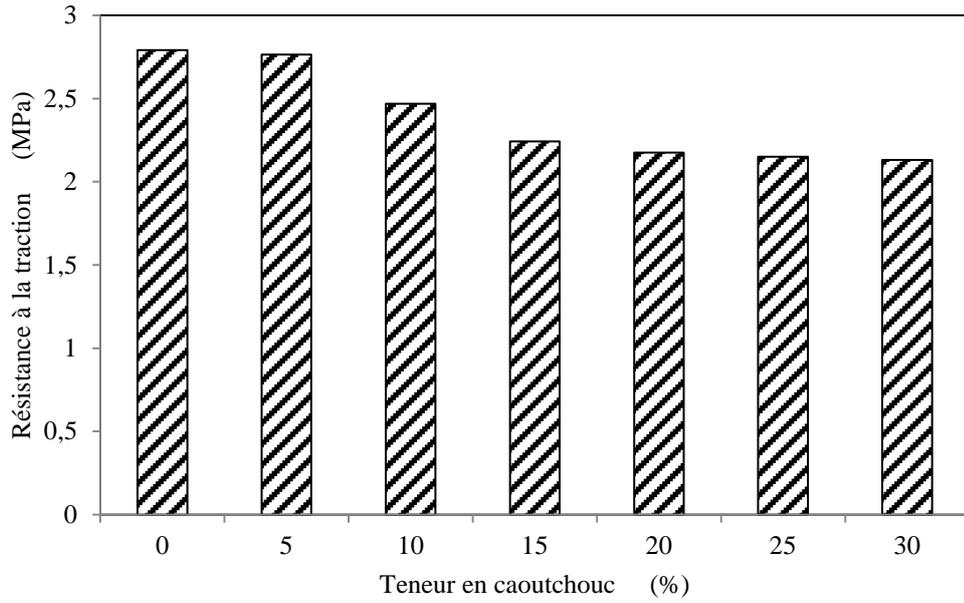


Fig. 5.7. Effet du caoutchouc sur la résistance en traction par fendage.

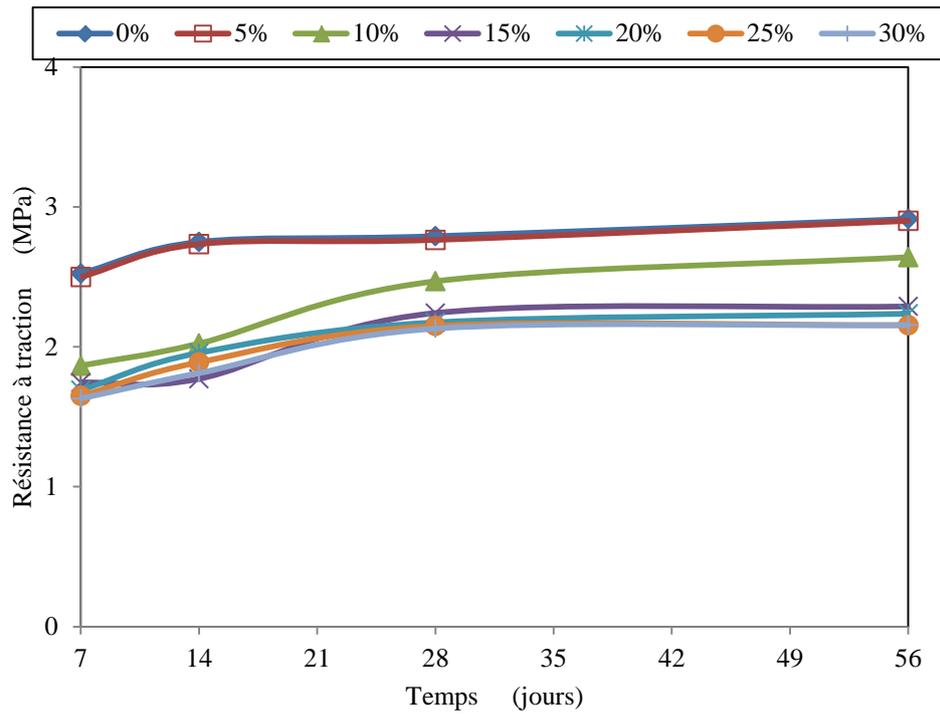


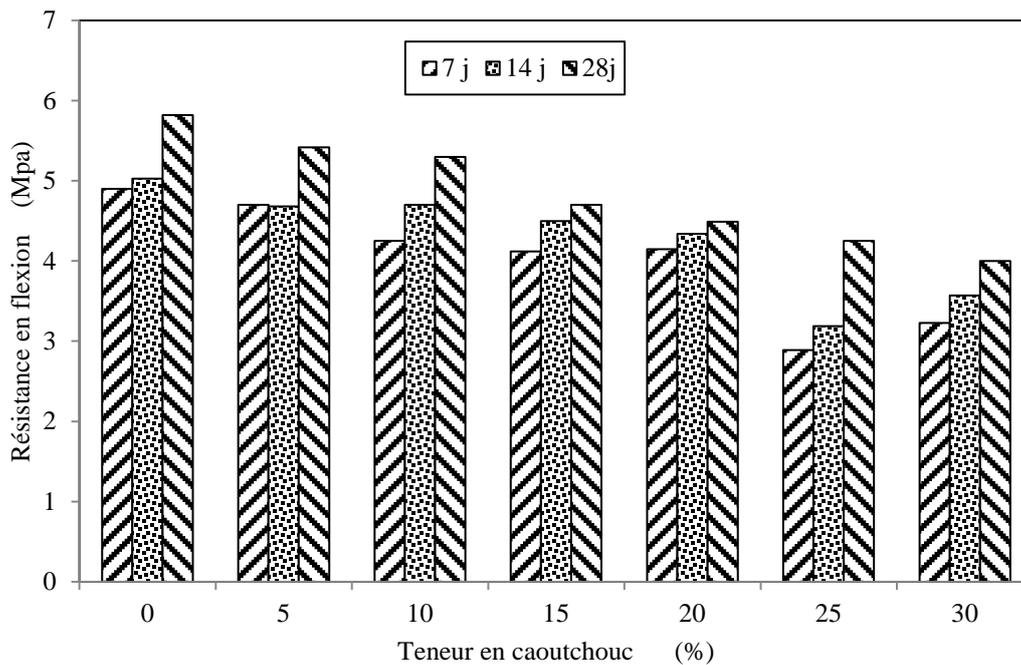
Fig. 5.8. Evolution de la résistance en traction dans le temps.

5.2.2.3 Résistance en flexion

La résistance à la flexion est une caractéristique importante pour le BCR, car la rupture dans les chaussées se produit souvent sous l'effet d'une sollicitation de flexion. L'essai a été réalisé suivant la norme [ASTM C78](#).

La [Figure 5.9](#) présente les résistances en flexion obtenues à 7, 14 et 28 jours. Comme dans le cas de la compression et de la traction, la résistance en flexion diminue également avec l'accroissement du dosage en caoutchouc dans le mélange. Pour 30% de remplacement partiel, la résistance en flexion varie de 5,8 à 4 MPa, soit une chute de l'ordre de 30%.

La [Figure 5.10](#) permet une comparaison entre les différentes chutes de résistance en fonction de la teneur en caoutchouc. Il est clairement noté que la résistance en compression est plus sensible à l'augmentation du taux d'incorporation du caoutchouc dans le mélange qu'en traction et en flexion. Il est important de noter que les mélanges de BCR sont moins sensibles à l'ajout des particules de caoutchouc que le béton ordinaire. Cela est peut être dû à l'effet du compactage, qui réduit les vides dans le mélange. Par ailleurs, la résistance en flexion est moins sensible à l'introduction du caoutchouc qu'en compression suite à la forte anisotropie du BCR.



[Fig. 5.9.](#) Variation de la résistance en flexion contre la teneur en caoutchouc.

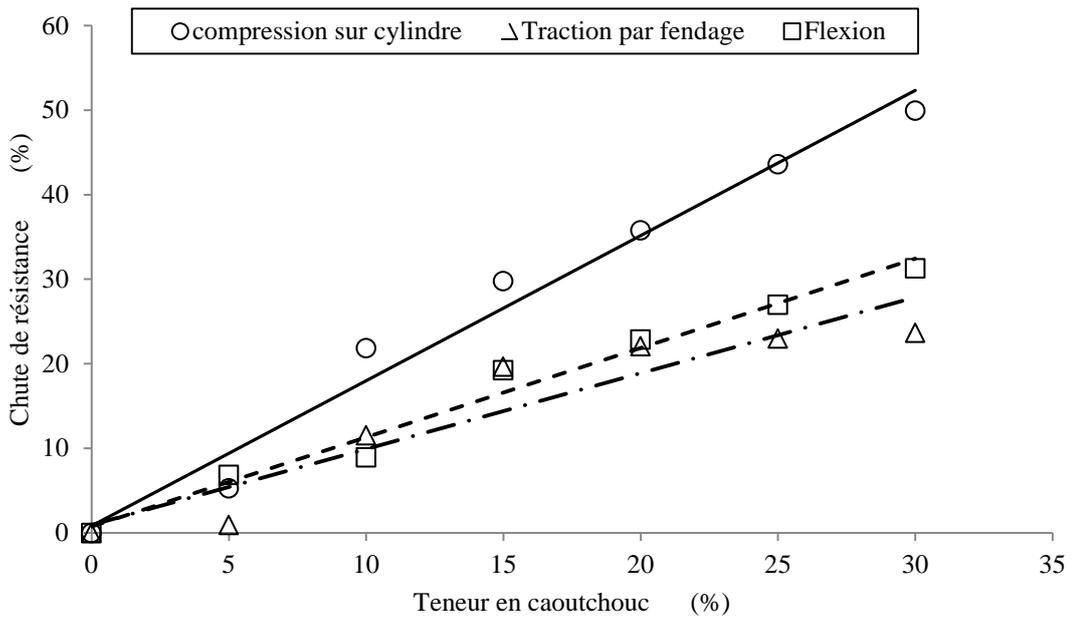


Fig. 5.10. Chutes de résistance en fonction de la teneur en caoutchouc.

Les relations entre la résistance en compression et les résistances en traction (par flexion et par fendage) sont présentées dans les Figures 5.11 et 5.12. Le rapport de résistance de traction par fendage à la résistance à la compression varie entre 9 et 15%, tandis que, le rapport flexion/compression varie entre 20 et 30% en fonction de l'âge du béton.

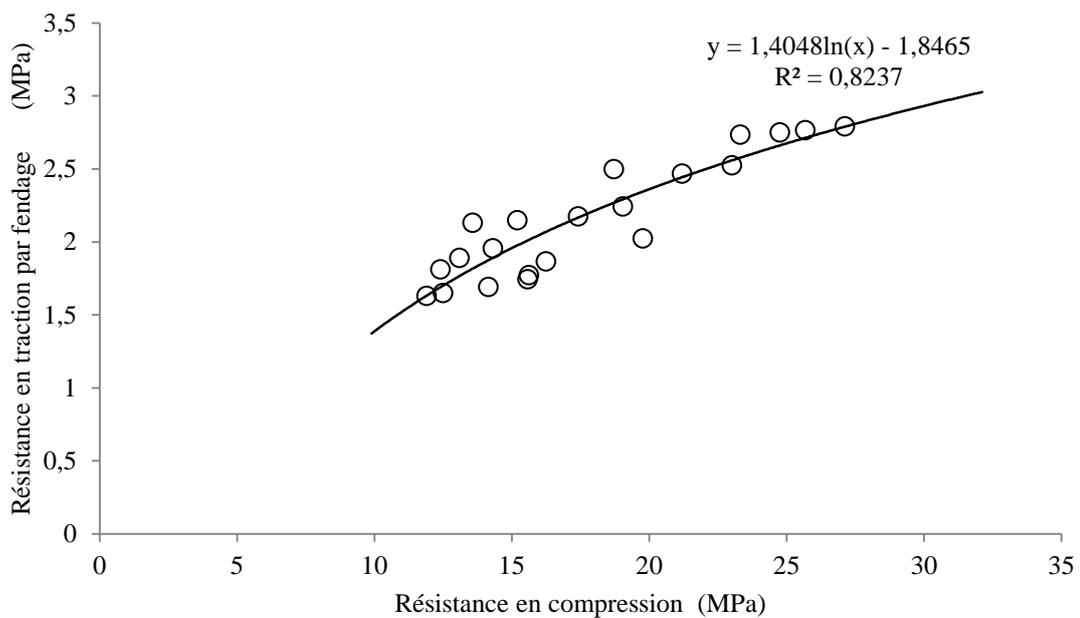


Fig. 5.11. Relation entre les résistances en traction et en compression.

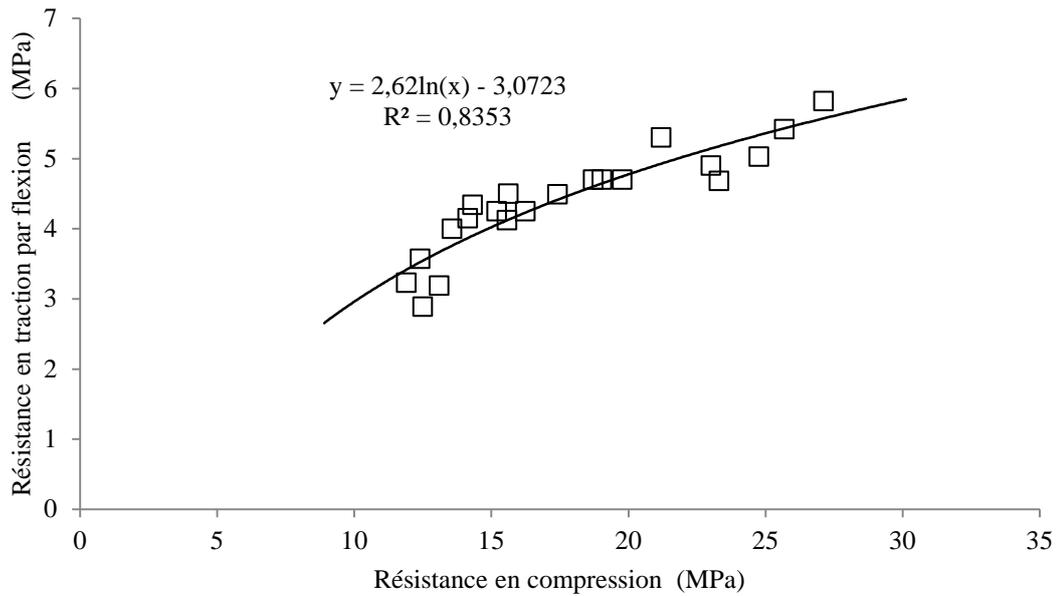


Fig. 5.12. Relation entre les résistances de traction par flexion et de compression.

