



# Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE MASTER

**Filière : GENIE CIVIL**  
**Option : MATERIAUX**

THÈME :

Amélioration de performance d'un béton compacté au  
rouleau routier contenant des particules en polymère

Préparé par : - Bensaci Hamza  
- Mébarkia Yacine

Soutenu le : 22/06/2014

Devant le jury :

**Président : ATTIA Abdelkader**  
**Rapporteur : MEDDAH Abdelaziz**  
**Examineur : BELAGRAA Larbi**  
**Examineur : BENAICHI Lhadj**  
**Examineur : BEDDAR Miloud**

**Année Universitaire 2013-2014**

# Remerciement

## RESUME

Cette étude traite le comportement d'un béton compacté au rouleau (BCR) confectionné à partir des agrégats en polymère. Les particules de caoutchouc ont été ajoutées aux mélanges par substitution d'une partie de volume total des agrégats minéraux ; 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30%. Une revue générale sur le BCR et la valorisation des déchets pneumatiques est d'abord présentée, dans la partie bibliographique. La partie expérimentale de l'étude comporte une phase d'identification des paramètres physico-mécaniques des matériaux employés avec leur méthode d'évaluation, puis une phase de caractérisation de BCR caoutchouté.

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

## Sommaire

Résumé.....	i
Introduction générale.....	1
1. INTRODUCTION.....	3
2. HISTORIQUE.....	3
3. APPLICATIONS .....	5
4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BCR.....	5
4.1. Avantages .....	5
4.2. Les inconvénients du BCR.....	6
5. SELECTION DES MATERIAUX.....	7
5.1. Les liants .....	7
5.2. Les granulats .....	7
5.3. L'eau .....	9
5.4. Adjuvants .....	9
6. PRODUCTION ET MISE EN PLACE.....	9
6.1. Production .....	9
6.1.1. Les centrales fixes .....	10
6.1.2. Les centrales mobiles .....	11
6.2. TRANSPORT.....	12
6.3. Mise en place.....	13
7. COMPACTAGE DU BCR.....	15
7.1. Matériels de compactage.....	15
7.2. OPERATION .....	15
8. FORMULATION DE BCR .....	17
8.1. METHODES EMPIRIQUES .....	17
8.1.1. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité.....	18
8.1.2. Méthode de formulation selon des principes de géotechnique .....	19
8.2. Méthode semi-empirique.....	20
8.3. Méthode théorique : [3.12].....	23
1. INTRODUCTION.....	24
2. DIFFERENTS TYPES DE DECHETS.....	24
2.1. Déchets inertes .....	24
2.2. Déchets banals.....	25
2.3. Déchets dangereux .....	25
3. DEFINITION DU CAOUTCHOUC.....	25
3.1. Le caoutchouc naturel .....	26
3.2. Le caoutchouc synthétique .....	26

4. LES PNEUMATIQUES.....	27
5. PROBLEMATIQUE DES PNEUS .....	29
6. RISQUES POTENTIELS POUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT .....	30
7. FILIERES DE VALORISATION.....	31
7.1. Le rechapage .....	31
7.2. Valorisation énergétique .....	32
7.3. La valorisation sous forme de matières premières .....	32
8. EMPLOI EN DOMAINE GENIE CIVIL .....	34
8.1. Le tapis de pneus anti-vibration .....	34
8.2. La construction de récifs artificiels .....	34
8.3. Mur antibruit .....	34
8.4. Le Pneu sol.....	34
9. VALORISATION DES DECHETS PNEUMATIQUES DANS LES BETONS ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
ET LES MORTIERS.....	36
10. CONCLUSION .....	37
1. INTRODUCTION.....	38
2. LES GRANULATS : .....	38
2.1. Le sable .....	38
2.1.1. Equivalent de sable.....	38
2.1.2. La masse volumique.....	41
2.1.3. LA POROSITE ET LA COMPACTE ET L'INDICE DE VIDE (NF P18-554) .....	42
2.1.4. Analyse granulométrique (NF18 304).....	43
2.1.5. Module de finesse : .....	44
2.2. Le gravier .....	45
2.2.1. La masse volumique du gravier .....	45
2.2.2. Degré d'absorption d'eau (NF P18-555) :.....	47
2.2.3. LA POROSITE ET LA COMPACTE ET L'INDICE DE VIDE NF P18-554.....	47
2.2.4. Analyse granulométrique .....	48
3. CARACTERISTIQUES DU CIMENT UTILISE.....	51
3.1. Présentation du ciment AIN EL KEBIRA .....	51
3.2. Domaines d'utilisation .....	52
3.3. Analyses et caractérisation :.....	52
4. LES ADJUVANTS .....	53
4.1. Le MEDAPLAST HP.....	54
4.1.1. Description .....	54
4.1.2. Propriétés.....	54
1. INTRODUCTION.....	55
2. FORMULATION ADOPTEE.....	55

2.1. Les paramètres.....	55
2.2. Données de l'essai Proctor modifié.....	56
2.3. L'optimum Proctor.....	56
2.4. La courbe combinée.....	57
2.5. Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc dans un (m3).....	57
3. PROGRAMME EXPERIMENTAL REALISE.....	58
4. LE MALAXAGE ET METHODE DE COMPACTAGE.....	60
5. PROCEDURES D'ESSAIS SUIVIES.....	60
5.1. Essais sur le béton frais.....	60
5.1.1. Maniabilité (ouvrabilité) de béton.....	60
5.1.2. La masse volumique.....	61
5.2. Essais sur le béton durci.....	61
5.2.1. Résistance à la compression.....	61
5.2.2. Résistance à la traction.....	62
5.2.3. Mesure du retrait : [NF P15-433].....	63
1. INTRODUCTION.....	65
2. EFFET DE CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DE BCR.....	65
2.1. A l'état frais.....	65
2.1.1. La masse volumique.....	65
2.1.2. La Maniabilité (Temps de compactage).....	66
2.2. Les résultats à l'état durci.....	67
2.2.1. La résistance à la compression.....	67
2.2.2. La résistance à la flexion.....	73
2.2.3. Retrait.....	79
3. AMILIORATION DE L'ULILISATION DE FUMEE DE SILICE.....	80
4. LES TRAITEMENTS.....	82
4.1. Traitement par la résine.....	82
4.1.1. L'opération.....	83
4.1.2. Les résultat à la Compression.....	85
4.1.3. Les résultats à la flexion.....	90
4.2. Traitement par NaOH.....	93
4.2.1. L'opération.....	93
4.2.2. Les résultats à la Compression.....	94
4.2.3. Les résultats à la Flexion.....	99
5. COMPARAISON FINAL.....	102
5.1. La compression.....	102
5.2. La flexion.....	103
Conclusions générales.....	115

## LISTE DES FIGURES

### *Chapitre I : le béton compacté au rouleau*

<b>Figure 1:</b> Centrales à Béton Compactes » Elkomix-25 Quick Master [ 17] .....	11
<b>Figure 2 :</b> Les centrales de béton mobile-[ 16] .....	12
<b>Figure 3 :</b> Schéma type d'une centrale mobile. [ 3] .....	12
<b>Figure 4:</b> Le camion à benne basculante [ 18] .....	13
<b>Figure 5:</b> Aire de stationnement et de transit des remorques Saint-Léonard [21] .....	13
Figure 6: couche de BCR à la sortie du finisseur.....	14
<b>Figure 7:</b> Répandage l'aide de raclettes. ....	14
Figure 8: rouleaux-compresseurs-compacteurs-tandems .....	15
Figure 9 : Rouleau vibrant mono roue d'acier à pneus lisses .....	15
Figure 10: Rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses.....	16
Figure 11: Paramètres optimum d'un mortier pour BCR. [ 3].....	18
Figure 12: Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné). [ 3].....	19
Figure 13: Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR. .20	
Figure 14: Relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport $V_p/V_{vc}$ pour des mélanges de BCR sans air entraîné rapport eau/liant < 0,50. ....	22

### *Chapitre II : la valorisation du déchet pneumatique*

Figure 1: Latex naturel [41].....	26
Figure 2: Pneumatiques usagés [30].....	27
Figure 3 : Coupe transversale d'un pneu Michelin [42].....	29
Figure 4: Fumées toxiques qui se dégagent en brûlant des pneus. [32].....	31
Figure 5 : Rechapage des pneus usagés [25].....	32
Figure 6: Broyages des pneus usagés [25]. ....	32
Figure 7: Aspect des déchets de caoutchouc. [35] .....	33
Figure 8: le pneu sol [42].....	35
Figure 9: Applications de résidus de vieux pneus entiers : a)stabilisation de talus,b) protection érosion de berges, c) protection côtière .....	35
Figure 10: Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression. [35] .....	36
Figure 11: Effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion [35].....	36
Figure 12 : Effet du caoutchouc sur la densité. [37] .....	37

### *Chapitre III : Caractérisation des matériaux*

Figure 1: La courbe granulométrique de sable. ....	44
Figure 2: les courbes granulométriques des graviers. ....	50
Figure 3: La courbe granulométrique de caoutchouc. ....	51

### *Chapitre IV : formulation du BCR*

Figure 1: la courbe combinée.....	57
Figure 2: Principe de la Méthode de Vibro-compactage. ....	60
Figure 3: éprouvette cubique placée entre les plateaux d'une presse hydraulique .....	61
Figure 4: Essais de flexion 4 points.....	63
Figure 5: dispositif utilisé pour l'essai retrait .....	63

## Chapitre V : les résultats et interprétation

Figure 1: <i>Variation de la densité en fonction de caoutchouc.</i> .....	65
Figure 36: <i>Variation du temps de compactage de BCR.</i> .....	67
<b>Figure 37:</b> <i>Résistance à la compression du BCR avec 5% fumée de silice</i> .....	71
Figure 38: <i>Résistance à la compression du BCR à 7 jours.</i> .....	71
Figure 39: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours.</i> .....	71
Figure 40 : <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours.</i> .....	72
Figure 41: <i>Résistance à la flexion du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc.</i> .....	73
Figure 42: <i>Résistance à la flexion du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc et 5% fumée de silice</i> .....	74
Figure 43: <i>Résistance à la flexion du BCR à 7 jours</i> .....	75
<b>Figure 44:</b> <i>Résistance à la flexion du BCR à 14 jours</i> .....	75
Figure 45: <i>Résistance à la flexion du BCR à 28 jours</i> .....	75
Figure 46: <i>L'état de rupture de chaque pourcentage de caoutchouc</i> .....	78
Figure 47: <i>retrait du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc</i> .....	79
Figure 48: <i>Variation de la densité du BCR avec l'ajout de 5% fumée de silice en fonction de E/C.</i> .....	80
<b>Figure 49:</b> <i>Résistance à la compression du BCR avec l'ajout de 5% fumée de silice à 28 jours</i> .....	81
<b>Figure 50:</b> <i>mélange la résine avec le caoutchouc</i> .....	83
<b>Figure 51:</b> <i>mélange le durcisseur avec le caoutchouc et la résine</i> .....	83
Figure 52: <i>mélanger l'ensemble</i> .....	84
Figure 53: <i>le caoutchouc va reposer.</i> .....	84
Figure 54: <i>le caoutchouc après 24 heures.</i> .....	84
<b>Figure 55:</b> <b>Résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par la résine</b> .....	86
Figure 56: <i>Résistance à la compression du BCR avec 5% fumée de silice en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par la résine</i> .....	87
Figure 57: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours</i> .....	87
Figure 58: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours</i> .....	87
Figure 59: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours.</i> .....	88
Figure 60: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours</i> .....	88
Figure 61: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours</i> .....	88
Figure 62: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours.</i> .....	89
Figure 63: <i>Résistance à la flexion du BCR.</i> .....	90
Figure 64: <i>Résistance à la flexion du BCR à 7 jours.</i> .....	91
Figure 65: <i>Résistance à la flexion du BCR à 14 jours.</i> .....	91
Figure 66: <i>Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.</i> .....	91
Figure 67: <i>Résistance à la flexion du BCR à 7 jours</i> .....	92
Figure 68: <i>Résistance à la flexion du BCR à 14 jours</i> .....	92
Figure 69: <i>Résistance à la flexion du BCR à 28jours.</i> .....	92
Figure 70: <i>Caoutchouc traité par NaOH</i> .....	94
Figure 71: <i>Résistance à la compression du BCR en fonction de caoutchouc traité par NaOH</i> .....	95
Figure 72: <i>Résistance à la compression du BCR en fonction de caoutchouc traité par NaOH et 5% fumée de silice</i> .....	96
Figure 73: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours.</i> .....	96
Figure 74: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours.</i> .....	96
Figure 75: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours.</i> .....	97
Figure 76: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours.</i> .....	97
Figure 77: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours.</i> .....	97
Figure 78: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours.</i> .....	98
Figure 79: <i>Résistance à la flexion du BCR.</i> .....	99
Figure 80: <i>Résistance à la flexion du BCR à 7 jours.</i> .....	100



---

Figure 81: <i>Résistance à la flexion du BCR à 14 jours.</i> .....	100
Figure 82: <i>Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.</i> .....	100
Figure 83: <i>Résistance à la flexion du BCR à 7 jours.</i> .....	101
Figure 84: <i>Résistance à la flexion du BCR à 14 jours.</i> .....	101
Figure 85: <i>Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.</i> .....	101
Figure 86: <i>Résistance à la compression du BCR à 14 jours en fonction de mode de traitement.</i> ....	102
Figure 87: <i>Résistance à la compression du BCR à 28 jours en fonction de mode de traitement.</i> ....	103
Figure 88 : <i>Résistance à la flexion du BCR à 7 jours en fonction de mode de traitement.</i> .....	103
Figure 89: <i>Résistance à la flexion du BCR à 14 jours en fonction de mode de traitement.</i> .....	104
Figure 90: <i>Résistance à la flexion du BCR à 28 jours en fon<sup>22</sup>ction de caoutchouc traité.</i> .....	104