5.2.2.4 Relation entre la résistance et la densité

Pour analyser l'effet de la densité du BCR durci sur leurs propriétés mécaniques, la variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction de la densité des éprouvettes est évaluée. Le graphe de la Figure 5.13 représente cette relation, faisant ressortir une bonne corrélation entre la résistance et la densité marquée par un coefficient de corrélation élevé.

On notera par ailleurs, que les courbes de résistance (sur cylindre et sur cube), tracées sur la Figure 5.13, convergent vers le même point, qui représente la densité maximale obtenue par compactage, où tous les vides sont éliminés. En pratique, il est très difficile d'atteindre ce point, mais il est très important de se rapprocher autant que possible de ce niveau de densification.

En effet, la performance du BCR, est grandement liée à la qualité du compactage réalisée. Suite à ces observations une attention particulière doit être accordée au niveau de densification atteint, pendant la réalisation et lors du contrôle de projets de BCR.

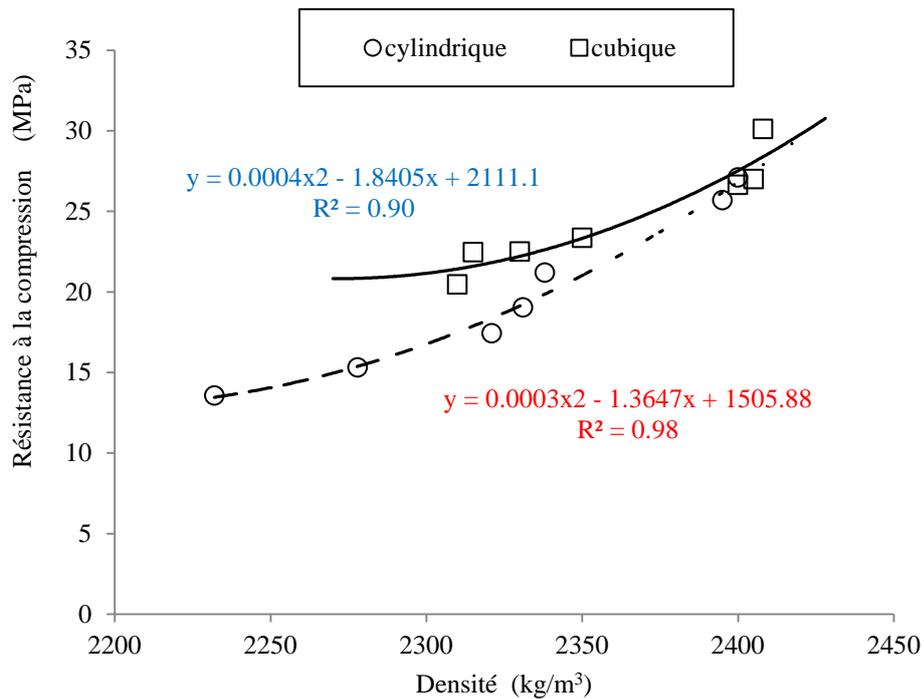


Fig. 5.13. Relation entre la résistance en compression et la densité.

5.2.2.5 Modèle de prévision de résistance

Il est admis maintenant que la résistance diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le béton. [Khatib & Bayomy \(1999\)](#), ont proposé des modèles mathématiques pour estimer la résistance des bétons ordinaires en fonction du taux de substitution volumique de graviers par le caoutchouc.

La résistance du béton en caoutchouc, suivant ces modèles, est déduite de la résistance du mélange de référence (sans caoutchouc). Il suffit d'introduire le taux du caoutchouc dans l'équation, pour obtenir la résistance. [Khatib & Bayomy \(1999\)](#) ont proposé de différentes équations, en fonction des dimensions du caoutchouc (particules grossières ou poudrettes fines) et également en fonction de l'âge du béton. Dans les [Figures 5.14 à 5.16](#), on présente les réponses données par les modèles de [Khatib & Bayomy \(1999\)](#), en comparaison avec les résultats expérimentaux.

D'après les [Figures 5.14, 5.15 et 5.16](#) on remarque que les modèles proposés par [Khatib & Bayomy \(1999\)](#) ne permettent pas de suivre les variations de la résistance du BCR, avec l'accroissement du taux de caoutchouc dans le mélange. L'écart relatif moyen

entre les résultats expérimentaux et ceux donnés par le modèle de [Khatib & Bayomy \(1999\)](#), varie entre 10 et 75%.

Par ailleurs, des modèles mathématiques sont proposés dans cette étude pour suivre l'évolution de la résistance du BCR, en fonction du dosage en caoutchouc. C'est toujours une fonction polynomiale, comme celle utilisée par [Khatib & Bayomy \(1999\)](#), qui reste valable (voir section 2.5.2) mais avec la variation des paramètres a, b et également la puissance de l'équation (m), pour tenir compte de la spécificité du BCR. Les formalismes proposés sont groupés dans le [Tableau 5.2](#). Des ajustements ont été faits sur les paramètres de [Khatib & Bayomy \(1999\)](#) de telle sorte à réduire l'écart relatif entre les valeurs théorique et expérimentale de la résistance. Les résultats obtenus sont présentés sur les mêmes graphes ([Fig. 5.15 à 5.17](#)).

Les modèles proposés dans cette recherche permettent de simuler d'une façon satisfaisante l'évolution des propriétés mécaniques en fonction du dosage en caoutchouc dans le mélange. L'écart relatif moyen entre l'expérience et le modèle proposé, est négligeable en compression. Il est inférieur à 1,7% en traction et en flexion. D'autant plus, les résultats obtenus confirment d'autres de littératures ([Meddah et al., 2014](#)), qui ont indiqué que les mélanges de BCR sont moins sensibles à l'ajout du caoutchouc que les bétons ordinaires.

[Tableau 5.2](#). Modèles de prévision de la résistance pour le BCR, en présence du caoutchouc.

Compression	
$f_{c7} = f_{c7}^*[0.4 + 0.6(1 - R)^5]$	$f_{c28} = f_{c28}^*[0.1 + 0.9(1 - R)^{2.3}]$
Traction par fendage	
$f_{t7} = f_{t7j}^*[0.15 + 0.85(1 - R)^{1.5}]$	$f_{t28} = f_{t28}^*[0.1 + 0.9(1 - R)^{1.2}]$
Flexion	
$f_{f7} = f_{f7j}^*[0.3 + 0.7(1 - R)^{2.5}]$	$f_{f28} = f_{f28}^*[0.18 + 0.82(1 - R)^{1.2}]$

f_i : Résistance considérée

f_7^*, f_{28}^* : Résistance du mélange de référence (sans caoutchouc), à l'âge 7 et 28 jours, respectivement.

Les indices c, t, f : désignent la compression, la traction et la flexion, respectivement.

R : teneur en caoutchouc.

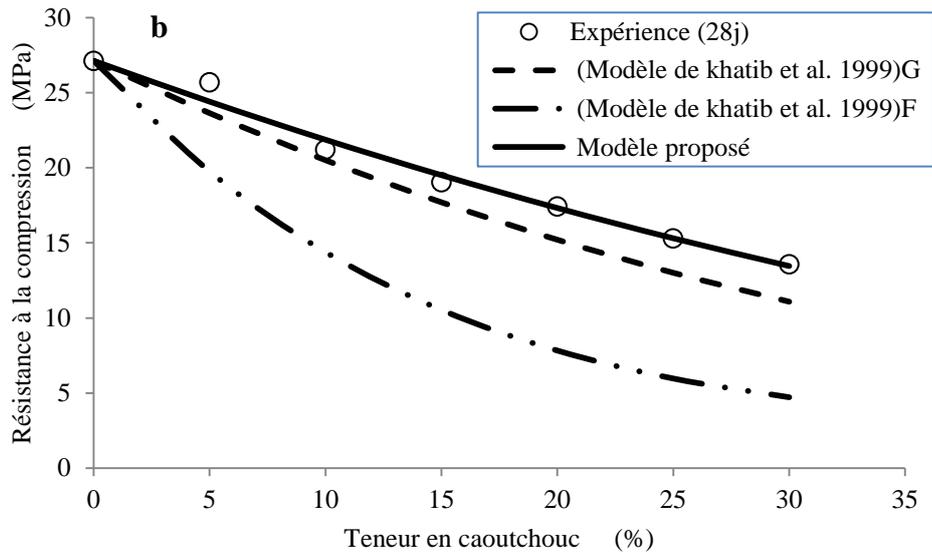
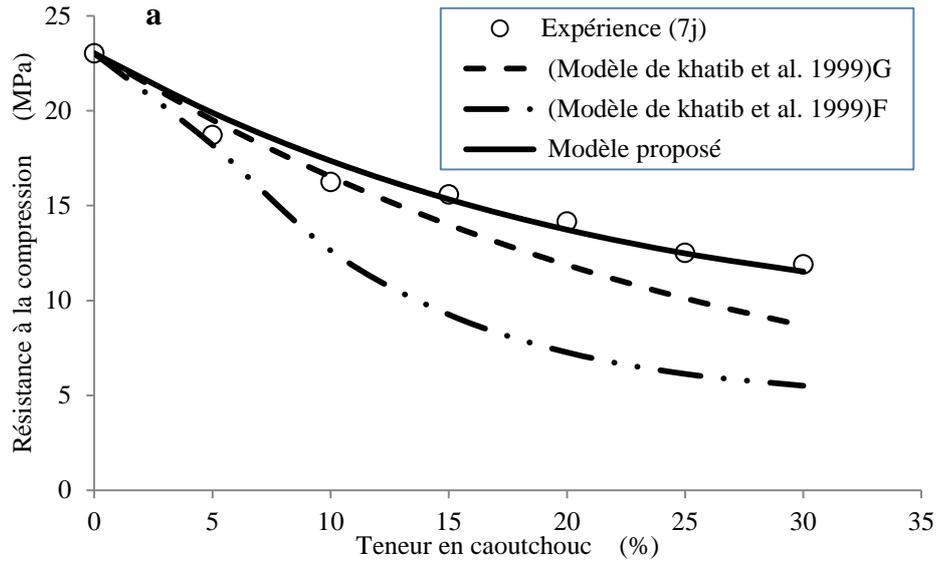


Fig. 5.14. Simulation de l'effet du caoutchouc sur la résistance en compression,

(a) 7 jours, (b) 28 jours ; G : désigne caoutchouc grossier (particule) ; F : désigne caoutchouc fin (poudre).

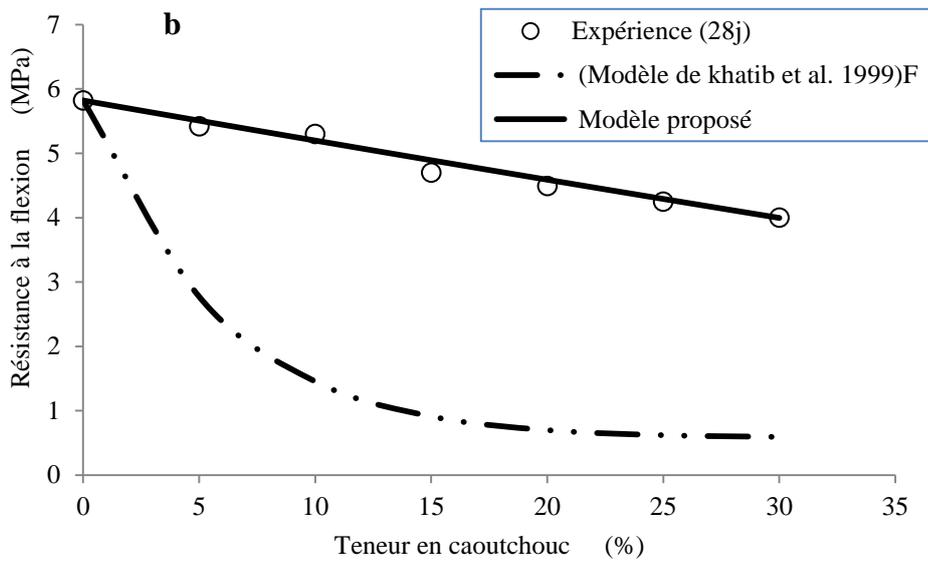
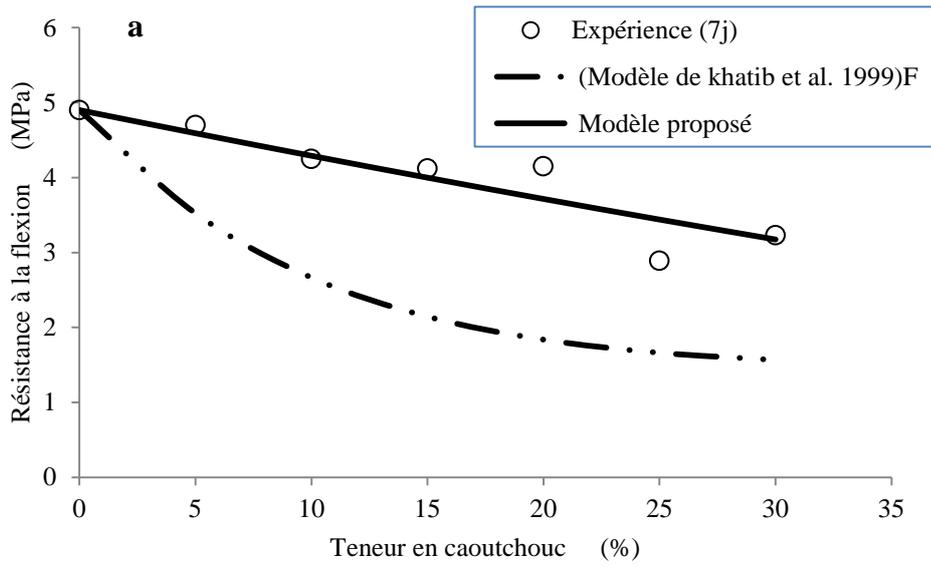


Fig. 5.15. Simulation de l'effet du caoutchouc sur la résistance en traction par flexion.

(a) 7 jours, (b) 28 jours ; F : désigne caoutouc fin (poudrette).

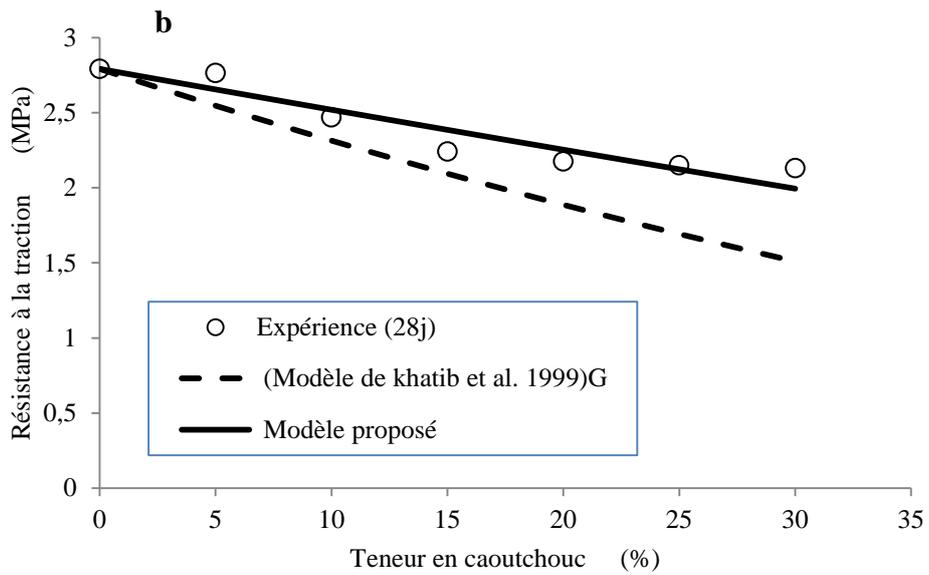
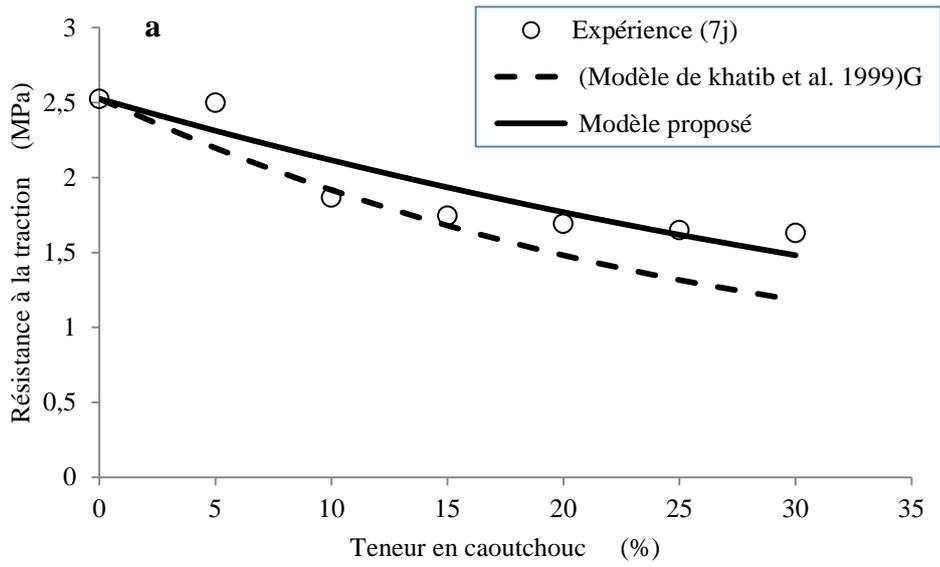


Fig. 5.16. Simulation de l'effet du caoutchouc sur la résistance en traction par fendage.

(a) 7 jours, (b) 28 jours ; G : désigne caoutchouc grossier (particule).

5.2.2.6 Module d'élasticité

Le module d'élasticité en compression du BCR est déterminé à partir de la courbe contrainte-déformation. Il est calculé généralement, comme pour les bétons ordinaires, à 40% de la contrainte à la compression (contrainte ultime dans un essai de compression uniaxiale). L'essai a été réalisé suivant le mode opératoire de la norme [ASTM C469](#) (Fig. 5.17). Les résultats obtenus sont illustrés dans la [Figure 5.18](#).



Fig. 5.17. Dispositif de mesure du module d'élasticité.

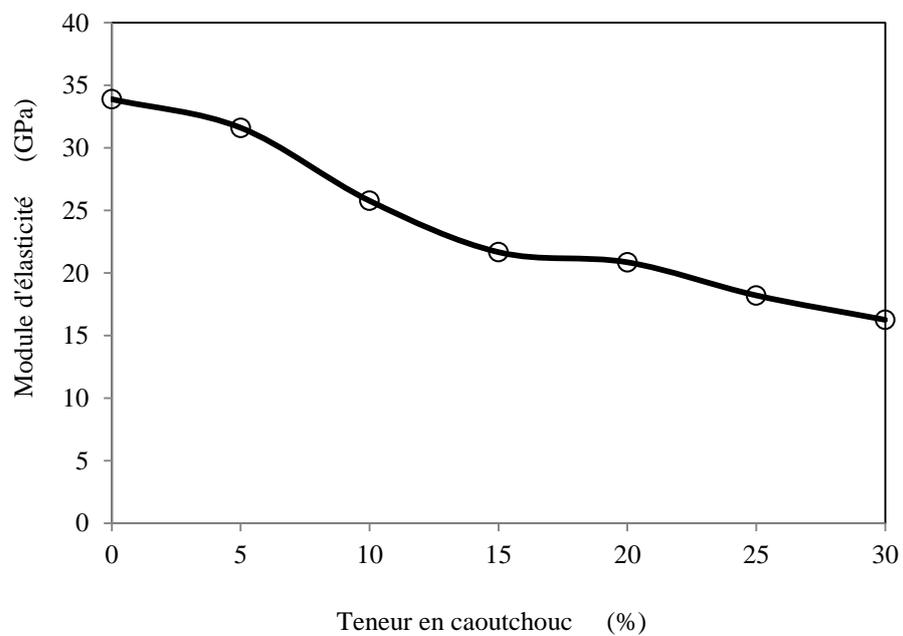


Fig. 5.18. Module élastique en compression en fonction du dosage en caoutchouc.

Les résultats obtenus, montrent que le module d'élasticité en compression est affecté par la présence du caoutchouc dans le mélange. Il varie de 33,9 GPa pour le mélange de référence à 16,26 GPa, lorsque le taux de substitution en graviers de caoutchouc est de 30%.

La réduction du module élastique en compression, est due à la nature élastique du caoutchouc, qui se caractérise par un module d'Young plus faible par rapport aux granulats naturels.

5.2.2.7 Aspect des éprouvette à la rupture

L'aspect des éprouvettes à la rupture, sous une sollicitation de flexion, est illustré dans la [Figure 5.19](#). On peut constater que le type de la rupture a été affecté par la présence du caoutchouc dans le BCR. Les éprouvettes qui contiennent le caoutchouc avec des taux supérieurs à 10% restent intactes après la rupture. On peut voir également que fissures sont inversement proportionnelles au pourcentage du caoutchouc ajouté.

Ce mécanisme de rupture est dû à un effet-couture exercé par les particules de caoutchouc. En effet, le caoutchouc a donné aux éprouvettes une aptitude plus grande en matière d'absorption d'énergie, la rupture devient plus ductile et le BCR est plus résistant à la propagation des fissures.

Ces résultats sont en accord avec ceux observés par [Raghavan et al. \(1988\)](#) lors la réalisation d'une étude sur des éprouvettes de mortier avec des particules de caoutchouc. Ils ont indiqué que ces éprouvettes ont été capables de supporter un effort supplémentaire à la rupture.

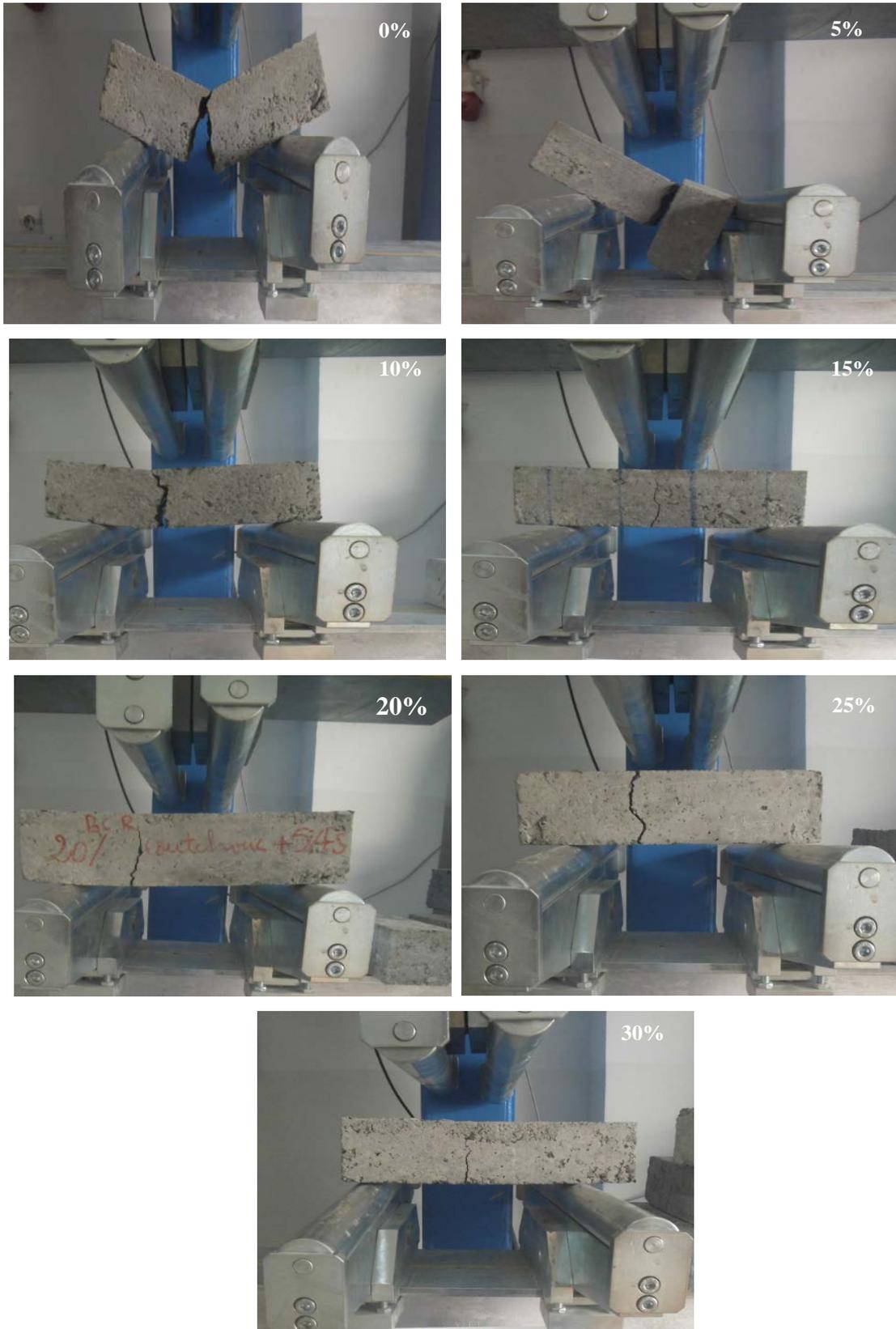
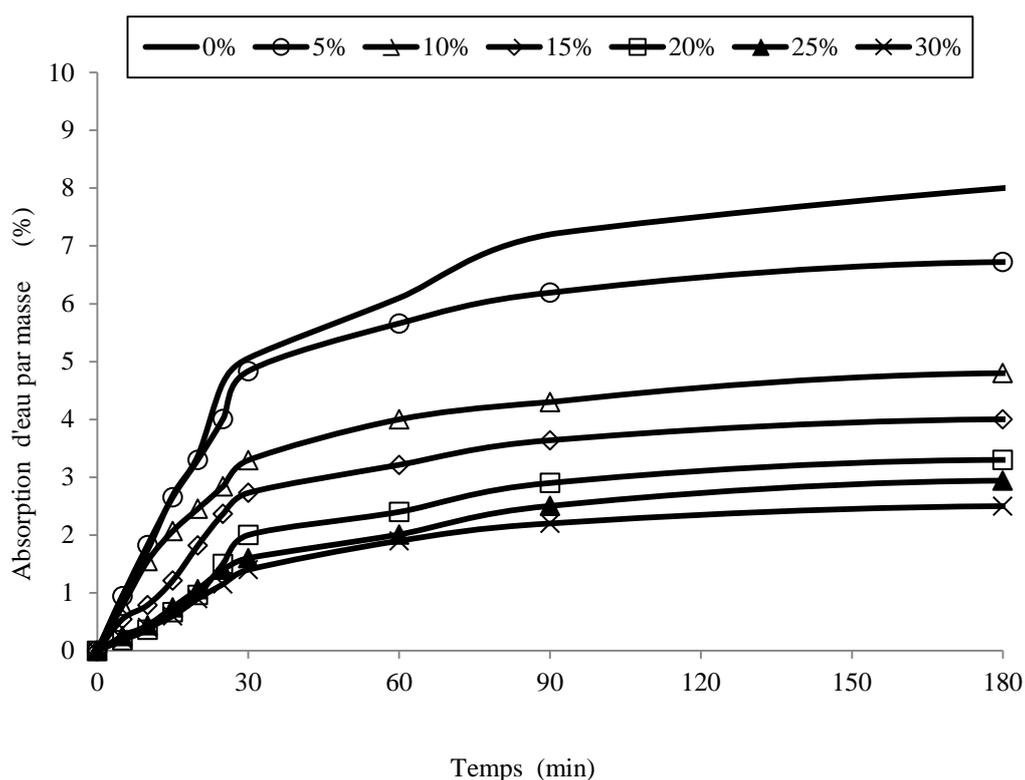


Fig. 5.19. Aspect des éprouvettes à la rupture.