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: <i>Caractéristiques de deux bétons compactés au rouleau.</i> .....	5
Tableau 2: <i>Composition générale des pneus tourisme et poids lourd (en %) [41].</i> .....	28
Tableau 3: <i>Composition chimique d'un pneu [41].</i> .....	28
Tableau 4: <i>Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie.</i> .....	30
Tableau 5: <i>Equivalent de sable visuelle.</i> .....	40
Tableau 6: <i>Equivalent de sable exprimé.</i> .....	40
Tableau 7: <i>Nature et qualité du sable.</i> .....	40
Tableau 8: <i>Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF.</i> .....	41
Tableau 9: <i>Masse volumique absolue du sable d'OUED SOUF.</i> .....	42
Tableau 10: <i>Porosité, compacité et l'indice de vide.</i> .....	43
Tableau 11: <i>Analyse granulométrique du sable de dune d'OUED SOUF.</i> .....	43
Tableau 12: <i>Module de finesse du sable.</i> .....	44
Tableau 13: <i>Masse volumique apparente des graviers</i> .....	45
Tableau 14: <i>Masse volumique absolue des graviers</i> .....	46
Tableau 15: <i>Coefficient d'absorption d'eau des gravies.</i> .....	47
Tableau 16: <i>Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.</i> .....	48
Tableau 17: <i>Analyse granulométrique de gravier (3/8).</i> .....	49
Tableau 18: <i>L'analyse granulométrique de gravier (8/16).</i> .....	49
Tableau 19: <i>L'analyse granulométrique de gravier (16/20).</i> .....	50
Tableau 20: <i>L'analyse granulométrique de caoutchouc</i> .....	51
Tableau 21: <i>Analyse chimiques du ciment AIN EL KEBIRA.</i> .....	52
Tableau 22: <i>Composition minéralogique du clinker.</i> .....	53
Tableau 23 : <i>Temps de prise à 20°C.</i> .....	53
Tableau 24: <i>Résistance mécanique à la compression.</i> .....	53
Tableau 25: <i>caractéristique de MEDAFLOW RE 25</i> .....	54
Tableau 26: <i>Données de l'essai Proctor modifié.</i> .....	56
Tableau 27: <i>Pourcentage des constituants de BCR dans un (m<sup>3</sup>)</i> .....	57
Tableau 28: <i>Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc</i> .....	58
Tableau 29: <i>Le programme expérimental réalisé</i> .....	59
Tableau 30: <i>les résultats de la densité à l'état frais.</i> .....	65
Tableau 31: <i>Temps Vébé en fonction de la teneur en caoutchouc.</i> .....	66
Tableau 32: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec différents pourcentages de caoutchouc</i> .....	68
<b>Tableau 33:</b> <i>Résistance à la compression du BCR avec différents pourcentages de caoutchouc.</i> ...	69
Tableau 34: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec différents pourcentages de caoutchouc et 5% fumée de silice.</i> .....	70
Tableau 35: <i>les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc.</i> .....	73
Tableau 36: <i>Les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc et 5% fumée de silice</i> .....	74
Tableau 37: <i>Evolution du retrait de BCR.</i> .....	79
Tableau 38: <i>les résultats de la densité à l'état frais.</i> .....	80
Tableau 39: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec l'ajout de 5% fumée de silice</i> .....	81
Tableau 40: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine</i> .....	85
Tableau 41: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par résine et 5% fumée de silice</i> .....	86

Tableau 42: <i>les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine.</i> .....	90
Tableau 43: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par NaOH.</i> .....	94
Tableau 44: <i>les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par NaOH et 5% fumée de silice</i> .....	95
Tableau 45: <i>les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par NaOH</i> .....	99

## **INTRODUCTION GENERALE**

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

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

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

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

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

Le mémoire est composé de deux parties, théorique et expérimentale. Dans la première partie une revue générale sur la technologie de BCR est présentée. On présente également les principales

connaissances sur les déchets de caoutchouc. La partie expérimentale consiste à la caractérisation des propriétés de BCR caoutchouté ainsi que leurs constituants.

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

- ❖ Introduction générale
- ❖ Chapitre I : Le béton compacté au rouleau BCR
- ❖ Chapitre II : Les déchets pneumatiques
- ❖ Chapitre III : Caractérisation des matériaux
- ❖ Chapitre IV : Formulation du BCR et programme des essais
- ❖ Chapitre V : Résultats et discussion
- ❖ Conclusion générale

# Chapitre I

## *Le béton compacte au rouleau*

## 1. INTRODUCTION

Le BCR est un matériau composé de granulats, de ciment Portland, de matériaux cimentaires, et de l'eau. Le BCR est composé alors des mêmes constituants qu'un béton ordinaire mais avec des proportions très différentes, il se distingue des bétons ordinaires par leur affaissement nul, quantité importante de granulats et une faible quantité de ciment. Le BCR est mis en place puis compacté à l'aide des engins des travaux publics (rouleau compresseur vibrant, plaques vibrantes). Le dosage en ciment varie de 60 à 350 kg/m<sup>3</sup> selon la destination des projets et l'intensité des sollicitations qui seront lui appliquée [1,2].

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

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

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

## 2. HISTORIQUE

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

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

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

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

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

La première application au Canada eu lieu en 1976 avec la mise en place d'une aire d'entreposage de billes de bois de 25000 m<sup>2</sup> de surface sur l'île Vancouver en Colombie britannique , La construction du premier barrage en BCR (Shirnajigawa, Japon) a débuté en 1978 et a été complété deux ans après[4,5]

Après 1980, au moins dix autres pays (France, USA, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon) ont construit chacun plus de 10 000 m<sup>2</sup> de revêtement en BCR. [2]

Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Chine, Australie et d'autre pays. En Afrique, le BCR reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique et ne s'est développé que pour la construction des barrages, et l'utilisation de ce matériau en pavage n'est pas encore abordée [6].



### 3. APPLICATIONS

Le BCR a connu un grand succès dans le domaine des travaux publics pour la réalisation des routes et autoroutes comme un nouveau matériau économique et aussi permet de répondre aux exigences techniques (performance). Les barrages constituent l'une des applications majeures de ce matériau, des centaines des barrages sont réalisées à travers le monde avec cette technique. Outre Les revêtements et les barrages, le BCR a des autre domaines d'applications tant en milieu industriel qu'en milieu urbain. Il est utilisé, par exemple, pour : les aires de triage et d'entreposage de bois, les routes de transport pour l'industrie forestière et minière, les gares intermodales de conteneurs, les aires de stockage en vrac, les aires de compostage , les stationnements (véhicules lourds, militaires et automobiles), les routes municipales et urbaines et les aéroports[7]. Le béton compacté au rouleau est utilisé généralement dans les pavages (routes )et les barrages.

**Tableau 1:** *Caractéristiques de deux bétons compactés au rouleau.*

<b>Caractéristiques du béton</b>	<b>Routes</b>	<b>Barrages</b>
<b>Liant (Kg/m3)</b>	250-350	70-250
<b>Adjuvant (%quantité totale de liant)</b>	0-20	0-70
<b>Rapport eau/ciment</b>	0,3-0,4	0,4-0,8
<b>Taille maximale des granulats (mm)</b>	20	50
<b>%Passant tamis #4</b>	56	35

### 4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU BCR

#### 4.1. Avantages du BCR

Une dalle en BCR présente une excellente résistance en compression et beaucoup plus économique comparativement à du béton conventionnel, On estime que le coût approximatif du BCR est 20% à 30% plus faible que celui du béton de masse conventionnel, Le faible volume des matériaux cimentaires par rapport à celui des granulats, qui constituent environ 85% du volume du BCR, et les autres avantage sont :

- Propriétés mécaniques élevées.
- Faible coût.
- résistance au gel.

- Rapidité de mise en place.
- Grande stabilité volumique.
- Par rapport à un ouvrage en terre, volume plus faible.
- Meilleure résistance à l'érosion.
- Imperméabilité.
- Possibilité de prévoir une centrale adjacente à l'ouvrage
- Par rapport à un ouvrage en béton, moins de matières cimentaires
- Pas ou peu de coffrages
- Confort des ouvriers [8]
- Le rythme de construction rapide (taux de mise en place élevé).
- Béton sans armateurs
- Durabilité de la chaussée pour plusieurs années.
- Performance excellente à l'analyse du cycle de vie.
- Utilisation en tout temps, même en période de dégel.
- Ne se détériore pas à la suite de déversements de carburants ou de fluides hydrauliques.
- Ne se ramollit pas lorsqu'il fait chaud [9].

#### **4.2. Les inconvénients du BCR**

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

- Qualité des parements
- texture rugueuse [8]

La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être adaptés selon les différents types d'applications visées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique.

- Coût de transport des matières cimentaires en régions éloignées. Dans les grands projets de construction en BCR. On utilise de plus en plus des installations de production en continu (similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux) qui ont des taux de production beaucoup plus importants. [5,10]

## 5. SELECTION DES MATERIAUX

Lors de la formulation d'un mélange de béton compacté au rouleau, les matériaux utilisés dépendent principalement du type de construction. On essaie le plus possible d'utiliser les matériaux en place (sable, granulats) afin de minimiser les coûts de construction et de transport des matériaux.

### 5.1. Les liants

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

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

- **le ciment Portland : CPA-CEMI, CPJ-CEMII** dont la classe varie en fonction des performances voulues.
- **les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre : CHF-CEM III, CLK-CEM III, CPZ-CEM IV, CLC-CEM V.** Ces ciments présentent un début de prise plus lente et un durcissement plus progressif et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du BCR

Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m<sup>3</sup>, soit une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs.

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

### 5.2. Les granulats

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

Les granulats occupent 75 à 85% du volume total d'un mélange de BCR. Ils jouent un rôle de remplissage et ont une grande influence, de par leurs caractéristiques Physiques, chimiques et mécaniques sur les propriétés du BCR frais et durci

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

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

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

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

Les granulats utilisés se divisent en deux catégories : les gros granulats et les granulats fins.

Dans le cas des ouvrages de masse, la taille maximale des granulats est d'environ 50 mm. Cette taille augmente le risque de ségrégation, mais permet de réduire la teneur en liant. Pour éviter les problèmes de ségrégation, on doit optimiser le plus possible la granulométrie de manière à obtenir un mélange de compacité optimale. Par ailleurs, lors des opérations de mise en place, l'épaisseur des couches doit être trois fois plus élevée que la dimension du plus gros granulats

Pour les ouvrages routiers, la grosseur maximale des granulats ne doit pas excéder 20 mm de diamètre. S'est inspiré de l'expérience des constructeurs nord-Américains pour établir, il y a quelques années, un fuseau granulométrique pour les bétons compactés routiers. Ce fuseau permet de produire des bétons compactés de bonne qualité avec des surfaces relativement imperméables. Cette qualité de surface est attribuable à la grande quantité de sable présente dans le mélange [15]

### **5.3. L'eau**

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

### **5.4. Adjuvants**

Plusieurs types d'adjuvant peuvent être utilisés dans les mélanges de béton compacte au rouleau. L'avantage d'utiliser des adjuvants est qu'ils augmentent la maniabilité et retardent la prise, permettant ainsi de prévenir la formation de joints froids. Les types d'adjuvant utilisés sont les retardateurs de prise, les réducteurs d'eau et les agents entraîneur d'air (AEA). Les réducteurs d'eau permettent d'obtenir un mélange plus homogène et facilitent les opérations de mise en place. Les retardateurs de prise, comme nous l'avons mentionné précédemment, permettent de prévenir les risques de prise prématurée et la formation de joints froids. Les agents entraîneur d'air permettent la formation de petites bulles d'air dans les bétons réduisant ainsi les problèmes de détérioration par le gel.

## **6. PRODUCTION ET MISE EN PLACE**

Le béton compacté au rouleau étant de plus en plus utilisé, les producteurs ont développé des techniques de production et de mise en place pour réduire les coûts et le temps de construction. Cette section traite des différentes étapes à suivre lors de construction des barrages- poids et des routes.

### **6.1. Production**

La production du BCR est très importante. Car le malaxage du BCR nécessite une énergie suffisante pour assurer une dispersion efficace de la faible quantité d'eau de gâchage et du ciment dans le mélange [11]. Tout d'abord, on doit s'assurer que le malaxage est adéquat. En effet, le BCR doit être homogène ce qui permet d'avoir des propriétés mécaniques constantes dans l'ouvrage et ainsi ne pas se retrouver avec des zones un peu plus faibles. De plus, le taux de production doit être

suffisant. L'usine à béton ne doit pas avoir une sous-production ou une surproduction mais plutôt elle doit produire au rythme de la mise en place. Ceci évite les délais d'attente du béton dans les camions lors de la surproduction de l'usine, ce qui provoque le séchage du béton dans les camions, ou la faiblesse des liens entre les couches s'il y a sous-production. La production du BCR n'est pas très différente de celle d'un béton ordinaire. Seul le taux de production diffère.

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

Le béton est préparé et mélangé dans un malaxeur conventionnel, dans un malaxeur continu et même, dans certains cas, dans un camion malaxeur à tambour. Pour de gros travaux, on utilise le malaxeur continu. Ce type de malaxeur permet de malaxer vigoureusement les matériaux et facilite la dispersion de l'eau il travers le mélange. L'avantage d'utiliser ce Malaxeur est qu'il a un taux de production élevé, soit de 70 à 100 m<sup>3</sup> de béton par heure.

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

### **6.1.1. Les centrales fixes**

Ce type de centrale présente deux bascules : Une pour les granulats et l'autre pour le ciment. Les bascules servent essentiellement à peser les quantités élémentaires de matériaux. Le malaxeur apporte l'eau nécessaire à la fabrication du béton. Il y a d'abord pré-malaxage à sec, on ajoute l'eau au dernier moment. Pendant cette phase, on prépare déjà la gâchée suivante. La fabrication marche en discontinu. [2.7]

Pour assurer l'homogénéité et l'uniformité du mélange de BCR en centrale fixe et éviter toute ségrégation, une attention particulière doit être portée à certains aspects de la production. Tout d'abord, en raison des fortes sollicitations mécaniques subies par le système de malaxage, il est recommandé de réduire le volume des gâchées à environ 50 % de la capacité maximale du malaxeur pour une meilleure homogénéité du mélange. Les risques de bris mécaniques ou hydrauliques seront ainsi réduits, ce qui évitera les arrêts de production. De plus, le temps de malaxage normalement requis pour un béton plastique est prolongé dans le cas des BCR, soit de l'ordre de 3minutes par gâchée. Généralement, le taux de production du BCR de ce type de centrale se situe entre 35 et 60

m<sup>3</sup>/heure. Il est d'ailleurs fortement recommandé de procéder au nettoyage du malaxeur à tous les 100 m<sup>3</sup> durant la production et à la fin de chaque journée de production. Finalement, la hauteur de chute du béton frais doit être réduite au minimum pour éviter la ségrégation lors du chargement des camions à bennes basculantes.