5.2.2.8 Absorption

La [Figure 5.20](#) montre l'effet de l'addition du caoutchouc sur le taux d'absorption par capillarité. L'essai de capillarité a été retenu parce qu'il est plus représentatif du mode d'écoulement réel traversant la chaussée.

Il convient de noter que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Ceci est dû à la capacité d'absorption plus faible du caoutchouc par rapport aux granulats naturels, ce qui permet de réduire la surface effective traversée par l'eau. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature obtenus pour des bétons avec des ajouts de caoutchouc ([Segre & Joekes 2000](#); [Yilmaz & Degirmenci 2009](#)). Ces études antérieures ont permis de noter une diminution de porosité du béton avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc



[Fig. 5.20](#). Effet de la teneur en caoutchouc sur le taux d'absorption par capillarité.

5.3 EFFET DE L'ENERGIE DE COMPACTAGE

Lors de la production du BCR, la maîtrise de la qualité de compactage permet d'assurer les meilleures performances des mélanges. Dans le quatrième chapitre, les caractéristiques de compactage des mélanges de BCR préparés à base de granulats naturels ont été étudiées. L'objet de cette section est d'analyser l'effet de la qualité de compactage sur la densité et les propriétés mécaniques, en présence des granulats de nature élastique.

La procédure suivie dans cette partie, consiste à préparer des éprouvettes de BCR à différents teneurs en caoutchouc. Chacune de ces teneurs est soumise à différentes énergies de compactage, soit au total 21 combinaisons. Toutes les éprouvettes sont consolidées suivant le mode opératoire de la norme [ASTM C1176](#). L'énergie de compactage a été contrôlée par variation de la surcharge appliquée pendant la vibration ; trois contraintes de compactage ont été considérées : 3,9 ; 4,9 et 5,7 kPa. Celles-ci sont choisies dans l'hypothèse d'étudier les paramètres suivants ;

- L'effet d'un faible compactage (80% de la contrainte de référence) appliqué sur la densité et les propriétés mécaniques, pour le niveau 3,9 kPa.
- L'effet d'un excès de compactage (120% de la contrainte de référence) appliqué sur la densité et les propriétés mécaniques, pour le niveau 5,7 kPa.

La contrainte de compactage de référence (4,9 kPa), considérée est celle donnée par la norme [ASTM C1176](#).

Des éprouvettes cubiques (150x150) mm ont été utilisées pour l'essai de compression et des éprouvettes cylindriques (160x320) mm pour l'essai de traction par fendage. Les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures, Elles sont ensuite conservées dans des conditions de laboratoire (25°C et 50-60% RH). Les propriétés mécaniques (résistances en compression et en traction) ont été mesurées après 28 jours de durcissement dans les conditions citées ci-dessus. Pour tous les essais, la moyenne arithmétique des trois valeurs a été prise. Le [Tableau 5.3](#) montre le programme expérimental mis en œuvre et les différentes proportions des mélanges.

Tableau 5.3. Programme expérimental mis en œuvre.

Mélange	Teneur en caoutchouc (%)	NEC ^(*) (kPa)	Proportions (kg/m ³)				
			Ciment	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/20
BCR_a		3,9			596	299	241
BCR_b	0	4,9			596	299	241
BCR_c		5,7			596	299	241
BCR _{5-a}		3,9			566,2	284,1	229
BCR _{5-b}	5	4,9			566,2	284,1	229
BCR _{5-c}		5,7			566,2	284,1	229
BCR _{10-a}		3,9			536,4	269,1	216,9
BCR _{10-b}	10	4,9			536,4	269,1	216,9
BCR _{10-c}		5,7			536,4	269,1	216,9
BCR _{15-a}		3,9			506,6	254,2	204,8
BCR _{15-b}	15	4,9	295	727	506,6	254,2	204,8
BCR _{15-c}		5,7			506,6	254,2	204,8
BCR _{20-a}		3,9			476,8	239,2	192,8
BCR _{20-b}	20	4,9			476,8	239,2	192,8
BCR _{20-c}		5,7			476,8	239,2	192,8
BCR _{25-a}		3,9			447	224,2	180,8
BCR _{25-b}	25	4,9			447	224,2	180,8
BCR _{25-c}		5,7			447	224,2	180,8
BCR _{30-a}		3,9			417,2	209,3	168,7
BCR _{30-b}	30	4,9			417,2	209,3	168,7
BCR _{30-c}		5,7			417,2	209,3	168,7

^(*) NEC : niveau de la contrainte de compactage appliqué.

a, b, c : désignent les niveaux 3,9 ; 4,9 et 5,7 kPa ; respectivement.

5.3.1 Densité

L'effet de l'énergie de compactage appliquée et le dosage en caoutchouc utilisé sur la densité du BCR est présenté dans les [Figures 5.21](#) et [5.22](#). La densité du BCR a été affectée par la variation de la teneur en caoutchouc et de l'énergie de compactage appliquée. Pour chaque énergie, la densité diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. La réduction de la densité est serait due à la faible densité du caoutchouc par rapport aux granulats naturels. En fonction de l'énergie de compactage appliquée, on peut envisager des comportements différents.

Ainsi :

- Les éprouvettes compactées avec 80% de l'énergie de référence, présentent des réductions de la densité de l'ordre de 3,96 ; 3,53 ; 4,27 ; 1,33 ; 1,35 ; 1,83 et 2,78%, qui correspondent aux mélanges préparés avec 5, 10, 15, 20, 25 et 30% de caoutchouc, respectivement. Ces réductions ont été mesurées par rapport aux densités de mélanges de référence. Les chutes de densité sont dues à la teneur en vides élevée dans les mélanges.
- Les mélanges compactés avec 120% de l'énergie de référence, présentent de légères améliorations de la densité tant que le dosage en caoutchouc reste inférieur à 20%. L'augmentation de l'énergie de compactage permet d'éliminer les vides restants dans les mélanges d'une part, et d'améliorer l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment, d'autre part. Les mélanges préparés à base de 25 et 30% du caoutchouc, présentent des réductions de la densité, de l'ordre de 1 et 2,3% respectivement, lorsque l'énergie appliquée dépasse l'énergie de référence.

La chute de densité résulte de la nature élastique de caoutchouc et de sa déformabilité. Pendant le compactage, les particules de caoutchouc se compriment sous l'effet de la charge appliquée, une fois cette dernière est supprimée, le volume de caoutchouc augmente qui reflète son comportement élastique. Ce phénomène a été visuellement observé avec les mélanges préparés à base de 25 et 30% de caoutchouc, après la suppression de la surcharge.

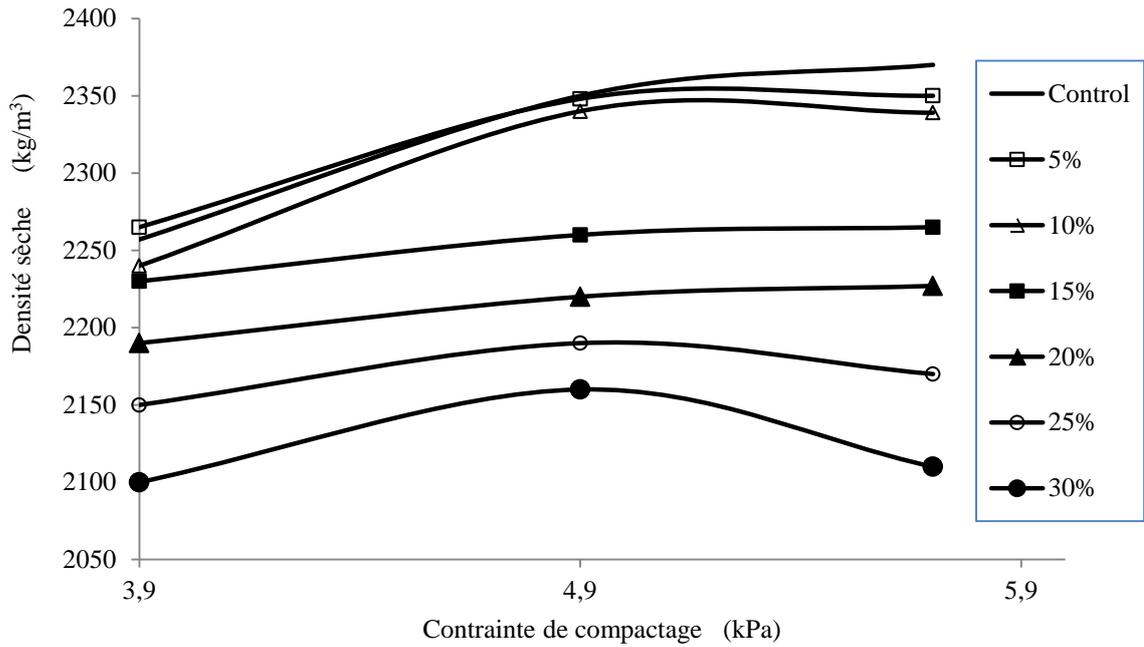


Fig. 5.21. Variation de la densité en fonction de la contrainte de compactage.

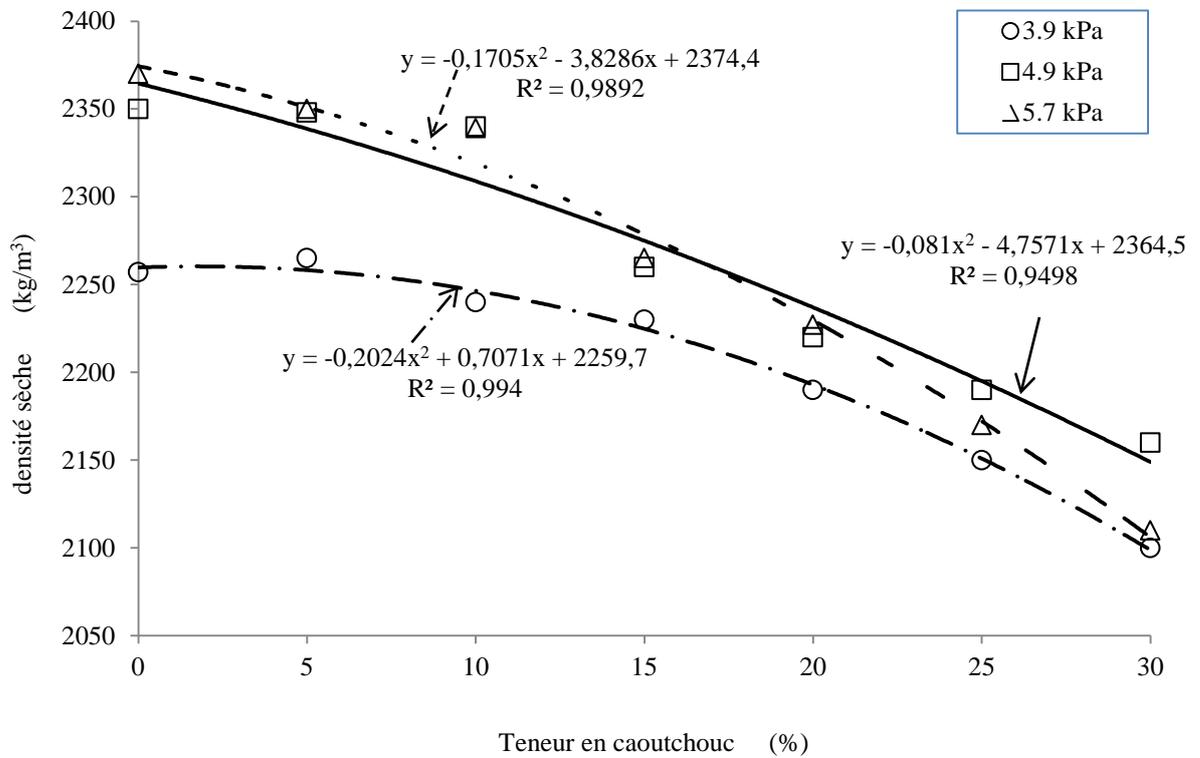


Fig. 5.22. Variation de la densité en fonction la teneur en caoutchouc.

5.3.2 Propriétés mécaniques

Les résultats de résistance en compression et en traction obtenus à 28 jours, sont présentés dans le [Tableau 5.4](#). On peut constater que la réponse mécanique du BCR est affectée, simultanément, par le dosage en caoutchouc utilisé et le niveau d'énergie de compactage appliquée. Les résultats obtenus montrent que les propriétés mécaniques diminuent avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc.

[Tableau 5.4](#). Résultats des résistances à 28 jours.

Mélange	Résistance (MPa)	
	compression	Traction par fendage
BCR _{-a}	26	2,65
BCR _{-b}	31,5	2,8
BCR _{-c}	31,7	2,83
BCR _{5-a}	25,2	2,6
BCR _{5-b}	28,1	2,74
BCR _{5-c}	28,2	2,78
BCR _{10-a}	24,8	2,35
BCR _{10-b}	27,7	2,47
BCR _{10-c}	27,5	2,48
BCR _{15-a}	23,3	2,15
BCR _{15-b}	23,8	2,24
BCR _{15-c}	23,7	2,23
BCR _{20-a}	22,3	2,1
BCR _{20-b}	22,5	2,175
BCR _{20-c}	22,3	2,16
BCR _{25-a}	23	2,15
BCR _{25-b}	22,4	2,145
BCR _{25-c}	21,5	2,1
BCR _{30-a}	23,6	2,16
BCR _{30-b}	20,9	2,13
BCR _{30-c}	19,5	2,05

Pour mieux faire ressortir l'effet combiné de l'énergie de compactage et le dosage en caoutchouc sur les propriétés mécaniques du BCR, les écarts relatifs de résistance ont été mesurés par rapport aux mélanges de référence (4,9 kPa), pour chacune des teneurs en caoutchouc. Les résultats obtenus pour la résistance en compression et en traction, sont présentés dans les histogrammes des [Figures 5.23](#) et [5.24](#), respectivement.

Il convient de noter, à partir de ces résultats, qu'il existe des réponses différentes en fonction de la teneur en caoutchouc et de l'énergie de compactage appliquée;

Lorsque la contrainte de compactage est de 3,9 kPa, et selon la teneur en caoutchouc, deux comportements sont observés.

- une diminution de la résistance des éprouvettes ayant des teneurs en caoutchouc entre 0 et 20%. La perte maximale enregistrée est donnée par le mélange de référence (sans caoutchouc); soit une chute de l'ordre de 17,5 et 5,36% de la résistance en compression et en traction, respectivement.
- une légère amélioration de la résistance des éprouvettes ayant des teneurs en caoutchouc relativement élevées (25 et 30%). A titre d'exemple, un accroissement de résistance de l'ordre de 3,3% et 1,4% en compression et en traction respectivement, est observé avec le mélange de 30% du caoutchouc;

Lorsque la contrainte de compactage est de 5,7 kPa, de légers accroissements de la réponse mécanique pour les mélanges ayant des teneurs en caoutchouc entre 0 et 10% et des diminutions pour les mélanges avec des teneurs en caoutchouc de plus de 15%, ont été observés. Des pertes maximales de 6,7 et de 3,8% en compression et en traction, respectivement, ont été obtenues pour le mélange contenant 30% de caoutchouc.

A partir des résultats obtenus, il convient de noter que le comportement du BCR au cours du compactage dépend simultanément de la teneur en caoutchouc et de l'énergie de compactage appliquée. Lors de la préparation des mélanges de BCR ayant des teneurs en caoutchouc de moins de 20%, il est avantageux d'appliquer une énergie de compactage supérieure ou égale à l'énergie de référence standardisée, pour éliminer tous les vides dans le mélange. Pour les mélanges ayant une teneur en caoutchouc relativement supérieure (25 et 30%), il est recommandé d'appliquer une énergie de compactage inférieure à l'énergie de référence standardisée en raison de la déformabilité des particules

de caoutchouc. Une partie importante de l'énergie de compactage est absorbée par les particules de caoutchouc au cours de sa compression, une fois la charge est retirée, les particules de caoutchouc décompressent en raison de leur caractère élastique.

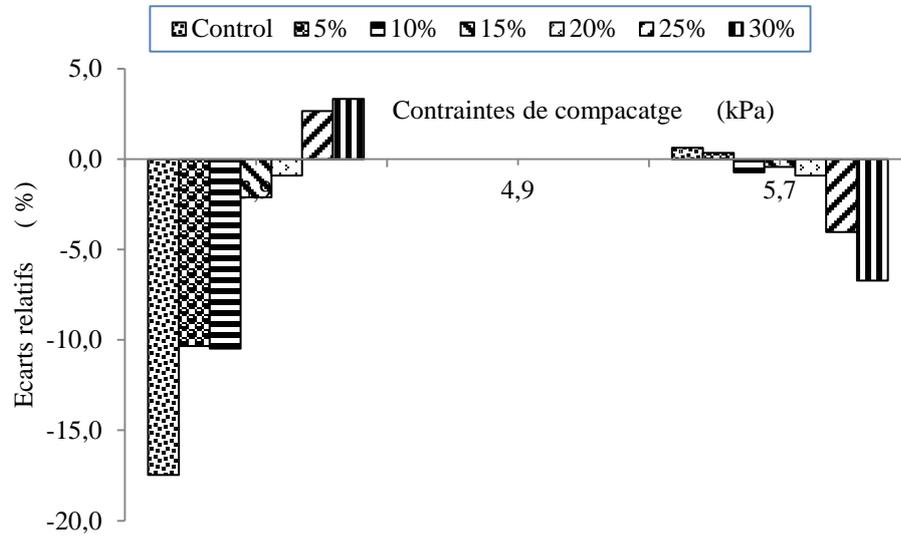


Fig. 5.23. Ecart relatif de la résistance en compression.

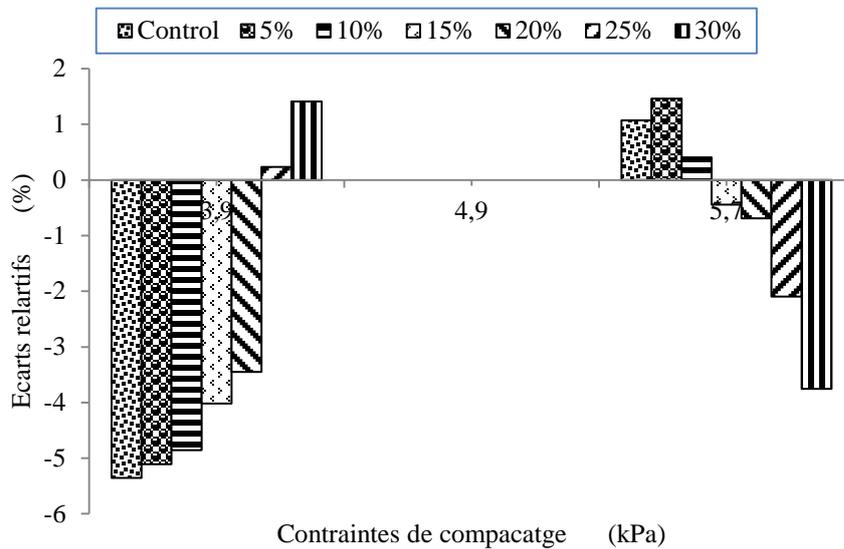


Fig. 5.24. Ecart relatif de la résistance en traction.

5.4 UTILISATION DE LA FUMÉE DE SILICE

L'objectif principal d'employer des ajouts cimentaires dans le BCR est l'amélioration de leurs propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Ils sont utilisés parfois pour des considérations économiques et environnementales. Au Canada, la majorité des projets routiers réalisés récemment sont fabriqués à base d'un ciment contenant de la fumée de silice. Dans cette section l'effet de l'incorporation des particules en caoutchouc, en présence de la fumée de silice avec 5% de remplacement partiel du ciment, est abordé. Les travaux de littérature indiquent que la quantité optimale de fumée de silice dans le BCR varie entre 5 et 10%. Considérant le coût élevé de la fumée de silice, ce produit est introduit dans notre BCR à un taux de 5%.

La résistance en compression a été évaluée à 28 jours sur des éprouvettes cubiques (100x100x100) mm. Celles-ci, ont été démoulées après 24 heures de leur préparation puis elles sont conservées dans l'eau.

La [Figure 5.25](#), illustre l'effet de la fumée de silice sur la maniabilité, qui est quantifiée en secondes. On peut constater que le temps nécessaire pour compacter le mélange est plus long en présence de la fumée de silice. A cause de sa grande finesse, les fumées de silice nécessitent une quantité d'eau plus grande que les ciments, ce qui conduit à réduire la quantité d'eau libre dans le mélange. Cette dernière a un rôle important durant le compactage par réduction du frottement intergranulaire facilitant ainsi l'opération de consolidation du mélange.

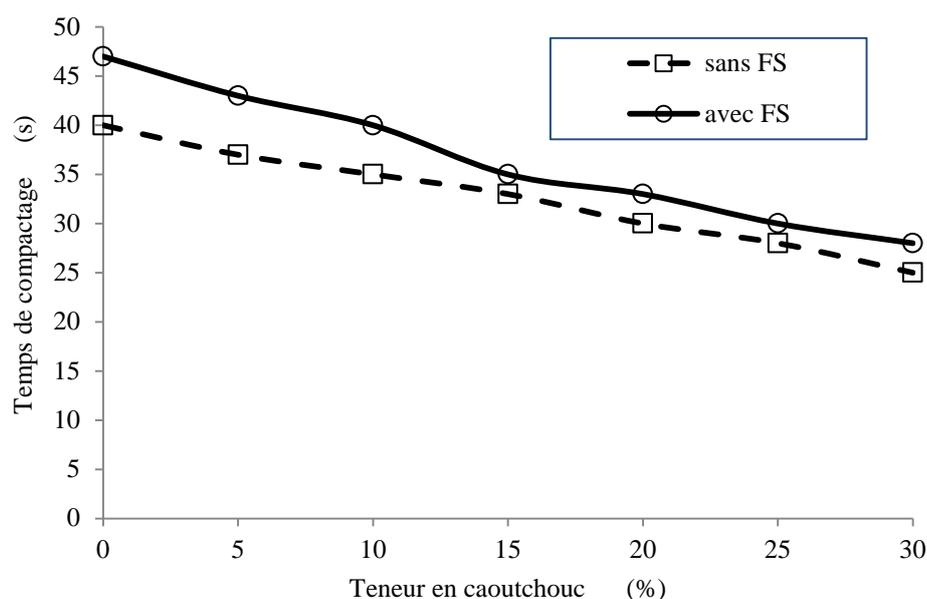


Fig. 5.25. Effet de la fumée de silice sur la maniabilité.

En présence de la fumée de silice une action mécanique plus élevée est nécessaire pour assurer un bon compactage du BCR. Il est clair que l'effet de la fumée de silice est moins remarquable avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Cela serait dû à l'effet inverse du caoutchouc, qui améliore la maniabilité.

Les résultats de résistance obtenus sont présentés dans les [Figures 5.26 à 5.27](#). La résistance en compression à 28 jours, atteint 42,17 MPa avec un ciment ordinaire, mais en présence de la fumée de silice, elle est proche de 50 MPa. Il est clair que la cinétique de développement de la résistance avec le temps est plus marquée en présence de la fumée de silice. Cette amélioration est due à la forte réactivité pouzzolannique de la fumée de silice. On peut remarquer également que pour les mélanges contenant le caoutchouc en quantités relativement élevées (25 et 30%), l'effet de la fumée de silice est moins significatif. L'amélioration de la résistance par la fumée de silice est due non seulement à sa réactivité, mais également à sa finesse. Les grains très fins des fumées de silices peuvent se positionner dans les vides créés par les particules de caoutchouc.

En plus des conclusions tirées de cette section, la comparaison des résultats de la [Figure 5.27](#) avec d'autres présentés dans la section (5.2.2.4) réalisés sur des éprouvettes cubiques de mêmes tailles, mais conservées dans des conditions de laboratoire, montre que celles-ci ont un effet considérable sur les propriétés du BCR.

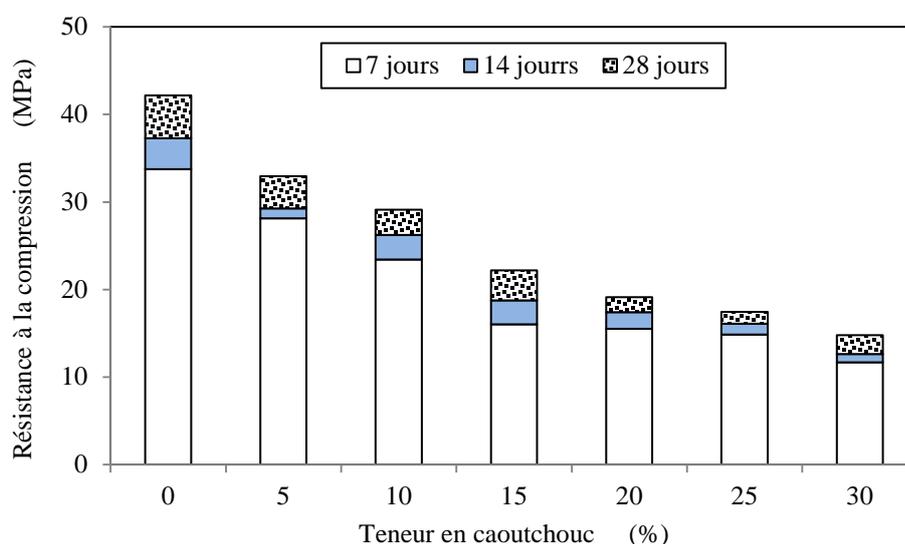


Fig. 5.26. Résistance en compression en fonction du dosage en caoutchouc, sans fumée de silice.

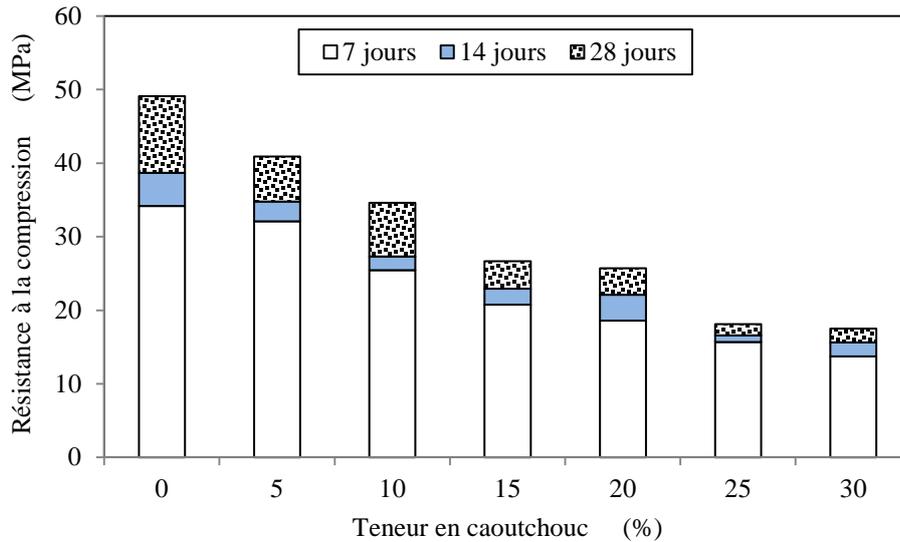


Fig. 5.27. Résistance en compression en fonction du dosage en caoutchouc, en présence de la fumée de silice.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du remplacement partiel du volume total de gravier d'un mélange de BCR routier par des granulats en caoutchouc. Le caoutchouc a été ajouté aux mélanges avec des dosages variant de 0 à 30%. Les résultats obtenus montrent que les propriétés du BCR ont été affectées suite à l'introduction du caoutchouc, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence du caoutchouc, le BCR est devenu plus léger, plus ouvrable, plus ductile, plus résistant à la fissuration et moins perméable. En contre part, l'incorporation du caoutchouc affecte négativement les propriétés mécaniques du BCR. La chute de résistance serait due à une faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment et à l'aspect déformable du caoutchouc.