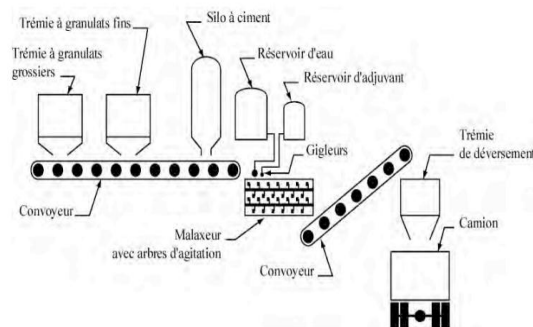
**Figure 1:** Centrales à Béton Compactes » Elkomix-25 Quick Master [ 17]

### 6.1.2. Les centrales mobiles

La production en continue est assurée par un approvisionnement constant en matières premières. Les matériaux granulaires sont mis en piles, directement sur le site, en prenant soin d'éviter la ségrégation. Les trémies les contenant sont constamment alimentées à l'aide de chargeurs sur roues en évitant leur contamination. Ils sont ensuite acheminés au malaxeur par un convoyeur. Le ciment est dosé à partir de sa trémie et incorporé directement dans le malaxeur sur le convoyeur à granulats juste avant l'entrée du malaxeur. L'eau de gâchage et les adjuvants sont introduits par un système de gicleur sur les matériaux secs à l'entrée du malaxeur. Le malaxage est à son tour assuré par deux arbres d'agitation en parallèle. Ce type de centrale présente plusieurs avantages parmi lesquels la rapidité de mobilisation et de démobolisation, la réduction du temps de transport du béton, la productivité élevée et l'efficacité de son système de malaxage. [3.12]



**Figure 2 :** Les centrales de béton mobile-[ 16]



**Figure 3 :** Schéma type d'une centrale mobile. [ 3]

## 6.2. TRANSPORT

Le transport du béton compacté au rouleau depuis la centrale de malaxage doit être réalisé dans des conditions telles qu'à l'arrivée sur le chantier, il réponde aux caractéristiques exigées. Le transport du BCR se fait généralement à l'aide de camions à bennes basculantes. Ces derniers sont couverts de toiles de protection (bâches étanches et opaques) pour minimiser les pertes d'eau par évaporation, dues à l'action des rayons solaires ou du vent.

Le temps de transport du BCR, depuis sa fabrication jusqu'à sa mise en place, ne doit pas dépasser 30 à 45 minutes, sous une température ambiante de 27 °C. Cependant, si la durée du transport devrait dépasser 45 min, ou si la température ambiante serait supérieure à 27 °C, il faudra répandre sur la benne, juste après le chargement, un produit réducteur d'évaporation elles que les émulsions résineuses.



D'autre part, il faudra prendre toutes les précautions adéquates, aussi bien au chargement qu'au déchargement, pour éviter la ségrégation du béton. [3.12]



**Figure 4:** *Le camion à benne basculante [18]*

### 6.3. Mise en place

Le BCR est mis en place à l'aide d'un finisseur conventionnel à enrobé bitumineux ou d'un finisseur à haut pouvoir de compactage (FHPC). Les finisseurs doivent être équipés de barres de compactage afin de pré-compacter le BCR mis en place. Les barres de compactage du finisseur doivent être en mesure de consolider le BCR à au moins 80 % de la masse volumique humide de référence sur toute la largeur de la table du finisseur.



**Figure 5:** *Aire de stationnement et de transit des remorques Saint-Léonard [21]*

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



**Figure 6:** couche de BCR à la sortie du finisseur

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

D'autre part, il est recommandé de corriger les irrégularités ou inégalités de répartition à l'aide de raclettes. [3.12]. Le délai entre le répartition et le début du compactage ne doit pas excéder 10 minutes. Compléter le compactage en dedans d'un délai de 60 minutes depuis le gâchage



**Figure 7:** Répartition à l'aide de raclettes.

## 7. COMPACTAGE DU BCR

### 7.1. Matériels de compactage

Pour le compactage, utiliser des rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisses, pouvant être utilisés en mode statique et vibratoire.



**Figure 8 :** rouleaux-compresseurs-compacteurs-tandems [20]

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



**Figure 9 :** Rouleau vibrant mono roue d'acier à pneus lisses [19]

## 7.2. OPERATION

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

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

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

Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR. Le BCR frais doit être compacté à l'intérieur d'un délai maximum de 60 minutes mesuré à partir de son malaxage en centrale. En tout temps lors des opérations de compactage, la surface du BCR doit être maintenue constamment humide par la vaporisation d'eau en bruine. [3.12]



**Figure 10:** Rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses. [3]

## **8. FORMULATION DE BCR**

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

La méthode de formulation doit avoir pour résultat un mélange de BCR le plus dense possible pour une maniabilité optimale.

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

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

### **8.1. METHODES EMPIRIQUES**

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

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

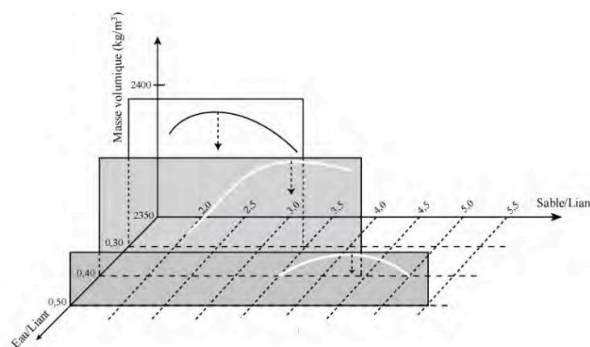
- ✓ Formulation respectant certaines limites de maniabilité.
- ✓ Formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

### 8.1.1. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité

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

#### ✓ **Étape 1**

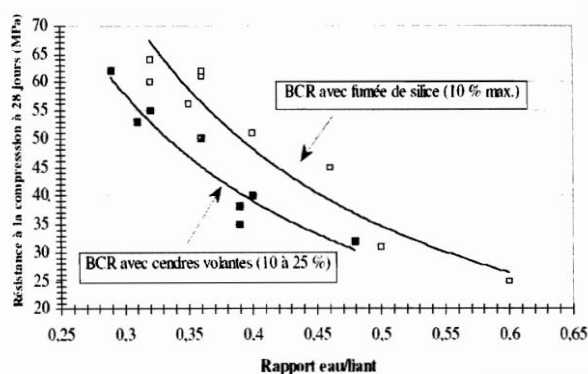
Il s'agira de réaliser une série de gâchées d'essais de mélanges de mortier à différents rapports Eau/Ciment et à différents rapports Sable/Ciment afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chacun des mélanges, la masse volumique est mesurée. La figure (I-11) montre qu'un rapport E/C donné correspond à un rapport S/C qui conduit à une masse volumique optimale.



**Figure 11:** Paramètres optimum d'un mortier pour BCR. [3]

#### ✓ **Étape 2 :**

Elle consiste à choisir le rapport E/C selon les propriétés mécaniques requises. Ce choix se fera à l'aide de la courbe de la figure (I.12), donnant la relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné).



**Figure 12:** Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné). [3]

### ✓ Etape 3

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

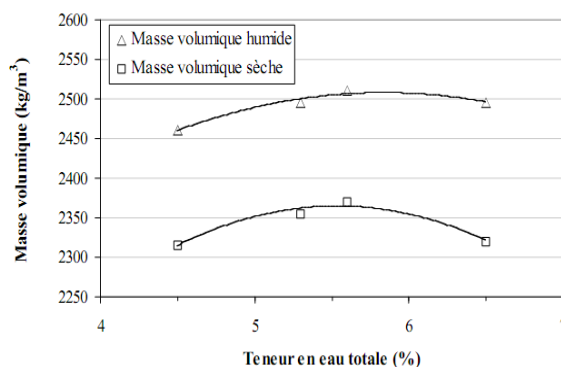
#### 8.1.2. Méthode de formulation selon des principes de géotechnique

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

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

Chaque échantillon de béton est compacté dans un moule cylindrique avec une énergie de compactage spécifique. La masse du volume de béton ainsi compacté est mesurée et la masse volumique sèche est calculée. La relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau est mise en graphique. Comme montré à la figure ( I.12), la valeur maximale sur la courbe représente la teneur en eau permettant d'obtenir le mélange à masse volumique sèche optimale.

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



**Figure 13:** Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR.

[3]

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

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

## 8.2. Méthode semi-empirique

Par définition, une méthode semi-empirique est basée à la fois sur des données expérimentales et sur quelques formules empiriques. Un exemple de méthodes semi-empiriques est celui du volume de pâte optimal. Les mélanges de BCR sont formulés en se basant sur un calcul de



volume de pâte par rapport à un volume de vides. Cette approche requiert la réalisation de quelques gâchées d'essais en laboratoire.

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

Cette méthode de formulation de BCR comporte trois étapes :

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

#### **Étape 1** : Sélection d'une granulométrie optimale et calcul du volume des vides

Cette étape consiste à choisir les proportions des différentes classes granulaires en vue de créer un squelette granulaire avec le minimum de vides après compactage. La formule utilisée pour la formulation de mélange de béton bitumineux peut être utilisée pour obtenir une courbe granulométrique produisant un squelette dense (1)

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

**Avec :**

**d** : grosseur des tamis (mm).

**D** : grosseur maximale nominale des granulats (mm).

**p** : pourcentage passant (%) des particules selon le tamis de grosseur d.

**Étape 2** : Sélection du volume de pâte pour une maniabilité désirée

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

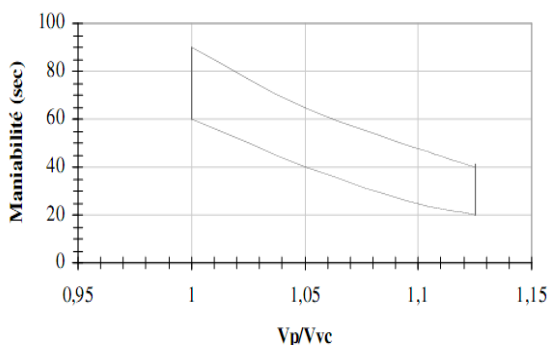
Pour un mélange de BCR sans air entraîné, le volume de pâte  $V$  (2) est égal à :

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

À partir de la figure (I.13), on détermine le volume de pâte ( $l/m^3$ ) requis pour une maniabilité désirée. Généralement, le rapport  $V_p/V_{vc}$  compris entre 1,0 et 1,05 permet d'atteindre une maniabilité variant de 30 à 90 secondes mesurée à l'aide de l'appareil VEBE. Une ou deux gâchées de vérification sont par ailleurs requises pour déterminer le dosage précis du volume de pâte nécessaire pour obtenir la maniabilité désirée.

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

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



**Figure 14:** Relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport  $V_p/V_{vc}$  pour des mélanges de BCR sans air entraîné rapport eau/liant  $< 0,50$ . [3]

**Étape 3** : Sélection du rapport eau/liant selon la résistance à la compression requise.

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

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

### **8.3. Méthode théorique : [3.12]**

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

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

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

# Chapitre II

*Valorisation des déchets  
pneumatiques*

## 1. INTRODUCTION

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

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation.

Le béton de ciment Portland va toujours être le matériau de construction le plus couramment utilisé dans l'avenir. Tout comme dans le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du béton [22].

L'emploi des déchets et des sous-produits dans le secteur du bâtiment, répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats ainsi qu'à l'obligation de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes.

## 2. DIFFERENTS TYPES DE DECHETS

Dans le cadre des travaux de génie civil, on distingue trois catégories principales des déchets : les déchets inertes, les déchets banals et les déchets dangereux

### 2.1. Déchets inertes

Les déchets inertes sont les déchets les plus stables. En cas de stockage en décharge, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement [38].

Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve :

- Béton,
- Briques,
- Parpaings,
- Tuiles et céramiques,
- Terres et granulats non pollués et sans mélange
- Caoutchouc [38].

## 2.2. Déchets banals

Les déchets banals ou les déchets industriels banals (DIB) sont non inertes et non dangereux générés par les activités, publiques ou privées, du commerce, de l'artisanat, de l'industrie ou de service. Ce sont des déchets qui ne présentent pas de danger particulier vis-à-vis des personnes ou de l'environnement et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les ordures ménagères il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois des métaux, etc. [38,39].

## 2.3. Déchets dangereux

Les déchets dangereux ou les déchets industriels spéciaux (DIS) sont des déchets qui présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. En citant par exemple : pots de peinture, tubes de colle, certains déchets d'amiante, etc. [38,40].

## 3. DEFINITION DU CAOUTCHOUC

Le terme « caoutchouc » vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex sécrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre. [23]

Les caoutchoucs, appelés aussi de manière plus scientifique les élastomères, appartiennent à la famille des polymères. Ils ont pour spécificité d'être thermoplastiques (600 à 1000% d'allongement). Une déformation importante peut leur être appliquée et une fois cette contrainte

retirée, ils retrouvent leur forme initiale. Ils possèdent une grande plage thermique d'utilisation, entre  $-50^{\circ}$  et  $150^{\circ}\text{C}$  environ. Ils sont amortissants ou résilients. Dans le langage courant, le terme caoutchouc recouvre à la fois le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques :

### 3.1. Le caoutchouc naturel

Provient de la transformation du latex naturellement sécrété par certains végétaux (par exemple, l'hévéa), dans ce cas il s'agit d'une matière première d'origine agro-industrielle produite à plus de 70% en Asie.



**Figure 15:** *Latex naturel* [41]

### 3.2. Le caoutchouc synthétique

Fabriqué à partir des dérivés de pétrole, principalement dans les pays industrialisés [24]. Dont les contours sont beaucoup plus larges. Le caoutchouc industriel est extrêmement diversifié, aussi bien en ce qui concerne les produits (plaques, courroies, gants etc.) que les marchés. Ses propriétés d'élasticité, d'étanchéité et d'amortissement en font un matériau utilisable dans de nombreuses applications : agroalimentaire, médical, équipement industriel, BTP mais aussi des applications grand public, activités de loisirs, etc. [23]

Les déchets de caoutchouc ont quatre origines principales ;

- les pneumatiques usagés de toutes natures (véhicule léger, poids lourd, véhicule agricole et. génie civil).
- les déchets de fabrication de pneumatiques neufs ou rechapés.
- les pièces de caoutchouc en fin de vie.
- les déchets produits par l'industrie du caoutchouc [25].

#### 4. LES PNEUMATIQUES

Un pneumatique est constitué de caoutchouc (naturel et artificiel), d'adjuvants chimiques et de câbles textiles et métalliques. Il faut distinguer les pneus usagés non récupérables considérés comme des déchets, des pneus usagés réutilisables qui sont :

- rechapables.
- revendables en occasion.
- réparables.



**Figure 16:** *Pneumatiques usagés [30].*

Le tableau (II.1) montre la composition des pneus. Tandis que la composition chimique est présentée dans le Tableau (II.2) La figure (II.3) montre une coupe transversale dans un pneu, dans laquelle on peut remarquer les différents éléments qui lui constituent.



**Tableau 2:** Composition générale des pneus tourisme et poids lourd (en %) [41].

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

**Tableau 3:** Composition chimique d'un pneu [41].

<b>Elément/composé</b>	<b>Teneur</b>	<b>Unité</b>
<b>Carbone</b>	Env. 70	%
<b>Fer</b>	16	%
<b>Hydrogène</b>	7	%
<b>Oxygène</b>	4	%
<b>Oxyde de Zinc</b>	1	%
<b>Soufre</b>	1	%
<b>Azote</b>	0.5	%
<b>Acide stéarique</b>	0.3	%
<b>Halogènes</b>	0.1	%
<b>Alliage cuprifères</b>	200	mg/kg
<b>Cadmium</b>	10	mg/kg
<b>Chrome</b>	90	mg/kg
<b>Nickel</b>	80	mg/kg
<b>Plombe</b>	50	mg/kg



**Figure 17 :** Coupe transversale d'un pneu Michelin [42].

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

## 5. PROBLEMATIQUE DES PNEUS

Aujourd'hui, une grande partie de ces déchets, notamment les pneus hors usage, s'accumulent, constituant ainsi une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Afin de mieux préserver l'environnement et face aux évolutions de la législation en vigueur, il est nécessaire de trouver une solution pour gérer ce type de déchets, notamment dans le domaine des matériaux de construction.

Chaque année plus de deux millions de pneus arrivent en fin de vie et sont rejetés. Ces déchets issus du développement économique notamment des secteurs industriels et de transport peuvent être restitués sous une autre forme sans les abandonner dans la nature. Il convient de valoriser ces déchets lorsque le recyclage provoque une pollution de l'environnement moindre qu'un autre mode d'élimination.

Reconnue comme matériau cimentaire, le béton présente une bonne résistance en compression, par ailleurs il est sensible à la fissuration [26]. Les ouvrages surfaciques restent les plus sensibles à

se fissurer. En effet, les matériaux cimentaires ont une faible capacité de déformation lorsqu'ils subissent des contraintes, notamment sous l'effet du retrait [27 et 28]. En effet, l'enjeu majeur est d'améliorer la déformabilité de ce matériau cimentaire sans provoquer une grande chute de résistance.

L'environnement est un enjeu très important, et sa préservation est une responsabilité commune. Le problème des pneus usés est non seulement mondial mais aussi maghrébin et africain. Dans le bassin méditerranéen, l'Algérie a pris conscience de ce problème et a donné naissance à des stratégies locales ou en coopérations internationales qui font face à la pollution. Sur le plan réglementaire, plusieurs textes et lois ont été promulgués pour définir, gérer et éliminer les déchets.

**Tableau 4:** *Quantités de pneus usagés générés par an en Algérie.*

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

## 6. RISQUES POTENTIELS POUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT

Comme ils ne présentent pas de propriétés dangereuses, les éléments constitutifs des pneus ne sont pas intrinsèquement nocifs. Toutefois, ils peuvent comporter des risques pour la santé publique et l'environnement s'ils ne sont pas convenablement gérés et éliminés.

Les pneus ne sont pas biodégradables dans la mesure où le temps qu'il leur faut pour se décomposer est indéterminé. Les pneus usés sont des déchets volumineux qui sont difficiles à compacter, à collecter et à éliminer. Incorrectement traités, ils défigurent le paysage et peuvent bloquer les canaux de circulation, les ruisseaux et les déversoirs d'orages, entraînant ainsi des modifications de l'écoulement des eaux qui peuvent à leur tour être des facteurs d'érosion, d'envasement et d'inondation.

Parce qu'ils retiennent la chaleur et ont une structure ouverte, les amoncellements des pneus accroissent le risque qu'un incendie causé par un acte délibéré ou un accident comme, par exemple, la foudre, se déclare. Un tel incendie est difficile à maîtriser et à éteindre et peut rejeter pendant plusieurs mois des fumées, huiles et autres produits toxiques qui polluent l'air, les sols et les cours

d'eau [31]. Dans les décharges, les pneus prennent beaucoup de place, constituent une cause possible d'incendier, ne se biodégradent pas et remontent fréquemment à la surface, ce qui crée une nouvelle série de problèmes compliquant la gestion de ces sites. C'est pour cette raison que l'Union européenne a interdit leur mise en décharge



**Figure 18:** *Fumées toxiques qui se dégagent en brûlant des pneus.* [32]

## 7. FILIERES DE VALORISATION

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit ; après le démontage des pneus usagés, ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage. Les pneus usagés non réutilisables sont, soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés, afin de les livrer aux vaporisateurs.

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

### 7.1. Le rechapage

C'est une technique qui consiste à reconstituer la bande de roulement du pneu usagé (PU) pour prolonger sa durée de vie. Michelin a réalisé en Algérie l'unique unité du groupe en Afrique, avec une capacité de production de 250 000 enveloppes PL par an, sur un marché Algérien de 700 000 unités/an dominé par les produits chinois (environ 30% de parts de marché) [33]



**Figure 19 :** *Rechapage des pneus usagés [25].*

## 7.2. Valorisation énergétique

Les pneus possèdent un pouvoir calorifique important : 3 tonnes de pneus se substituent à environ 2 tonnes de fioul. L'industrie principale consommatrice des PU est l'industrie cimentière. Les PU sont introduits déchetés au niveau de la tour de pré-calcination, ou entières au niveau du four [34]

Les inconvénients de ces procédés sont dus à l'utilisation d'installations fixes, le transport des PU et des conditions d'émissions dans l'air. En Algérie cette valorisation est absente vue que l'utilisation du gaz naturel en industrie cimentaire est préférée.

## 7.3. La valorisation sous forme de matières premières

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



**Figure 20:** *Broyages des pneus usagés [25].*

- **Poudrettes :**



**Figure 21:** *Aspect des déchets de caoutchouc. [35]*

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines, la modification des revêtements routiers (diminution du bruit).etc. [30]

- **Granulés :**

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés antidérapant, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...)

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse – Thermolyse. Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone...etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre [30]

## **8. EMPLOI EN DOMAINE GENIE CIVIL**

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique : ductilité, faible conductivité thermique. Plusieurs techniques utilisant les PU en génie civil sont connues dans le monde : la technique Pneu-sol ...etc. [36].

### **8.1. Le tapis de pneus anti-vibration**

Le tapis de pneus, composé de deux lits croisés de bandes de roulement de pneumatiques, est intercalé entre le ballast et la couche de forme (ou posé sur les tabliers des ponts ferroviaires) pour atténuer les vibrations provoquées par diverses machines, les trains, les tramways, les rames du métro, etc. [25].

### **8.2. La construction de récifs artificiels**

Immergés à des profondeurs de dix ou vingt mètres, assemblés et lestés à l'aide de blocs de ciment, les pneus peuvent former des récifs artificiels constituant des zones de calme pour la faune marine. Le Japon et les Etats- Unis ont développé une véritable industrie du récif artificiel ; par exemple, en Caroline du Nord, plus de 500.000 pneumatiques ont été immergés entre 1974 et 1977. En France, cinq récifs artificiels ont été construits.

### **8.3. Mur antibruit**

L'ingénieur R. Beyler a proposé un mur antibruit dont la structure absorbante est réalisée avec des pneus usagés enfermés dans un caisson métallique dont une face est perforée de trous. Les essais effectués en 1992 selon les normes AFNOR S 31089 ont donné des résultats supérieurs aux valeurs maximales fixées dans la norme, ce qui classe ce mur antibruit parmi l'un des plus intéressants [25].

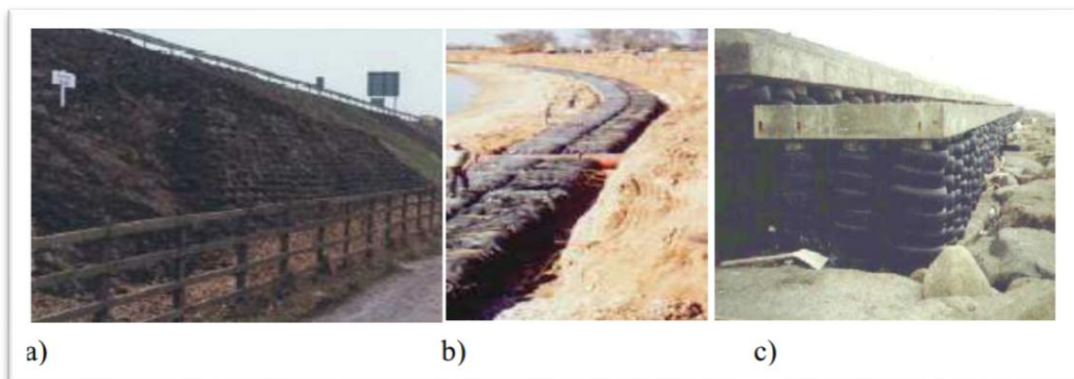
### **8.4. Le Pneu sol**

Le Pneu sol est formé de l'association de deux éléments : le pneu et le sol. Le mot "pneus" désigne tous les éléments du pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) ou les pneus entiers qui sont associés linéairement ou en nappes et susceptibles de supporter des efforts de traction importants. Le mot "sol" englobe toutes les variétés de terrains naturels, artificiels ou des déchets divers. La technologie est un élément essentiel du pneu sol car son principe, relativement simple, ne pouvait se développer et s'imposer dans le domaine du génie civil sans une étude technique très

détaillée des éléments technologiques permettant d'aboutir à une standardisation du matériau [25]. Quelques applications de la technique de pneu sol sont présentées dans les figures (II.8), (II.9).



**Figure 22:** *le pneu sol [42]*



**Figure 23:** *Applications de résidus de vieux pneus entiers : a) stabilisation de talus, b) protection érosion de berges, c) protection côtière*



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

La possibilité de valorisation des déchets pneumatiques dans le béton sous d'agrégats a été l'objet de nombreuses recherches expérimentales. Ces recherches ont avaiet pour finalité que l'incorporation des déchets pneumatiques dans les bétons affectent leurs propriétés physico-mécaniques aussi bien à l'état frais qu'a l'état durci.

Les principales conclusions tirées à partir de ces études c'est que l'incorporation des particules de caoutchoucs diminue la densité et les paramètres de résistance du béton et augmenter la ductilité de ces matériaux (Figures II.10, II.11 et II.12).

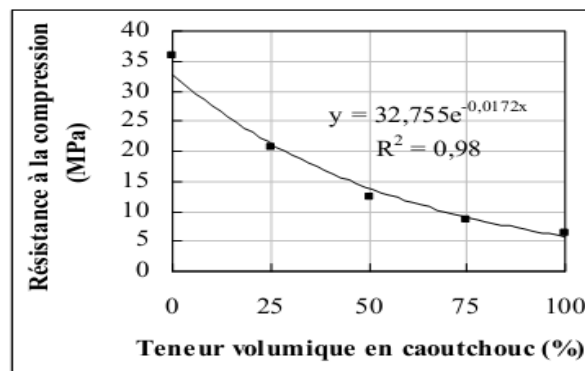


Figure 24: Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression. [35]

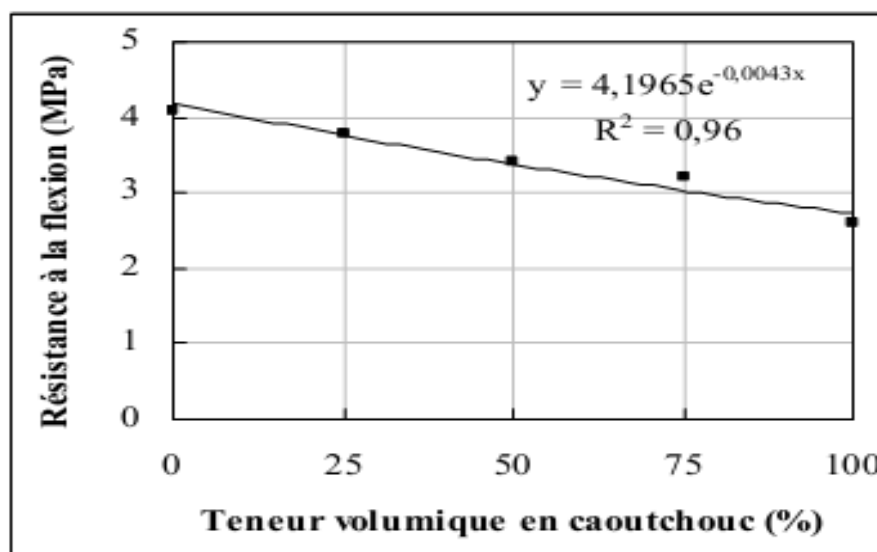


Figure 25: Effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion [35]

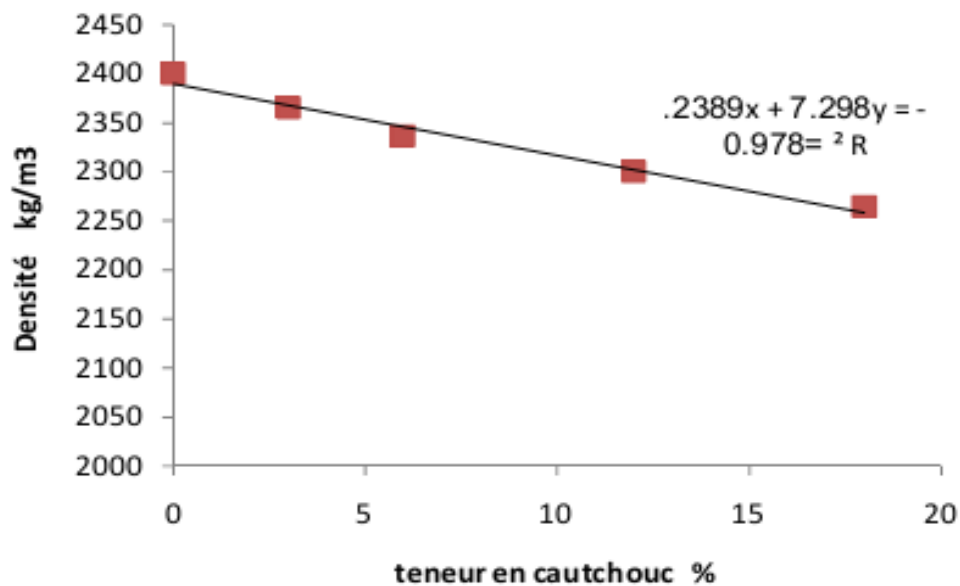


Figure 26 : Effet du caoutchouc sur la densité. [37]

## 10. CONCLUSION

Le pneu usagé est un déchet encombrant car leur nombre augmente chaque année, la valorisation des pneumatiques usagés permet de réduire leur quantité et conséquemment de préserver la nature et les ressources naturels.