Dans l'objectif de remédier au problème de l'insuffisance d'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment nous allons procéder à la recherche des solutions pour améliorer cette propriété. Le prochain chapitre présente une étude expérimentale sur l'amélioration de l'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment.

6 AMELIORATION DE L'INTERFACE CAOUTCHOUC-PÂTE DE CIMENT

6.1 INTRODUCTION

La chute de résistance associée à l'introduction du caoutchouc dans les mélanges de BCR peut limiter leur utilisation à grande échelle. Dans l'objectif d'étudier la possibilité de réduire l'impact négatif du caoutchouc sur la résistance, nous avons procédé à des tests en laboratoire pour remédier au problème de manque d'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. La démarche suivie consiste à employer deux techniques pour modifier la rugosité de la surface du caoutchouc.

La première méthode consiste à créer des perforations au niveau des surfaces du caoutchouc par un traitement avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Tandis que la deuxième procédure consiste à coller des grains de sable sur sa surface. Pour chacune de ces méthodes, l'effet de l'utilisation de la fumée de silice avec 5% de remplacement partiel, est également examiné. Dans tout ce qui suit la légende suivante sera utilisée :

CN : Caoutchouc naturel.

CT(NaOH) : Caoutchouc traité par NaOH.

CT(NaOH)+FS : Caoutchouc traité par NaOH, et le mélange contient de la fumée de silice.

CT(SC) : Caoutchouc traité par collage des grains de sable

CT(SC)+FS : Caoutchouc traité par du sable collé, et le mélange contient de la fumée de silice.

6.2 TRAITEMENT DU CAOUTCHOUC PAR LA SOUDE (NaOH)

6.2.1 Procédure expérimentale suivie

Les particules de caoutchouc ont été lavées avec de l'eau pour retirer les impuretés adhérentes. Par la suite, elles ont été séchées à l'air pendant 48 h à température ambiante.

Après le séchage, les particules de caoutchouc ont été immergées dans une solution de NaOH, à une concentration de 10% et une température de 25° C, pendant une période de 24 heures. Elles ont ensuite été lavées plusieurs fois pour éliminer les traces de NaOH restants sur leurs surfaces. Finalement, les granulats ont été séchés à une température ambiante pendant 48 heures.



Fig .6.1. Caoutchouc traité par la soude.

6.2.2 Résultats et interprétations

L'effet du traitement chimique du caoutchouc par le NaOH sur la résistance en compression à 14 jours et 28 jours, est illustré dans les [Figures 6.2](#) et [6.3](#), respectivement. On peut remarquer que la modification de la rugosité de la surface améliore de façon significative la résistance. A titre d'exemple, la résistance à 28 jours d'un mélange contenant 30% de caoutchouc traité a été améliorée de 28% par rapport au mélange

contenant le même volume de caoutchouc non traité. Les différentes améliorations enregistrées sont représentées dans le [Tableau 6.1](#).

Les résultats obtenus confirment bien, que l'adhérence insuffisante entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment est un facteur qui contribue à la réduction de la résistance. Ces observations sont en accord avec celles faites par [Segre & Joeques \(2000\)](#), qui ont effectué des essais sur un béton ordinaire contenant de la poudrette de caoutchouc traitée avec NaOH. Ils ont conclu que l'adhérence entre les particules de caoutchouc et pâte de ciment a été améliorée par le traitement chimique du caoutchouc.

En plus du traitement chimique du caoutchouc, l'incorporation de la fumée de silice avec 5% dans le BCR, améliore considérablement la résistance. Le gain de résistance en présence de la fumée de silice peut dépasser 50%, par rapport au mélange préparé à base de caoutchouc naturel seul.

Grâce à sa forte réactivité pouzzolanique, la fumée de silice permet de récupérer une partie importante de la chute de résistance. Cela, permet d'étendre les domaines d'exploitation des granulats en caoutchouc, en terme d'importance de projet, d'une part, et de valorisation du caoutchouc avec des quantités plus importantes, d'autre part. Les variations relatives enregistrées sont présentées dans le [Tableau 6.1](#).

Afin de mieux comprendre l'effet du traitement du caoutchouc par l'hydroxyde de sodium sur les propriétés de l'interface caoutchouc-pâte de ciment, des échantillons ont été observés au microscope électronique à balayage (MEB).

Sur les agrandissements effectués, l'effet du traitement du caoutchouc par l'hydroxyde de sodium est plus visible. L'interface caoutchouc-pâte de ciment est simplement une surface très marquée avec aspect lisse, dans le cas du caoutchouc brut ([Fig. 6.4](#)).

Tableau 6.1. Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression.

Teneur en caoutchouc (%)	10		20		30	
Age (jours)	14	28	14	28	14	28
CT(NaOH) ^(*)	12,39	5,40	14,94	16,75	14,99	28,73
CT(NaOH)_FS ^(*)	25,24	16,84	35,06	37,7	50,67	52,44

^(*) les écarts relatifs de résistance sont calculés par rapport aux mélanges contenant le caoutchouc naturel, exprimés en pourcentages.

La microscopie de la [Figure 6.5](#) illustrant le cas du caoutchouc traité, l'interface caoutchouc-pâte de ciment est moins marquée, il est même difficile, d'estimer exactement les limites des particules de caoutchouc. Cette interface n'est plus une surface lisse mais toute une zone d'interaction. L'hydroxyde de sodium a permis de créer des micro-perforations dans le caoutchouc donnant certaine rugosité, ce qui contribue à l'amélioration de l'adhérence.

En présence de la fumée de silice, les grains extrêmement fins peuvent s'intercaler dans les perforations créés par l'hydroxyde de sodium (NaOH) permettant de remplir les vides et d'augmenter l'adhérence avec la pâte de ciment.

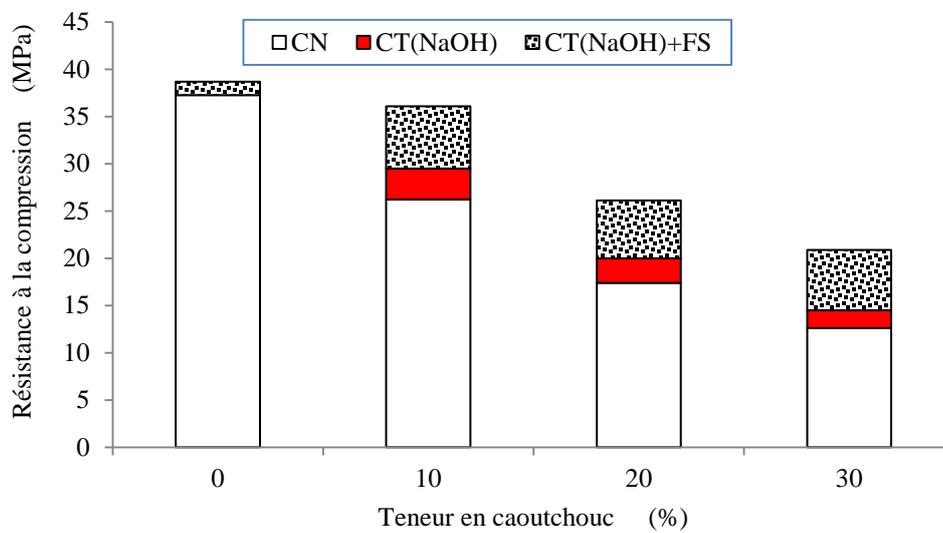


Fig. 6.2. Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression à 14 jours.

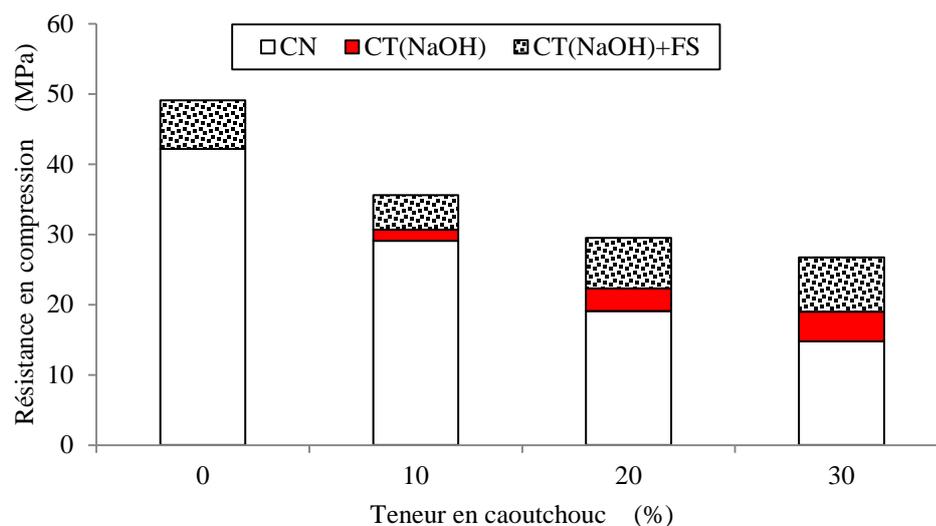


Fig. 6.3. Effet du traitement du caoutchouc par NaOH sur la résistance en compression à 28 jours.

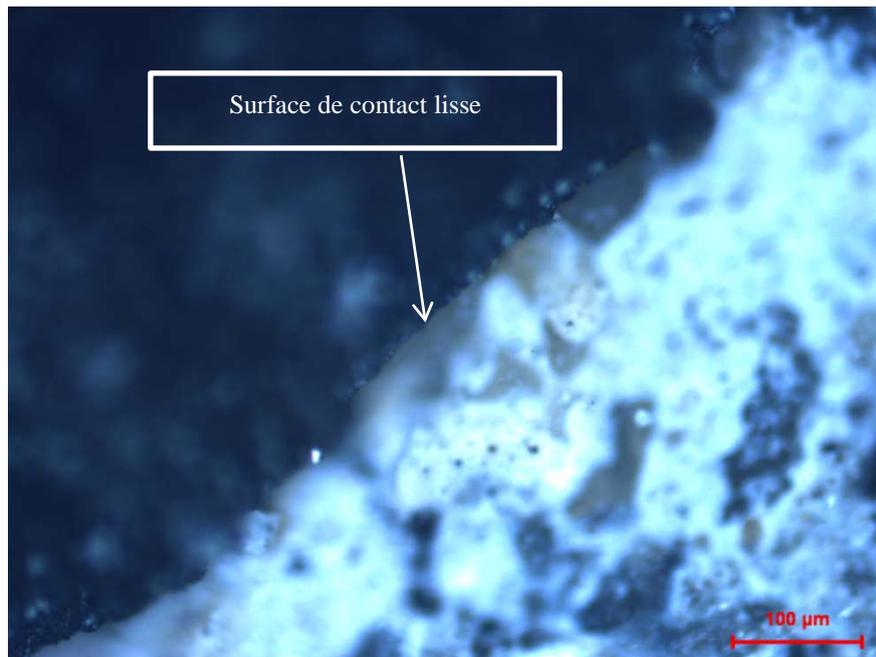


Fig .6.4. Etat de l'interface avant traitement.

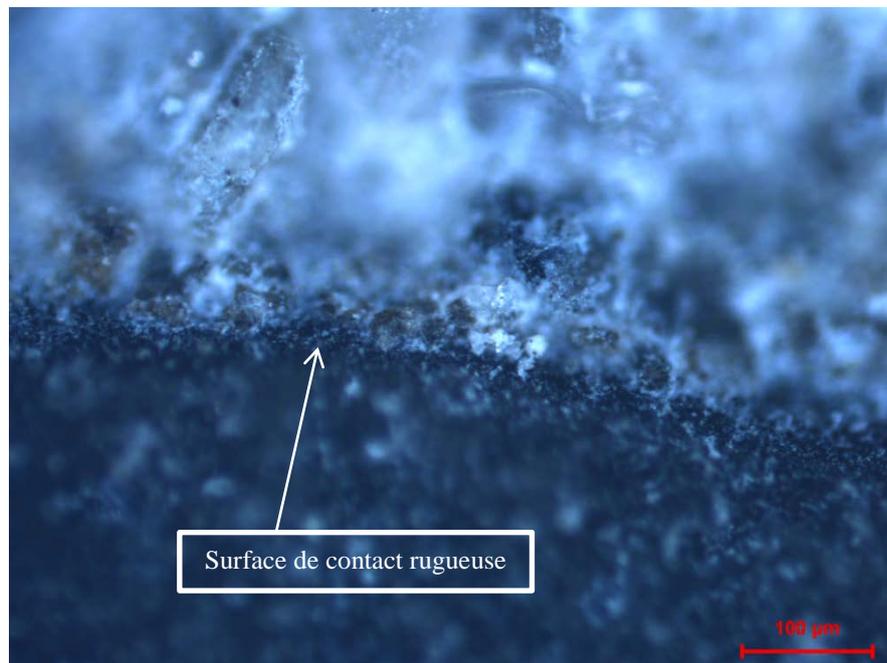


Fig .6.5. Etat de l'interface après traitement par NaOH.