La valorisation des déchets pneumatique dans le domaine de génie civil prend un grand part parce que les multiples utilisations de ces déchets dans le domaine du génie civil, donne infini de solutions à l'ingénieur pour avoir un nouveau matériau. Le béton contenant des agrégats d'origine caoutchoutière est un nouveau matériau qui nécessite toujours des recherches expérimentales pour caractériser leurs propriétés, d'une part. D'autre part de trouver des nouvelles applications de ce matériau composite.

# Chapitre III

## *Caractérisation des matériaux*

## 1. INTRODUCTION

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

## 2. LES GRANULATS :

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

### 2.1. Le sable

Ce sont des granulats dont la taille est comprise entre 0 et 5 mm, Sable, c'est que nous devons l'étudier sable d'OUED SOUF, Ces granulats ont été soumis à différentes analyses physiques dont les résultats sont présentés dans le paragraphe ci-dessous.

#### 2.1.1. Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable est réalisé suivant la norme NF P18-598, l'essai consiste à séparer par agitation, dans une éprouvette, au moyen d'une solution lavant, les sables, qui décantent, et les éléments fins qui restent en suspension. On détermine ainsi un « équivalent de sable » dont la valeur est d'autant plus élevée que le sable est exempt d'impuretés argileuses. Ce rapport est influé sur les caractéristiques mécaniques de béton.

#### ➤ Mode opératoire :

- Le matériel nécessaire pour cet essai généralement est : balance, éprouvette spéciale pour ES, machine d'agitation, chronomètre, règle. Les matériaux utilisés, le sable et l'eau distillée.
- On remplit l'éprouvette cylindrique avec l'eau distillée jusqu'au trait repère inférieur, puis on verse soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement une quantité de sable sèche de masse  $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ .

- On frappe fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon, puis on laisse l'ensemble reposer pour dix minutes.
- À la fin de cette période de dix minutes, on place le bouchon en caoutchouc sur l'éprouvette et on fixe l'ensemble sur la machine d'agitation.
- On sollicite à l'éprouvette 90 cycles  $\pm$  1 cycle en 30 s  $\pm$  1 s. Après on remet l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.
- On enlève le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec l'eau distillée.
- On descend le tube laveur dans l'éprouvette rincé les parois de l'éprouvette avec l'eau distillée, puis on lui enfonce le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.
- On remonte les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : L'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur
- On laisse l'éprouvette reposer pendant 20 min  $\pm$  10 s.
- Au bout de ces 20 min, on mesure à l'aide de la règle la hauteur H1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette et également la hauteur H'2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.
- Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette. Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglelet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston, lire la hauteur du sédiment H2 au niveau de la face supérieure du manchon.

Les formules pour calculé E.S sont :

- Equivalent sable visuelle  $E.S.v = \frac{H'2}{H1} * 100$
- Equivalent sable exprimé  $E.S.ex = \frac{H'2}{H1} * 100$

-Résultats : Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau 5:** *Equivalent de sable visuelle.*

N° d'essais	h <sub>1</sub> (cm)	h <sub>2</sub> (cm)	E.S.V (%)	E.S.V moy (%)
1	10.1	8.5	84.15	83.70
2	10.9	9.1	82.5	
3	10.3	8.7	84.46	

**Tableau 6:** *Equivalent de sable exprimé.*

N° d'essais	h <sub>1</sub> (cm)	h' <sub>2</sub> (cm)	E.S.P (%)	E.S.P moy (%)
1	10.1	8.2	81.18	79.77
2	10.9	8.35	76.6	
3	10.3	8.40	81.55	

Le tableau suivant exprimé la qualité de sable à partir E.S.

**Tableau 7:** *Nature et qualité du sable.*

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

**Interprétation :**

A partir des résultats trouvés on peut dire que le sable de Oued Souf est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

**2.1.2. La masse volumique****2.1.2.1. La masse volumique apparente**

La masse volumique apparente d'un sable est la masse du sable occupant l'unité de volume, tous vides compris « volume apparent ». Est adaptée par la norme NF18-555

➤ **Mode opératoire :** On prend un récipient d'un volume (V) de 1 litre et d'une masse (M1), nous remplissons ce récipient par un échantillon de sable, une fois le récipient est rempli, on nivelé la surface du sable, ensuite on pèse le tout, soit (M2) ce poids. La masse volumique apparente de sable est calculé par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{(M2 - M1)}{V}$$

➤ **Résultats :**

Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau suivant

**Tableau 8:** Masse volumique apparente du sable d'OUED SOUF.

N° d'essais	M (g)	V (L)	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ moy(g/cm <sup>3</sup> )
1	1419	1	1.419	1.413
2	1405	1	1.405	
3	1415	1	1.415	

**2.1.2.2. La masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue d'un sable est le rapport de sa masse sèche par le volume de matière solide sans aucun vide contenu dans les grains « volume absolu » sable est adaptée par la norme NF18-555

➤ **Mode opératoire :** On Pèse une quantité de sable (sable d'Oued Souf) soit sa masse M, puis prendre une éprouvette graduée de volume 1000 ml et remplie par un volume d'eau, soit V1. On verse

maintenant la masse de sable M dans l'éprouvette graduée, puis on lire le niveau de volume d'eau V2. La masse volumique absolue est calculé par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{(V2 - V1)}$$

➤ **Résultats :** Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau (III.5) :

**Tableau 9:** Masse volumique absolue du sable d'OUED SOUF.

N° d'essais	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	$\rho_{abs}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{abs\ moy}$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	300	400	425	2.400	2.309
2	300	400	435	2.222	
3	300	400	430	2.307	

### 2.1.3. LA POROSITE ET LA COMPACTITE ET L'INDICE DE VIDE (NF P18-554)

La porosité est par définition le complément à l'unité de la compacité. On calcule la porosité d'après la formule suivante :

$$p = \left( 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \times 100\%$$

La compacité est le rapport entre la masse volumique apparente et de la masse volumique absolue. On calcule la compacité d'après la formule suivante :

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} * 100$$

L'indice de vide d'après la définition est le rapport entre la porosité et la compacité. On calcule l'indice de vide d'après la formule :

$$e = \frac{p}{c}$$



**Tableau 10:** Porosité, compacité et l'indice de vide.

Porosité (P) %	Compacité (C)%	Indice de vide (e)
38,80	61,19	0,63

**2.1.4. Analyse granulométrique (NF18 304)**

L'essai Permet la détermination des grosseurs ainsi les pourcentages respectifs des différents grains constituant l'échantillon. Il consiste à passer l'échantillon tester à travers une série des tamis décroissants de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.

➤ **Mode opératoire :**

- La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure ou égale à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres. ça veut dire que on pèse une masse M qui égale  $0.2 \times 5$  (1 Kg).
- On prépare une série des tamis de dimension décroissant une haut vers le bas comme suite : 5, 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,2, 0,08, fond.
- On verse la masse de sable qui ont pesé dans la colonne des tamis, la agitation est faite mécaniquement pendant 5 min, après ont pesé chaque tamis.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable d'OUED SOUF sont regroupés dans le tableau (III.7) ci-dessous :

**Tableau 11:** Analyse granulométrique du sable de dune d'OUED SOUF.

Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0	0	0	100
2,5	15,5	15,5	0,64	99,35
1,25	57,5	73	7,3	92,7
0,63	221,33	294,33	29,43	70,57
0,315	424	718,33	71,83	28,17
0,2	224,33	942,66	94,26	5,74
0,08	47,33	989,99	98,99	1,01
Fond	3	992,99	99,30	0,7

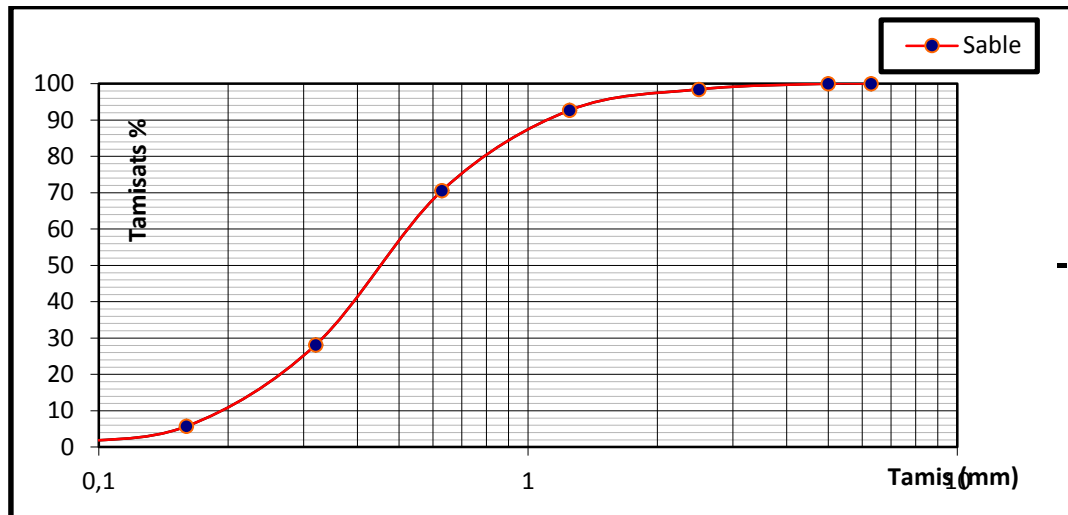


Figure 27: La courbe granulométrique de sable.

### 2.1.5. Module de finesse :

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse .à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible et plus le sable est riche en éléments fins.

Le module de finesse des sables « MF » est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage, aux tamis de 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 et 5 mm [28].

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous.

$$M_f = \Sigma R_c / 100$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est égal à :

$$\mathbf{MF = 2.04}$$

Remarque : On peut classer le sable selon le module de finesse comme suit :

Tableau 12: Module de finesse du sable.

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

A partir de tableau (12) on remarque que le sable d'Oued Souf a de  $MF = 2.07$  entre 2 et 2.5 (c'est un sable moyenne).

## 2.2. Le gravier

### 2.2.1. La masse volumique du gravier

#### 2.2.1.1. La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un gravier est la masse de gravier occupant l'unité de volume, tous vides compris « volume apparent » est adaptée par la norme NF18-554

➤ **Mode opératoire :** On prendre un récipient d'un volume (V) de 5000ml et d'un masse (M1), en remplit cette récipient par un échantillon de gravier, on arasé la surface du récipient et on pèse le tout. Soit M2 ce poids. La masse volumique apparente de gravier est calculé par la formule suivant :

$$\rho_{app} = \frac{(M2-M1)}{V}$$

➤ **Résultats :** Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau 13:** Masse volumique apparente des graviers

Gravier	M <sub>2</sub> (kg)	M <sub>1</sub> (kg)	V (l)	$\rho_{app}$ (kg/l)	$\rho_{app\ moy}$ (kg/l)
(3/8)	7.550	0.841	5	1.34	1.34
	7.531			1.33	
	7.620			1.35	
(8/15)	7.681			1.36	1.37
	7.775			1.38	
	7.691			1.37	
(15/20)	7.941			1.420	1.40
	7.841			1.401	
	7.741			1.400	
caoutchouc	3.3			0,4918	0,491
	3.279			0,4876	
	3.309			0,4936	

### 2.2.1.2. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue De gravier est le rapport de sa masse sèche par le volume de matière solide sans aucun vide contenu dans les grains « volume absolu » sable est adaptée par la norme NF18-554

➤ **Mode opératoire :**

- On utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, on fixe le volume d'eau dans l'éprouvette, soit  $V_1=400$  ml. La masse de chaque fraction de gravier est  $M=300$ g.
- On verse la masse  $M$  dans l'éprouvette qui est déjà contient  $V_1$ . On lire chaque fois le nouveau volume  $V_2$ .

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

➤ **Résultats :** Les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau 14:** Masse volumique absolue des graviers

Gravier	M (g)	V <sub>1</sub> (ml)	V <sub>2</sub> (ml)	ρ (kg/l)	ρ moy (kg/l)
(3/8)	300	400	515	2.60	2.54
			520	2.50	
			518	2.54	
(8/15)			512	2.67	2.60
			515	2.60	
			518	2.54	
(15/20)			516	2.58	2.61
			512	2.67	
			515	2.60	
caoutchouc	670	1,111	1,111		
	665	1,132			
	675	1,090			

**2.2.2. Degré d'absorption d'eau (NF P18-554) :**

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

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

$M_H$  : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

$M_S$  : La masse du matériau sec en (g).

➤ **Résultats :**

**Tableau 15:** Coefficient d'absorption d'eau des gravies.

Fraction	$M_H$ (g)	$M_S$ (g)	A (%)
(3/8)	1000	978	2.25
(8/15)	1000	986	1.42
(15/20)	1000	990	1.01
caoutchouc	1000	992	0.80

**2.2.3. LA POROSITE ET LA COMPACTITE ET L'INDICE DE VIDE NF P18-554**

La porosité est par définition le complément à l'unité de la compacité. On calcule la porosité d'après la formule suivante :

$$p = \left( 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \times 100\%$$

La compacité est le rapport entre la masse volumique apparente et de la masse volumique absolue. On calcule la compacité d'après la formule suivante :

$$C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} * 100$$

L'indice de vide d'après la définition est le rapport entre la porosité et la compacité. On calcule l'indice de vide d'après la formule :

$$e = \frac{p}{c}$$

Les grandeurs de la porosité, la compacité et l'indice des vides des granulats sont rapportés sur le tableau suivant :

**Tableau 16:** Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.

Graviers	Porosité P (%)	Compacité C (%)	Indice des vides e
(3/8)	47.24	52.75	0.895
(8/15)	47.30	52.70	0.890
(15/20)	46.36	53.63	0.864
caoutchouc	55.8	44.19	1.26

#### 2.2.4. Analyse granulométrique (NF P18-560) :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la répartition d'un matériau suivant leur dimension

##### ➤ **Mode opératoire :**

- La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure ou égale à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée de chaque fraction en millimètres.
- On prépare une série de tamis de dimension décroissant de haut vers le bas de grande vers petite ouverture, tel que chaque gravier (3/8, 8/15, 15/20) est contenu dans un tamis spécifique comme suit :
  - 3/8 (8, 6.3, 5, 4, 3.15, 2.5, fond).
  - 8/15 (16, 12.5, 10, 8, 6.3, 5, fond).
  - 15/20 (20, 16, 12.5, 10, 8, fond).
- On verse la masse de gravier qui ont pesé dans la colonne des tamis, l'agitation est faite mécaniquement pendant 5 min, après on a pesé chaque tamis.

##### ➤ **Résultats :** Enregistre les résultats dans les tableaux suivants :

**Tableau 17:** Analyse granulométrique de gravier (3/8).

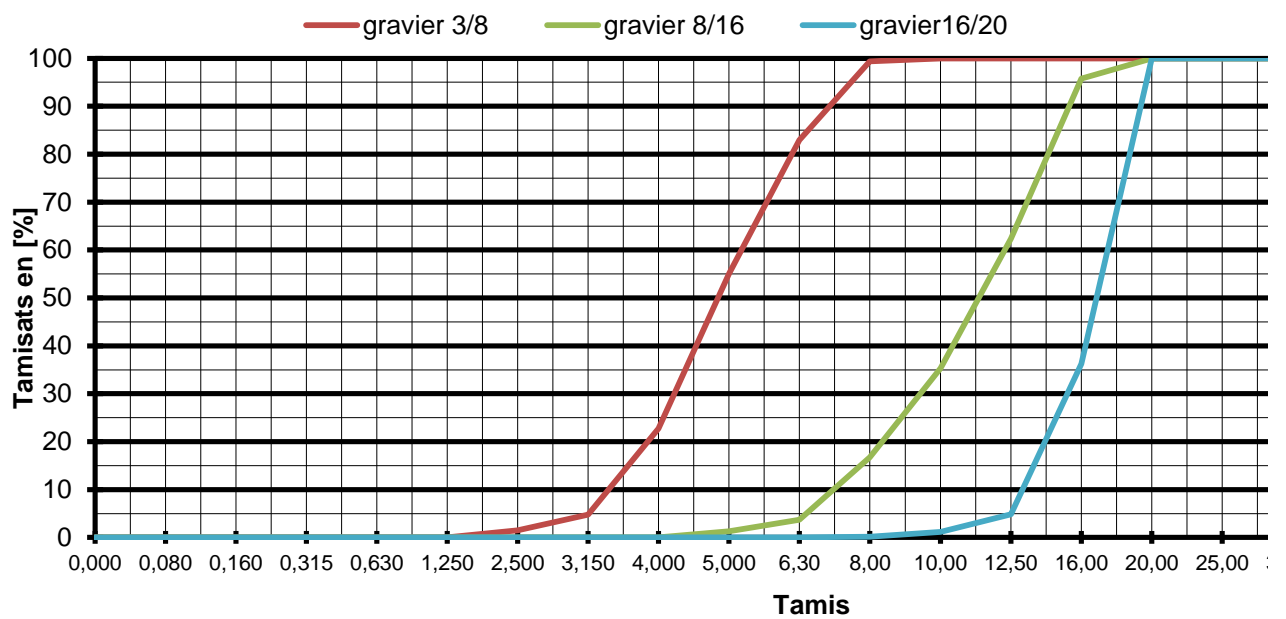
<b>Tamis en mm</b>	<b>Refus partiel (g)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
10	0	0	0	100
8	10,33	10,33	0,64	99,35
6,3	263	273,33	17,08	82,92
5	446	719,33	44,96	55,04
4	516,33	1235,66	77,23	22,77
3,15	287,66	1523,32	95,21	4,79
2,5	52,66	1575,98	98,50	1,50
fond	22,33	1597,98	99,87	0,13

**Tableau 18:** L'analyse granulométrique de gravier (8/16).

<b>Tamis en mm</b>	<b>Refus partiel (g)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât(%)</b>
20	0	0	0	100
16	126	126	4,2	95,80
12,5	1002,66	1128,66	37,62	62,38
10	813	1941,66	64,72	16,73
8	566,33	2507,99	83,59	22,77
6,3	380,33	2888,32	96,27	3,73
5	74	2962,32	98,74	1,26
fond	32,66	2994,32	99,81	0,19

**Tableau 19:** L'analyse granulométrique de gravier (16/20).

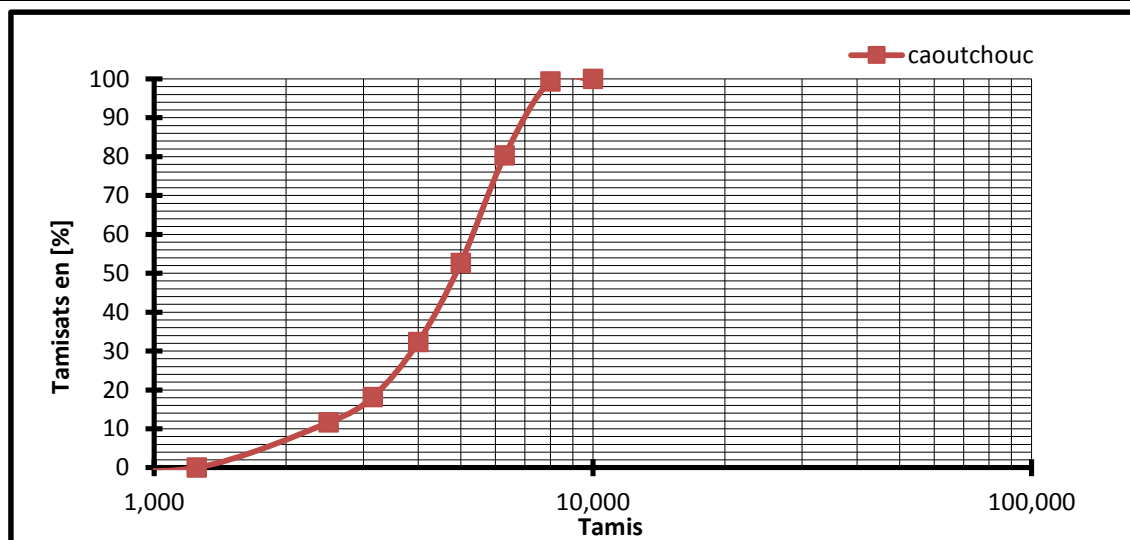
Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20	0	0	0	100
16	2551	2551	63,77	36,23
12,5	1256	3807	95,17	4,83
10	148	3955	98,87	1,13
8	39	3994	99,85	0,15
fond	4	3998	99,95	0,05

**Figure 28:** les courbes granulométriques des graviers.



**Tableau 20:** L'analyse granulométrique de caoutchouc

Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
8,00	19,66	19,66	1.228	98,772
6,30	295,66	315,32	19.70	80.3
5,00	442,33	757,65	47.35	52,65
4,00	326	1083,65	67.72	32,28
3,15	225,66	1309,31	81,83	18,17
2,50	105	1414,31	88,39	11.61
fond	181	1595.31	99.70	0,03

**Figure 29:** la courbe granulométrique de caoutchouc.

### 3. CARACTERISTIQUES DU CIMENT UTILISE

#### 3.1. Présentation du ciment AIN EL KEBIRA

Le ciment CPJ-CEM II/ A 42,5 est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. C'est un ciment conforme à la norme NA 442 :2000.

### 3.2. Domaines d'utilisation

Le ciment de AIN EL KEBIRA est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Le ciment CPJ-CEM II /A 42,5 Convient pour :

- Les bétons armés et non armés, Préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvés ;
- Les bétons prêts à l'emploi ;
- Le génie Civil (ouvrages et routes) ;
- Les travaux de construction (Logements, locaux commerciaux et Industriels) ;
- Les produits dérivés de ciment ;
- Les mortiers pour chapes et crépis.

### 3.3. Analyses et caractérisation :

Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment AIN EL KEBIRA délivré du fournisseur.

**Tableau 21:** Analyse chimiques du ciment AIN EL KEBIRA.

Composantes	Valeur (%)	Norme
Teneur en SiO <sub>2</sub>	20.7	NA 442 :2000.
Teneur en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.75	
Teneur en CaO	62.92	
Teneur en Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.75	
Teneur en MgO	1.9	
Teneur en SO <sub>3</sub>	1.98	
Teneur en Na <sub>2</sub> O	0.09	

**Tableau 22:** *Composition minéralogique du clinker.*

<b>Composantes</b>	<b>Valeur (%)</b>
Silicates tricalciques C3S	59
Silicates bicalciques C2S	14
Aluminates tricalciques C3A	06
Aluminoferrites tetracalciques C4AF	11

**Tableau 23 :** *Temps de prise à 20°C.*

<b>Temps de prise</b>	<b>Temps (min)</b>	<b>Norme</b>
Début de prise	2.30	NA 442 :2000
Fin de prise	3.30	

**Tableau 24:** *Résistance mécanique à la compression.*

<b>Age de l'éprouvette</b>	<b>Résistance à la compression (MPa)</b>	<b>Norme</b>
02 jours	18	NA 442 :2000
7 jours	32	
28 jours	$\geq 42.5$	

#### 4. LES ADJUVANTS

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5% en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du béton durci, (Norme EN 934-2)

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants fabriqués par la société Granitex à OUED SMAR - BP 85 Oued Smar - 16270 (Wilaya d'Alger) à savoir : Le MEDAPLAST HP de Granitex

## 4.1. Le MEDAPLAST HP

### 4.1.1. Description

Le MEDAPLAST HP est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques. Ses caractéristiques sont regroupées dans le Tableau III.25

**Tableau 25:** caractéristique de Le MEDAPLAST HP

Forme	Composant	Surface spécifique	Densité	Taille des grains
Poudre	SiO <sub>2</sub> > 85% SO <sub>3</sub> < 2.5% CL- < 0.2 %	> 15 m <sup>2</sup> /gr	0.5	0.1 (microns)

### 4.1.2. Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST HP il permet :

- ✓ **Sur le béton frais :**
  - Amélioré la cohésion
  - Evité ressuage et la ségrégation
- ✓ **Sur le béton durci :**
  - augmenter les résistances mécaniques
  - Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
  - Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
  - Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
  - Augmenter la durabilité du béton

Chapitre IV  
*Formulation du  
BCR et  
programme des  
essais*

## 1. INTRODUCTION

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

## 2. FORMULATION ADOPTEE

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

### 2.1. Les paramètres

- Dosage en ciment.
- Dosage en eau : dépend de l'optimum Proctor (on peut commencer avec une teneur en eau égale à 4 % et l'augmenter de 1% à chaque compactage jusqu'à 7% pour déterminer l'optimum Proctor) ;
- Energie de compactage : L'essai Proctor modifié est utilisé avec une énergie de compactage qui est égale à 2.09 KJ/dm<sup>3</sup>.

## 2.2. Données de l'essai Proctor modifié

**Tableau 26:** Données de l'essai Proctor modifié.

Volume du moule	0.00278m <sup>3</sup>
Diamètre du moule	15.24 cm
Hauteur du moule	15.24 cm
Poids de la dame	4.54 kg
Diamètre de la dame	5.08 cm
Hauteur de chute	45.70 cm
Nombre de coups par couche	56
Nombre de couche	5
Energie de compactage (En)	2.09 kJ/dm <sup>3</sup>

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

$$\frac{\text{Hauteurdechute} * \text{poidsdeladame} * \text{Nbdecoups} * \text{Nbdecouches}}{\text{Volumetotaldumoule}}$$

## 2.3. L'optimum Proctor

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

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

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

## 2.4. La courbe combinée

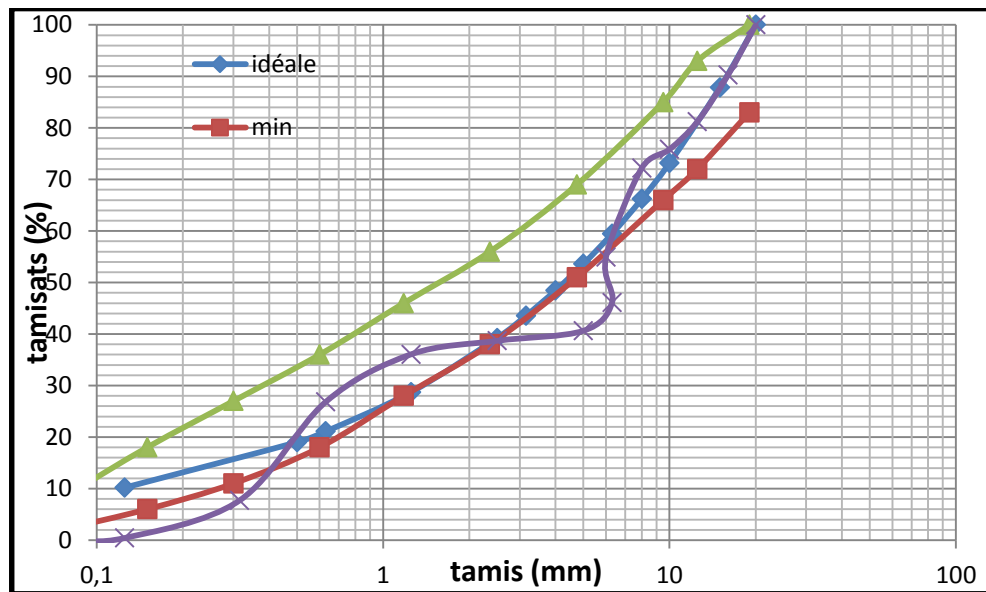


Figure 30: la courbe combinée

D'après cette courbe les pourcentages des constituants de formulations du BCR dans un ( $m^3$ ) représenté dans le tableau suivant :

Tableau 27: Pourcentage des constituants de BCR dans un ( $m^3$ )

constituants	Pourcentage (%)
S	32
G3/8	26,25
G8/15	13,10
G15/20	10,65
C	13
E	5

## 2.5. Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc dans un ( $m^3$ )

L'objectif de notre travail c'est la caractérisation de béton compacté au rouleau contenant des particules en polymère (caoutchouc), on a préparé des éprouvettes de béton avec différents pourcentages de caoutchouc. L'étude est faite sur sept pourcentages ; 0, 5, 10, 15, 20, 25 et 30%. Le caoutchouc a été intégré dans le béton par substitution partiel de volume total de gravier. Le tableau (IV.3) regroupe les différentes compositions préparées.