6.3 MODIFICATION DE LA RUGOSITE DU CAOUTCHOUC PAR COLLAGE DES GRAINS DE SABLE

6.3.1 Procédure expérimentale suivie

Les particules de caoutchouc ont été lavées avec de l'eau pour enlever les impuretés adhérentes. Par la suite, elles ont été séchées à l'air pendant 48 h à température ambiante. Après le séchage, une résine (MEDAPOXY AL), produite par la société Granitex_ Alger) a été ajoutée régulièrement au caoutchouc à faibles quantités, associée à un malaxage rigoureux pendant 1 minute. Le durcisseur a été ajouté au mélange avec un rapport pondéral durcisseur/résine égal à 1/5, puis l'ensemble a été malaxé pendant 30 secondes. Le sable a été ensuite ajouté au mélange (Fig. 6.6).

Les particules de caoutchouc ont été laissées pendant 48 heures à une température ambiante, pour assurer le bon durcissement de la résine. On a alors procédé au tamisage de l'ensemble pour éliminer les grains de sable non liés. La Figure 6.7 illustre l'aspect du caoutchouc après le traitement.



Fig .6.6. Différentes étapes du traitement.



Fig. 6.7. Particules de caoutchouc après traitement.

6.3.2 Résultats et interprétations

Les [Figures 6.8](#) et [6.9](#) illustrent les résultats obtenus en faisant varier l'état de la rugosité des particules de caoutchouc par collage des grains de sables. On peut constater comment l'aspect rugueux des surfaces du caoutchouc améliore la résistance en compression à 14 et 28 jours. Les gains enregistrés sont donnés dans le [Tableau 6.1](#).

Pour certains mélanges le gain de résistance dépasse 60%, par rapport au mélange contenant la même quantité de caoutchouc brut. Il est clair que les améliorations sont plus marquées avec l'augmentation du taux de caoutchouc ajouté au mélange.

Les résultats obtenus sont en accord avec une étude publiée récemment ([Meddah et al. 2014b](#)), dans laquelle une amélioration de l'ordre de 28% est enregistrée dans la résistance en compression pour une teneur en caoutchouc de 25%.

Sur les mêmes Figures, on peut visualiser l'effet de l'utilisation de la fumée de silice dans les mélanges. La fumée de silice conduit à des résultats très satisfaisants, grâce à sa forte réactivité pouzzolanique. Le [Tableau 6.1](#) présente les différentes améliorations enregistrées avec la fumée de silice. Les résultats montrent des gains plus significatifs que ceux notés avec les mélanges préparés à base de ciment seul.

En effet, les grains de fumées de silice peuvent se positionner entre les grains de sables liés au caoutchouc, de par leur finesse. Ce mécanisme permet de remplir les vides créés par les grains de sables, d'une part, et d'améliorer l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte grâce à la forte réactivité des fumées de silice, d'autre part.

On peut voir sur la microscopie de la [Figure 6.10](#) comment les grains de sables entourent les surfaces de caoutchouc. La forte liaison créée entre ces grains et le caoutchouc permet d'avoir des particules assez rigides et de rendre leurs surfaces plus rugueuses.

Tableau 6.2. Effet du traitement du caoutchouc par le le sable-collé sur la résistance en compression.

Teneur en caoutchouc (%)	10		20		30	
Age (jours)	14	28	14	28	14	28
CT(SC)*	17,12	20,99	38,79	29,84	64,39	44,92
CT(SC)_FS*	21,27	31,34	65,17	76,02	100,95	90,38

(*) les écarts relatifs de résistance sont calculés par rapport aux mélanges contenant le caoutchouc naturel, exprimés en pourcentages.

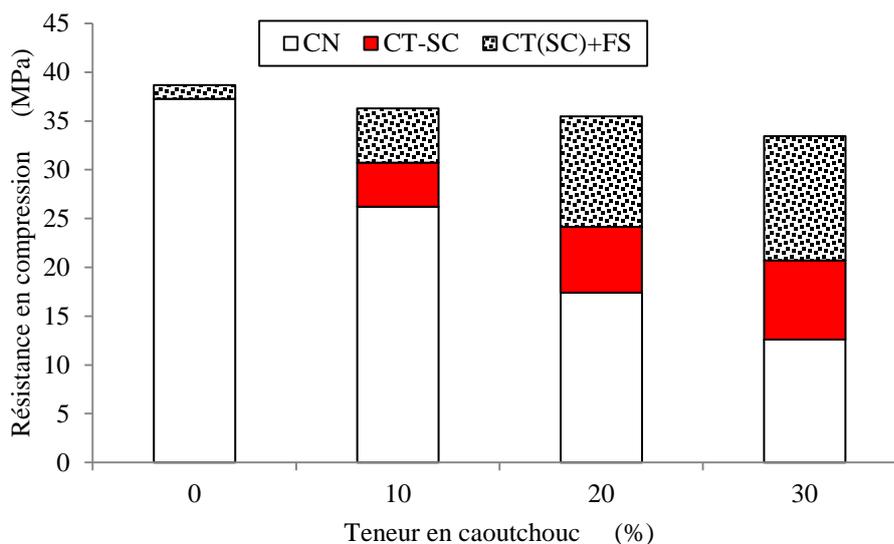


Fig. 6.8. Effet du traitement du caoutchouc par le sable collé sur la résistance en compression à 14 jours.

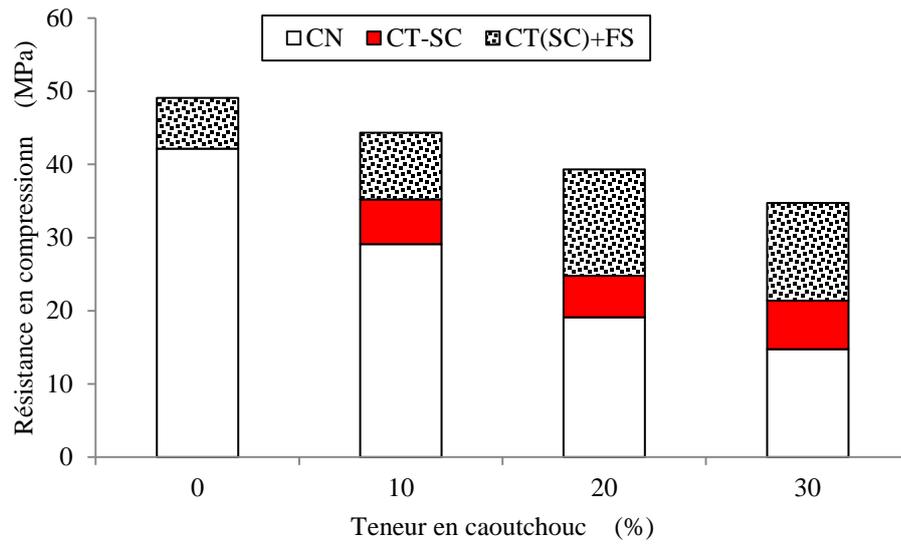


Fig. 6.9. Effet du traitement du caoutchouc par le sable collé sur la résistance en compression à 28 jours.

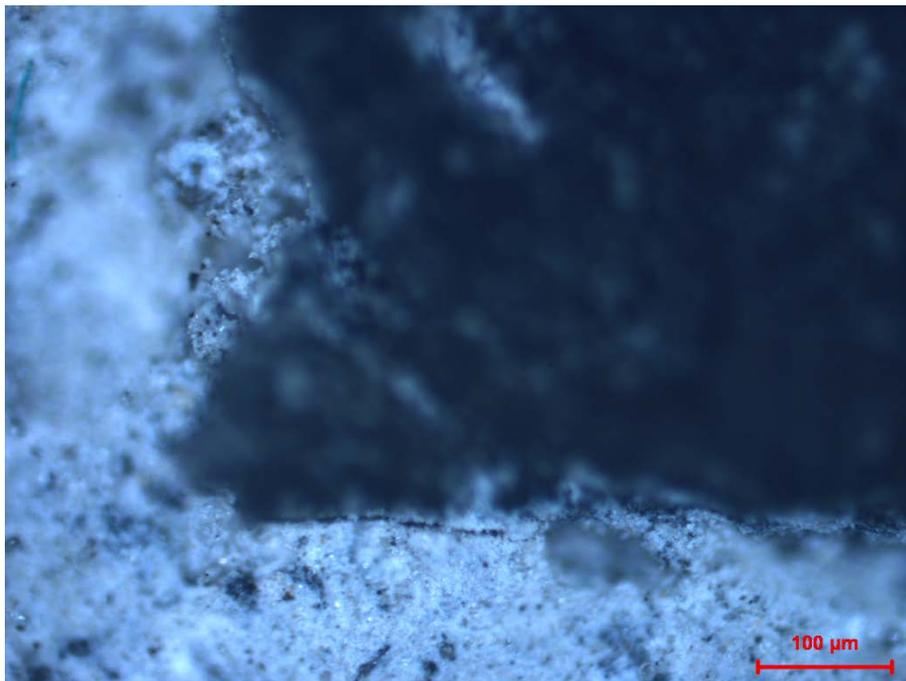


Fig. 6.10. Etat de l'interface après le collage des grains de sables.

6.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons procédé au traitement du caoutchouc dans le but d'améliorer la performance du BCR caoutchouteux. Deux procédures de traitement ont été utilisées ; la première consiste au traitement chimique du caoutchouc par la soude, tandis que la deuxième au collage des grains de sable sur la surface du caoutchouc en utilisant une résine.

Le traitement du caoutchouc a donné des résultats encourageants. La résistance a été améliorée de 28% dans le cas du traitement chimique et de 64% dans le cas du traitement mécanique, en comparaison au cas de l'utilisation du caoutchouc brut.

De plus, les résultats obtenus confirment que l'état de la rugosité et l'aspect déformable du caoutchouc sont les causes principales de la chute de résistance. En présence de la fumée de silice, qui est composée des sphères extrêmement fines, les améliorations sont encore plus marquantes (peuvent atteindre 100%). Grâce au traitement, une grande partie de la chute de résistance a été corrigée.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un matériau qui a deux approches, approche béton du point de vue de ses constituants et une approche sol du point de vue des procédures de mise en place et de compactage. Il est caractérisé principalement par son aspect sec, qui nécessite l'application d'une action mécanique, lors du compactage, plus élevée que celle utilisée pour un béton ordinaire. La phase de compactage in situ est réalisée couramment à l'aide des équipements de travaux publics (rouleaux compacteurs) En laboratoire, et vue la spécificité du BCR, des techniques particulières sont développées pour la production des éprouvettes d'essai.

La valorisation des déchets de caoutchouc dans les mélanges à base cimentaire, sous forme de granulats est considérée comme une solution intéressante sur les plans environnemental et économique. En effet, elle permet de réduire les impacts écologiques des déchets de caoutchouc sur l'environnement et la santé de l'être humain, d'une part, et de réduire les besoins en matière de granulats naturels, d'autre part.

De nombreuses recherches expérimentales citées dans la littérature ont été menées sur la faisabilité d'introduire des granulats de nature caoutchouteuse dans une matrice cimentaire. Beaucoup de ces études ont été réalisées sur des bétons ordinaires et les résultats obtenus n'ont pas été projetés sur les mélanges de BCR. En effet, les travaux sur la possibilité d'utiliser du caoutchouc dans le BCR sont très limités.

Dans la présente étude, la potentialité de produire des routes en BCR à base de granulats d'origine caoutchouteuse a été expérimentalement examinée en laboratoire, comme première approximation. Les granulats de caoutchouc sont incorporés aux mélanges de BCR, par substitution volumique d'une partie du volume total de graviers à différents pourcentages (5, 10, 15, 20, 25 et 30%).

Après l'identification des matériaux utilisés, et considérant que le compactage comme élément fondamental dans le processus de production du BCR, l'effet de sa qualité d'exécution sur la densité et les propriétés mécaniques, a été étudié. De ce fait, plusieurs facteurs liés au compactage ont été examinés, tels que le mode de compactage, l'énergie de compactage et le type de sable.

Une démarche expérimentale a été entreprise pour étudier l'influence du caoutchouc sur les propriétés du BCR. A l'état frais, nous avons étudié l'effet du

caoutchouc sur la densité et la maniabilité, tandis qu'à l'état durci, nous avons analysé l'effet du caoutchouc sur les propriétés mécaniques (résistance, module d'élasticité en compression) et le taux d'absorption par capillarité. De plus, nous avons étudié l'effet de la déformabilité des particules de caoutchouc sur les caractéristiques de compactage du BCR. A la fin de ce travail de thèse, nous avons procédé au traitement du caoutchouc afin d'améliorer leur performance dans le BCR.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés du BCR ont été affectées aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

A l'état frais, le remplacement partiel des granulats naturels par du caoutchouc réduit considérablement le temps de compactage, ce qui rend le mélange plus ouvrable, autrement dit, le caoutchouc facilite les conditions de mise œuvre (malaxage, transport et compactage). Pour un taux de 30% de remplacement partiel, le temps de compactage est réduit de 30%. En terme de densité, l'ajout du caoutchouc au BCR réduit sensiblement la densité du mélange.

A l'état durci, les résultats obtenus montrent que la résistance mécanique (en compression, en traction et en flexion) et le module d'élasticité en compression sont affectés par l'ajout du caoutchouc. Des réductions significatives de ces propriétés avec l'accroissement du taux de caoutchouc dans les mélanges, ont été enregistrées. Cependant, il faut noter que le BCR est devenu plus ductile en présence des particules de caoutchouc, qui contribuent également à empêcher le développement des fissures.

La comparaison du comportement du BCR avec le béton ordinaire, montre que le premier est moins sensible à l'ajout du caoutchouc que le deuxième. Cela est dû à l'effet de compactage qui permet de minimiser les vides créés par les particules de caoutchouc. En effet, des modèles théoriques ont été proposés pour suivre l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en caoutchouc. Ces modèles ont conduit à des simulations globalement satisfaisantes avec des écarts relatifs inférieurs à 2%, en comparaison avec les résultats expérimentaux.

L'étude des propriétés de compactage du BCR, a mis en évidence que le type de l'effort utilisé a un effet significatif sur la densité et la résistance. En effet, il est plus rentable d'utiliser un effort dynamique que statique pour assurer les meilleures performances du BCR. Cependant, il est important de signaler que l'énergie de

compactage appliquée doit être la plus proche possible de l'énergie de référence standardisée.

Par ailleurs, il a été observé que le compactage du mélange de BCR est encore plus difficile lorsqu'il est préparé à base d'un sable concassé, à cause de la forme irrégulière et allongée du sable concassé, en plus de l'aspect sec du BCR. De ce fait, l'utilisation du sable concassé nécessite peut être d'autres techniques pour assurer un bon serrage du squelette granulaire.

En présence du caoutchouc, et suite à son caractère élastique et sa déformabilité, une attention particulière doit être accordée à la phase de compactage notamment lorsque le taux d'incorporation est supérieur à 20%. En effet, il suffit d'appliquer seulement 80% de l'énergie de référence, pour assurer les meilleures performances en termes de densité et de résistance.

Le principal inconvénient lié à l'utilisation du caoutchouc dans le BCR, est la réduction des propriétés mécaniques, à cause de sa faible rigidité et également de la faible liaison caoutchouc-pâte de ciment. Il existe néanmoins, des avantages potentiels apportés par le caoutchouc. En effet, le BCR devient plus léger, plus ouvrable, plus ductile et plus résistant à la fissuration. De plus, le caoutchouc permet de réduire la porosité.

La chute de résistance du BCR est due à une mauvaise adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment, d'une part et à l'aspect déformable du caoutchouc, d'autre part. Pour remédier à ce problème, nous avons essayé de modifier l'état de la rugosité du caoutchouc. Deux procédures de traitement ont été utilisées ;

- le trempage des particules de caoutchouc dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), dans le but de créer des perforations sur les surfaces de caoutchouc.
- le collage des grains de sables, avec comme objectif rendre les surfaces plus rugueuses et rigidifier les particules.

En comparaison avec le caoutchouc brut, l'utilisation du caoutchouc traité dans les mélanges de BCR a conduit à des résultats encourageants. La résistance a été améliorée de 28% dans le cas du traitement par le NaOH et de 64% lorsque la rugosité du caoutchouc est modifiée par le sable-collé. Ces augmentations peuvent atteindre 52% et 100%, respectivement, si les mélanges contiennent de la fumée de silice à une teneur de 5%. Le traitement du caoutchouc contribue significativement à l'amélioration de

l'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment. Par ailleurs, les chutes de résistance ont pu être corrigées grâce au traitement.

Du point de vue environnemental, la valorisation du caoutchouc dans le BCR peut aider à éliminer une certaine quantité de déchets et en même temps à réduire les besoins en granulats naturels. Le BCR caoutchouté peut être utilisé pour certains projets tels que : les routes à faibles trafics, les routes rurales et les grandes surfaces pour piétons. Cependant, la teneur optimale du caoutchouc à utiliser dépend des exigences techniques et de la destination du projet.

- **PERSPECTIVES**

Cette recherche présente le BCR en caoutchouc comme une nouvelle application qui respecte l'environnement. Les premiers résultats obtenus sur ce matériau sont encourageants. Cependant, les mécanismes fondamentaux qui gèrent le comportement du BCR, en présence et en l'absence du caoutchouc, nécessitent la réalisation d'autres travaux aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental.

Le principal inconvénient lié à l'introduction du caoutchouc dans le BCR est la réduction des propriétés mécaniques suite à une mauvaise adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment. De ce fait, il est important d'étudier la relation interfaciale entre ces deux composants et de rechercher d'autres techniques pour améliorer la performance du BCR en caoutchouc.

Par ailleurs, il est recommandé également de réaliser une étude approfondie sur les effets des ajouts cimentaires locaux et moins coûteux que la fumée de silice sur le comportement du BCR en présence et en l'absence du caoutchouc. De plus, une autre perspective consiste à étudier l'effet des sollicitations d'ordre thermique sur le comportement du BCR en présence du caoutchouc.

Finalement, pour mettre en pratique les résultats obtenus dans cette étude, il est fortement recommandé de réaliser des routes expérimentales à grande échelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abraham, E. et al., 2011. Recent advances in the recycling of rubber waste. Recent Developments in Polymer Recycling, Transworld Research Network, Kerala, India.
- ACI Comimittee 325, 2001. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001). ACI Materials Journal, (Reapproved).
- ACI committee 207, 1999. Roller-Compacted Mass Concrete. ACI 207.5R-99. ACI Materials Journal, 85(5).
- ACI116, 1967. Cement and Concrete Terminology, ACI 116. ACI Special Publication, 19.
- Ademe, 2012. Bilan du Recyclage 2001 - 2010 volume 2 : Filières Matériaux et Filières REP Rapport Final,
- Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Felieu, M., Hernandez, M., 2005. Influence of Scrap Rubber Addition to Portland I Concrete Composites: Destructive and Non-Destructive Testing. Composite Structures, 71(3-4), pp.439–446.
- Ali, N., Amos, A. & Roberts, M., 2000. Use of Ground Rubber Tires In Portland Cement Concrete. In Proceedings of the international conference on concrete (Vol. 390). London, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd.
- Aliapure, 2010. Le taux résiduel de fils métalliques dans les granulats. Rapport.
- ASTM C1170, 2008. Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, C1170/C1170M-08. , pp.1–5.
- ASTM C1176, 2008. Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table, C1176/C1176M-08. , pp.1–4.
- ASTM C1435, 2008. Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, C1435/C1435M-08. , pp.1–5.
- ASTM C39, 2011. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, C39/C39M-11a. , pp.1–7.
- ASTM C469, 2011. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete, C469-02. , 03(C), pp.1–5.
- ASTM C496, 2011. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, C496/C496M-11. , (C), pp.1–5.
- ASTM D1557, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³(2,700 kN-m/m³)), D1557-07. , pp.1–13.

- BaCaRa, 1996. *Le Béton Compacté au Rouleau : les Barrages en BCR : Projet National BaCaRa 1988-1995*, Paris: Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Batayneh, M.K., Marie, I. & Asi, I., 2008. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Waste Management*, 28(11), pp.2171–2176.
- Berga, L., Buil, J. Jofre, C., Chongand, S., 2003. Roller Compacted Concrete Dams. In *Proceedings of the fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) dams*, November 2003.
- Boudaoud, Z. & Beddar, M., 2012. Effects of Recycled Tires Rubber Aggregates on the Characteristics of Cement Concrete. *Open Journal of Civil Engineering*, 02(04), pp.193–197.
- De Brito, J. & Saikia, N., 2013. *Recycled Aggregate in Concrete*. In *Green Energy and Technology*. London: Springer London.
- Casias, T., Goldsmith, V. & Benavidez, A., 1988. Soil laboratory compaction methods applied to RCC. In *ASCE Specialty Conference on Roller Compacted Concrete*. San Diego, California, USA.
- Choi, Y.-K. & Hansen, K.D., 2005. RCC/Soil-Cement: What's the Difference? *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), pp.371–378.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimre, R., 2009. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), pp.3382–3387.
- Edeskär, T., 2006. *Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications Technical and Environmental Properties*. Phd Thesis. Lulea University of Technology. Sweden
- Eldin NN & Senouci, A., 1994. Rubber-Tire Particles As Concrete Aggregates. , *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), pp.478–496.
- Emiroglu, M., Kelestemur, M. & Yildiz, S., 2007. An Investigation on ITZ Microstructure of the Concrete Containing Waste Vehicle Tire. In *8th international fracture Conference*. Istanbul, Turkey, pp. 453–459.
- Faten, S., 2010. *Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : Application au recyclage des déchets pneumatiques*. Thèse de doctorat. Université du Maine.
- Fattuhi, N.I. & Clark, L. a., 1996. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials*, 10(4), pp.229–236.
- Flores-Medina, D., Flores Medina, N. & Hernández-Olivares, F., 2013. Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes. *Materials and Structures*, 47(7), pp.1185–1193.

- Ganjian, E., Khorami, M. & Maghsoudi, A.A., 2009. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), pp.1828–1836.
- Garrick, G.M., 2005. Analysis and Testing of Waste Tire Fiber Modified Concrete. Master Thesis, Louisiana State University.
- Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTO). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- GHRIB, A., KETTAB, MR. BALI, A. 2014. Stabilization and utilisation of dune sand in road engineering. *Arabian Journal for Science and Engineering* ISSN 1319-8025 Volume 39 pp1517-1529. DOI 10.1007/s13369-012-0305.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. & Özturan, T., 2004. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12), pp.2309–2317.
- Hansen, K. & Reinhardt, W., 1991. *Roller-Compacted Concrete Dams*, McGraw Hill, Inc. New York, USA
- Harrington, D. et al., 2010. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report, National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University
- HO anh, C., 2010. Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface. Thèse de doctorat. Insa de Toulouse. (France).
- Jingfu, K., Chuncui, H. & Zhenli, Z., 2008. Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives. *Materials and Structures*, 42(8), pp.1117–1124.
- Khaloo, A.R., Dehestani, M. & Rahmatabadi, P., 2008. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire – rubber particles. *Waste Management*, 28(12), pp.2472–2482.
- Khatib, Z.K. & Bayomy, F.M., 1999. Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(3), pp.206–213.
- KETTAB, R., BALI, A. 2004. Modified bituminous concrete using a rubber powder. Mukesh C. Limbachiya, JJ Roberts- Technology & Engineering - 336 pages. ISBN: 0727732862
- Kokubu, K., Cabrera, J.. & Ueno, A., 1996. Compaction Properties of Roller Compacted Concrete. *Journal of Cement and Concrete Composites*, 9465(95), pp.109–117.
- KETTAB R.; BALI A; BRARA A. 2004. Modified bituminous concrete using a rubber powder. International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling Challenge and Opportunities du 14 au 15 September 2004 Londres.

- Ludwig, D., Nanni, A. & Shoenberger, J.E., 1994. Application Of Roller-Compacted Concrete (Rcc) Technology To Roadway Paving. Productivity Advancement Research (CPAR) Program (No. WES/TR/GL-94-1). Army engineer waterways experiment station vicksburg ms geotechnical lab,
- Marchand, J. et al., 1997. Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete. A Review, Concrete Technology Special Publication, 171.
- Meddah, A., Beddar, M. & Bali, A., 2014a. Experimental study of compaction quality for roller compacted concrete pavement containing rubber tire wastes. In Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management. CRC Press, pp. 273–278.
- Meddah, A., Beddar, M. & Bali, A., 2014b. Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 72, pp.187–192.
- Naik, B.T.R. & Singh, S.S., 1991. Utilization of discarded tires as transportation facilities. Report N. CBU-1991-02,
- Nanni, A. & Meamarian, N., 1993. Laboratory Consolidation Methods Applied to Compacted Concrete for Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(1), pp.137–143.
- Nehdi, M. & Khan, A., 2001. Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 2(1), pp.3–10.
- Neville, A., 2000. *Propriétés des bétons*, Edition Eyrolles.
- Oikonomou, N. & Mavridou, S., 2009. *The use of waste tyre rubber in civil engineering works*, WoodHead Publishing Limited.
- Ouellet, É., 1998. *Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau*. Université de Laval.
- Pittman, D.W., 1989. The effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements.,
- Pouliot, N., 2001. Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. *Bulletin de LPC*, Réf. 4370, pp.23–36.
- Raghavan, D., Huynh, H. & Ferraris, C., 1988. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. *Journal of Materials Science*, 33, pp.1745–1752.
- Segre, N. & Joekes, I., 2000. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30(9), pp.1421–1425.

- Serne, R.A., 1997. Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada. In International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA.
- Shihata, S.A., 2000. Strength and Density of Laboratory-Prepared RCC Specimens: Effect of Compaction Procedure. *Cement, Concrete and Aggregates*, 22(1).
- Siddique, R. & Naik, T.R., 2004. Properties of concrete containing scrap-tire rubber--an overview. *Waste management (New York, N.Y.)*, 24(6), pp.563–9.
- Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, M., Justyna, Janik, H., Balas, A., 2012. Progress in used tyres management in the European Union: a review. *Waste management (New York, N.Y.)*, 32(10), pp.1742–51.
- Skripkiūnas, G., Grinys, A. & Černius, B., 2007. Deformation properties of concrete with rubber waste additives. *Materials science*, 13, pp.219–223.
- Srinivasan, A., Shanmugharaj, A.M. & Bhowmick, A.K., 2007. 38 Waste Rubber Recycling. In pp. 1047–1070.
- Tayabji, S.D. & Okamoto, P.A., 1987. Engineering Properties of Roller-Compacted Concrete. *Transportation Research Record, Journal of transportation research Board of the National Academies, Washington, DC.*, N°. 1136, p. 33-45.
- Topçu, I.B., 1995. The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(2), pp.304–310.
- Torgal, F.P., Shasavandi, A. & Jalali, S., 2011. Tyre rubber wastes based concrete : a review .Conference paper.
- Tremblay, S., 1997. Méteodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraineur D'air Sur La Maniabilité. Université de Laval.
- Trouzine, H. et al., 2011. Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. *Revue «Nature & Technologie»*. n, 29, p.29.
- USACE, 2000. Engineering and Design, Roller Compacted Concrete. Engineer Manual No 1110-2-2006,
- Vahedifard, F., Nili, M. & Meehan, C.L., 2010. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), pp.2528–2535.
- Yilmaz, A. & Degirmenci, N., 2009. Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials. *Waste Management*, 29(5), 1541-1546.
- Zdiri, M., 2008. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de

gisements locaux. Thèse Co-tutelle entre l'Ecole Nationale d'Ingénieur (Tunisie) et l'Université d'Artois (France).

Zdiri, M. et al., 2009. Prediction and Measurement of the Bending Strength of the RCC. *International Journal of Concrete Structures and Materials.*, 3(01), pp.57–61.

Zdiri, M. et al., 2010. Study of the Anisotropy of the Roller Compacted Concrete (RCC) for Pavement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 4(1), pp.45–49.