**Tableau 28:** Dosage des constitutions de BCR avec caoutchouc

Pourcentage de caoutchouc (%)	Graviers (Kg/ m <sup>3</sup> )			Caoutchouc (Kg/ m <sup>3</sup> )	Sable (Kg/ m <sup>3</sup> )	Ciment (Kg/ m <sup>3</sup> )	Eau (Kg/m <sup>3</sup> )
	3/8	8/15	15/20				
0	596	299	241	0	727	295	113.5
5	566.2	248.05	228.95	23.2			
10	536.4	264.1	216.9	46.4			
25	506.6	254.15	204.85	69.6			
20	476.8	239.2	192.8	92.8			
25	447	244.25	180.75	116			
30	417.2	209.3	168.7	139.2			

### 3. PROGRAMME EXPERIMENTAL REALISE

Outre les essais d'identification des matériaux employés pour les mélanges de BCR, le programme expérimental comporte la réalisation des essais de caractérisation de béton compacté au rouleau contenant des particules caoutchouc en présence et absence de fumée de silice. l'un des objectifs de notre mémoire est l'amélioration de la performance de caoutchouc dans les mélange de BCR, dans ce cadre un programme comportant deux solutions est réalisé.

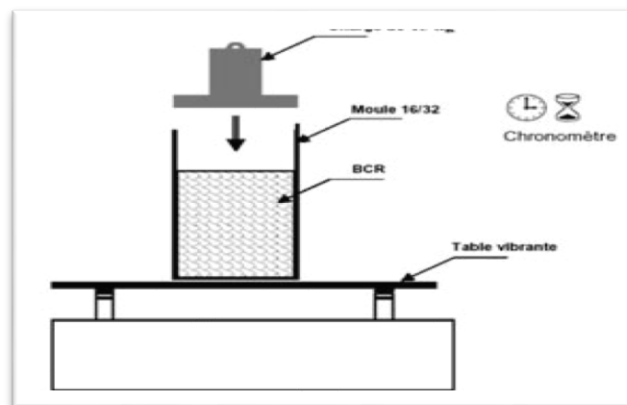
Le programme expérimental réalisé est représenté dans le tableau (IV.4)

Tableau 29: Le programme expérimental réalisé

	E/C	% de caoutchouc	Eau (l)	Ciment (Kg)/m <sup>3</sup>	G 3/8 (Kg)/m <sup>3</sup>	G8/15 (Kg)/m <sup>3</sup>	G15/20 (Kg)/m <sup>3</sup>	Caoutchouc (Kg) /m <sup>3</sup>	Sable (Kg) /m <sup>3</sup>	FS%
<b>BCR 0</b>	0.38	0	113.5	295	596	299	241	-	727	5
	0.38	0	113.5	295	596	299	241	-	727	-
	0.46	0	113.5	295	596	299	241	-	727	5
	0.46	0	113.5	295	596	299	241	-	727	-
	0.53	0	113.5	295	596	299	241	-	727	5
	0.53	0	113.5	295	596	299	241	-	727	-
<b>BCR 1</b>	0.38	5	113.5	295	566.2	248.0	228.9	23.2	727	5
	0.38	5	113.5	295	566.2	248.0	228.9	23.2	727	-
<b>BCR 2</b>	0.38	10	113.5	295	536.4	264.1	216.9	46.4	727	5
	0.38	10	113.5	295	536.4	264.1	216.9	46.4	727	-
<b>BCR 3</b>	0.38	15	113.5	295	506.6	254.1	204.8	69.6	727	5
	0.38	15	113.5	295	506.6	254.1	204.8	69.6	727	-
<b>BCR 4</b>	0.38	20	113.5	295	476.8	239.2	192.8	92.8	727	5
	0.38	20	113.5	295	476.8	239.2	192.8	92.8	727	-
<b>BCR 5</b>	0.38	25	113.5	295	447	244.2	180.7	116	727	5
	0.38	25	113.5	295	447	244.2	180.7	116	727	-
<b>BCR 6</b>	0.38	30	113.5	295	417.2	209.3	168.7	139.2	727	5
	0.38	30	113.5	295	417.2	209.3	168.7	139.2	727	-

## 4. LE MALAXAGE ET METHODE DE COMPACTAGE

Le malaxage des différents constituants des mélanges a été fait dans un malaxeur rotatif. Les éprouvettes ont été compactées suivant la technique de vibro-compactage (Fig. IV. 3). La technique que nous avons adoptée dans ce travail est celle utilisée et décrite dans le Projet National Français BaCaRa [43]. La confection des éprouvettes a été réalisée dans les 30 minutes qui suivent le malaxage.



**Figure 31:** Principe de la Méthode de Vibro-compactage.

Le degré d'humidité du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton. Après le démoulage les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de 20°C.

## 5. PROCEDURES D'ESSAIS SUIVIES

### 5.1. Essais sur le béton frais

#### 5.1.1. Maniabilité (ouvrabilité) de béton

Les méthodes de mesure de l'ouvrabilité du béton ne sont pas toujours adaptées aux BCR. Ainsi le cône d'Abrams ne peut convenir à ce genre de béton. Donc les méthodes de mesure font appel à la vibration comme le maniabilimètre, ou l'appareil Vébé. Dans cet essai, la consistance est définie par le temps que met un cône de béton à remplir un volume connu, sous l'effet d'une vibration donnée. Plus le temps est court et plus le béton sera considéré comme fluide.

Dans notre travail on a mesuré le temps de compactage, car l'appareil Vébé n'est pas disponible dans notre laboratoire.

### 5.1.2. La masse volumique

La masse volumique est le rapport entre la masse du béton frais et le volume occupé (du moule). On pèse le moule avant et après la confection. La différence entre les deux masses présente la masse du béton frais

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

## 5.2. Essais sur le béton durci

### 5.2.1. Résistance à la compression (NF P18-411)

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton. La résistance à la compression fait partie des qualités les plus représentatives du BCR. En effet, la capacité du BCR à supporter des charges lourdes concentrées résulte de sa forte résistance en compression. Un BCR bien formulé peut avoir une résistance à la compression à 28 jours variant de 40 à 60 MPa. La réalisation de cet essai a été réalisée sur des éprouvettes cubiques (10×10×10 cm).

L'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique de capacité 3000KN, à une vitesse constante (0.25KN/S) des éprouvettes cubique de dimensions (10x10x10) cm. Celles-ci doivent être bien centrées entre les plateaux afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.



**Figure 32:** éprouvette cubique placée entre les plateaux d'une presse hydraulique

On calcule la résistance à la compression par la relation :

$$R_c = F/S$$

$R_c$  : résistance à la compression (MPa).

$F$  : la charge de rupture (N).

$S$  : section de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).

### 5.2.2. Résistance à la traction (EN 12390-5) :

Cet essai a été réalisé conformément à norme EN 12390-5 - essai de résistance à la flexion en quatre points. La réalisation de cet essai se faisait sur une éprouvette prismatique de BCR. Les prismes avaient 280mm de longueur et 70 mm de hauteur et de largeur.

L'essai de résistance à la flexion a été réalisé sur tous les mélanges de BCR. L'essai a été réalisé à 7,14 et 28 jours

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

$$f_{cf} = \frac{F \cdot L}{d_1 \cdot d_2^2}$$

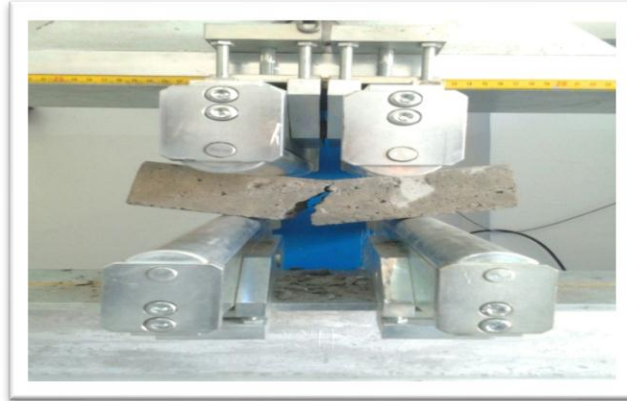
Où :

$f_{cf}$  : est la résistance en flexion, en méga pascals (newtons par millimètre carré);

$F$  : est la charge maximale, en newtons ;

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

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



**Figure 33:** Essais de flexion 4 points.

### 5.2.3. Mesure du retrait : [NF P15-433]

Cette essai est pour le but d'évaluer le retrait du béton à la cour du temps. On compare, à différents temps  $t$ , la variation de longueur d'une éprouvette  $8 \times 8 \times 28$  cm, par rapport à sa longueur à un temps  $t_0$  pris pour origine.

- Une salle maintenue à une température de  $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à  $50 \% \pm 5 \%$ .
- Des moules équipés de plots de retrait en laiton. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du béton puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes  $8 \times 8 \times 28$  sont donc munies à leurs deux extrémités de plots
- Un déformètre tel que celui montré sur la Équipé d'un comparateur permettant de réaliser Des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à  $0,001 \text{ mm}$  Une éprouvette de référence de  $280 \text{ mm}$  de Longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre Cette éprouvette en acier.



**Figure 34:** dispositif utilisé pour l'essai retrait

➤ **Conduite de l'essai :**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur l'éprouvette étalon en acier de longueur  $L = 300$  mm Soit  $dl(t)$  la valeur lue sur le comparateur au temps  $t$ ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:  $l=L+dl(t)$ .

Soit  $l(t_0)$  la longueur de l'éprouvette au temps  $t_0$  choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps  $t$  sera :

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0).$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par  $\varepsilon$  et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$  est obtenu en faisant la moyenne sur une éprouvette issue. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air,  $\Delta l(t)$  est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette

Chapitre V  
*Résultats et  
interprétations*



## 1. INTRODUCTION

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

## 2. EFFET DE CAOUTCHOUC SUR LES PROPRIETES DE BCR

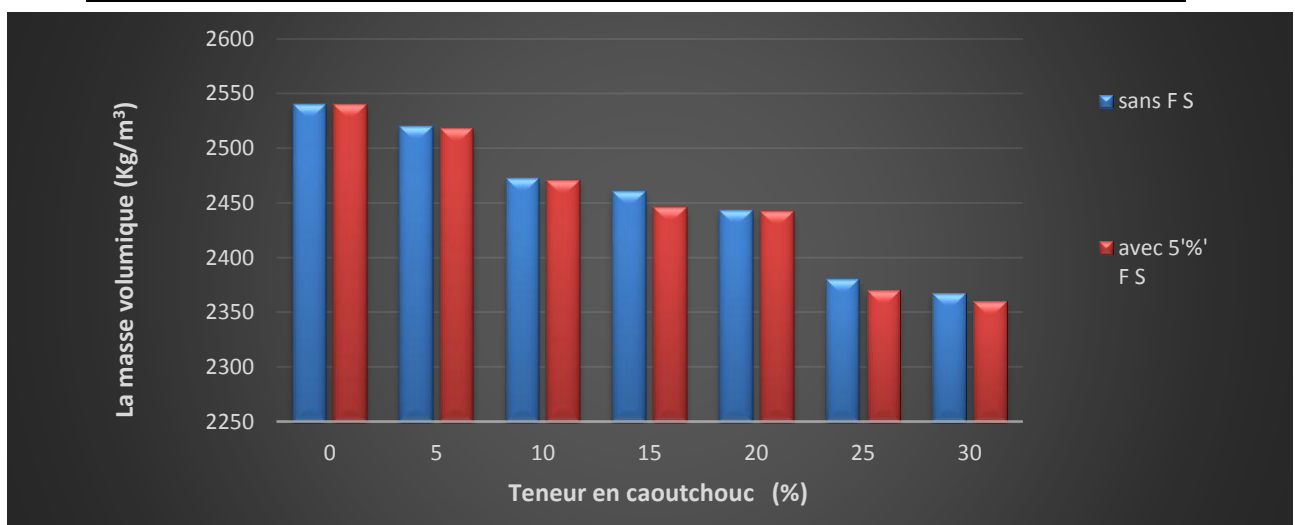
### 2.1. A l'état frais

#### 2.1.1. La masse volumique

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

**Tableau 30:** les résultats de la densité à l'état frais.

pourcentage de caoutchouc (%)		0	5	10	15	20	25	30
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Sans FS	2,540	2,520	2,472	2,461	2,443	2,380	2,367
	5% FS	2,540	2,518	2,471	2,446	2,442	2,370	2,360



**Figure 35:** Variation de la masse volumique en fonction de caoutchouc.

**Interprétation :**

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

D'après l'histogramme de la figure (V.1) on peut conclure que la substitution de 5% de poids de ciment par la fumée de silice influe un peu aussi négativement sur la densité du BCR ; ce qui est logique, car la grande finesse de fumée de silice nécessite une quantité plus d'eau pour être bien mélangé (c.-à-d. la fumée de silice consomme une quantité plus grande d'eau par rapport au ciment seul).

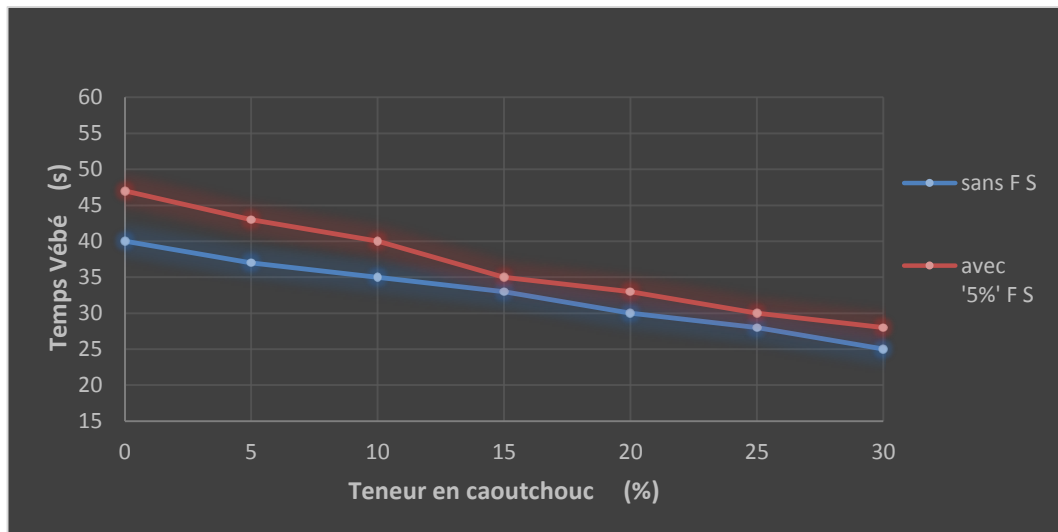
**2.1.2. La Maniabilité (Temps de compactage)**

On a mesuré le temps de compactage suivant la technique de vibro-compactage utilisant un chronomètre, le compactage se fait par deux couches, le temps de compactage se commence à  $t=0$  et ce temps sera noté juste après l'apparition d'un cordon de mortier entre la surcharge appliquée et l'éprouvette dans chaque couche.

Les résultats de temps de compactage, sont représentés ci-dessous

**Tableau 31:** *Temps Vébé en fonction de la teneur en caoutchouc.*

Pourcentage de caoutchouc (%)		0	5	10	15	20	25	30
Temps de compactage (S)	Sans FS	40	37	35	33	30	28	25
	Avec FS	47	43	40	35	33	30	28



**Figure 36:** Variation du temps de compactage de BCR.

### Interprétation

D'après cette courbe on peut remarquer que ;

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

En présence de fumée de silice le temps de compactage diminue également avec l'augmentation des concentrations de caoutchouc. Il est important de noter également que la procédure de compactage est très difficile lorsqu'on ajoute la fumée de silice, ce qu'explique la grande finesse de fumée de silice qui demande plus d'eau (surface spécifique  $15\text{m}^2/\text{gr}$ ).

## 2.2. Les résultats à l'état durci

Les essais effectués sur le béton durci concernent la résistance à la compression, la flexion, le retrait et l'absorption d'eau, dont les résultats sont représentés dans les sections ci-dessous.

### 2.2.1. La résistance à la compression

Les résultats obtenus sont des résultats de la résistance à la compression sur cube. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes ( $10\times 10\times 10$ ) cm à différents âges (7,14 et 28 jours), les résultats trouvés sont représentés sous forme des tableaux et histogrammes.

**Tableau 32:** les résultats de la résistance à la compression du béton avec différents pourcentages de caoutchouc

Age (jour)	caractéristique		Pourcentage de caoutchouc (%)								
			0	5	10	15	20	25	30		
7	Rc (MPa)	N° essai	1	33,07	25,16	24,32	13	12,81	13,7	10,75	
			2	29,12	29,07	22,54	15,36	15,64	12,28	10,37	
			3	39	30,15	23,45	19,71	9,66	18,55	13,84	
		moyenne	33,73	28,13	23,43	16,02	12,7	14,84	11,65		
	Densité	N° essai	1	2,499	2,476	2,414	2,456	2,339	2,273	2,262	
			2	2,464	2,345	2,44	2,431	2,4	2,325	2,287	
			3	2,486	2,462	2,416	2,442	2,46	2,2773	2,277	
		moyenne	2,483	2,427	2,423	2,443	2,399	2,291	2,275		
	14	Rc (MPa)	N° essai	1	38,79	30,18	27,06	19,21	11,66	15,32	9,4
				2	37,21	27,84	25,76	17,63	13,26	14,31	14,13
3				35,84	29,79	25,88	19,28	15,83	18,58	14,3	
moyenne			37,28	29,27	26,23	18,74	13,57	16,07	12,61		
Densité		N° essai	1	2,543	2,493	2,381	2,361	2,355	2,63	2,323	
			2	2,397	2,49	2,43	2,438	2,39	2,315	2,345	
			3	2,514	2,484	2,482	2,399	2,397	2,329	2,355	
		moyenne	2,484	2,489	2,431	2,399	2,380	2,424	2,341		
28		Rc (MPa)	N° essai	1	44,58	32,89	30,79	20,01	14,2	16,95	14,76
				2	38,73	30,75	27,39	24,35	16,48	17,89	14,45
	3			43,2	35,21	29,12	-	-	-	-	
	Moyenne		42,17	32,95	29,1	22,15	15,34	17,42	14,76		
	Densité	N° essai	1	2,548	2,501	2,414	2,401	2,412	2,409	2,375	
			2	2,531	2,495	2,432	2,458	2,365	2,403	2,312	
			3	2,501	2,529	2,464	-	-	-	-	
		moyenne	2,526	2,508	2,436	2,429	2,388	2,406	2,343		

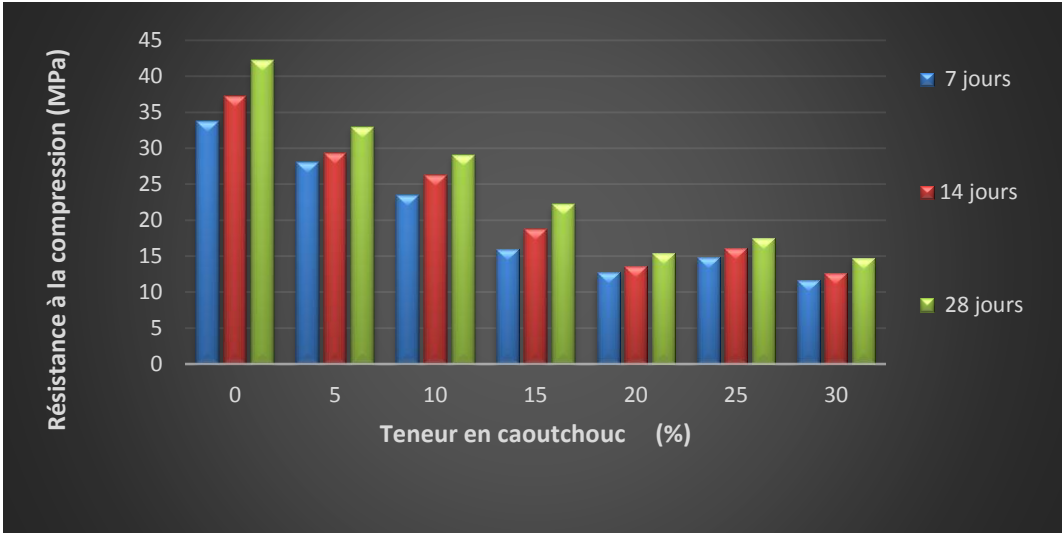
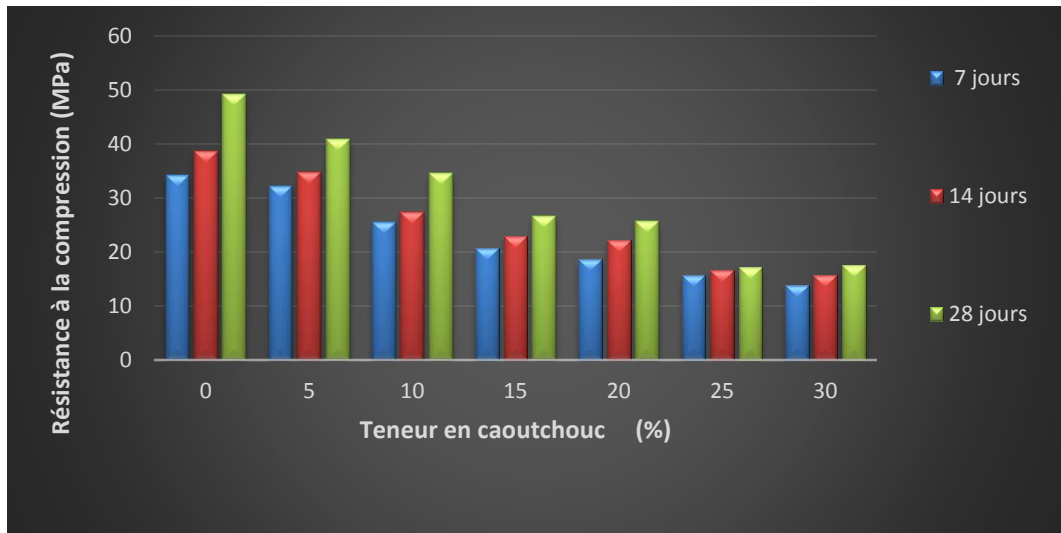


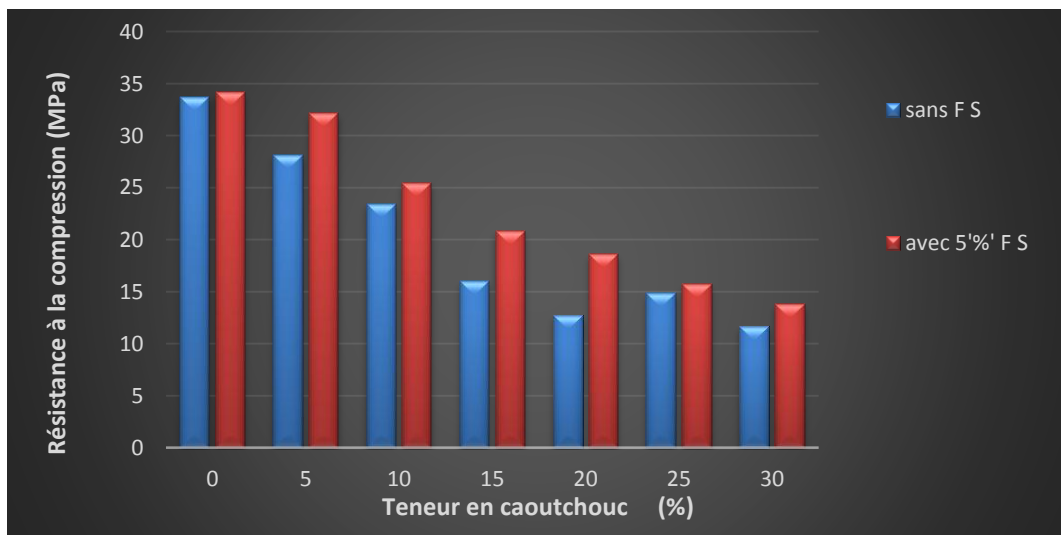
Figure 37: Résistance à la compression du BCR avec différents pourcentages de caoutchouc.

**Tableau 33:** Les résultats de la résistance à la compression du béton avec différents pourcentages de caoutchouc et 5% fumée de silice.

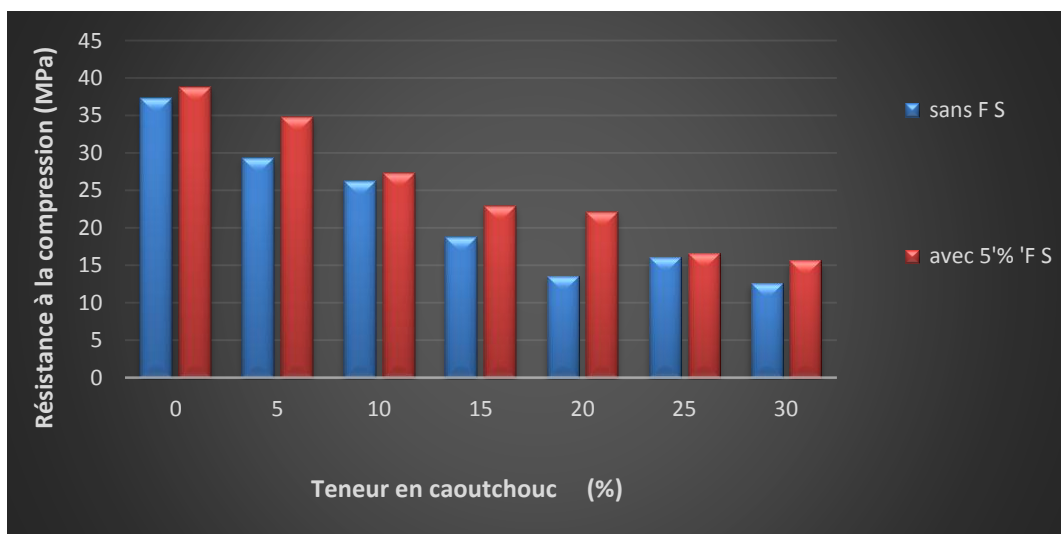
âge (jour)	caractéristique		Pourcentage de caoutchouc (%)							
			0	5	10	15	20	25	30	
7	Rc (MPa)	N° essai	1	34,67	33,6	27,82	22,16	21,7	15,91	11,67
			2	39,44	26,67	28,86	21,83	13,84	13,9	12,56
			3	28,45	35,77	19,64,	18,36	20,24	17,24	17
		moyenne	34,186	32,013	28,34	20,783	18,593	15,683	13,743	
	Densité	N° essai	1	2,466	2,46	2,402	2,39	2,39	2,345	2,32
			2	2,54	2,481	2,454	2,457	2,378	2,256	2,215
			3	2,51	2,418	2,47	2,39	2,381	2,35	2,225
		moyenne	2,505	2,453	2,442	2,412	2,383	2,317	2,253	
14	Rc (MPa)	N° essai	1	35,64	34,66	21,34	23,44	24,14	15,81	15
			2	40,24	33,26	29,32	21,91	21,5	16,44	14,25
			3	40,42	36,48	31,28	23,42	20,71	17,58	17,71
		moyenne	38,766	34,8	27,313	22,923	22,116	16,61	15,653	
	Densité	N° essai	1	2,476	2,459	2,406	2,479	2,361	2,373	2,316
			2	2,512	2,473	2,421	2,479	2,389	2,385	2,317
			3	2,501	2,543	2,411	2,496	2,397	2,331	2,235
		moyenne	2,496	2,491	2,412	2,484	2,382	2,363	2,289	
28	Rc (MPa)	N° essai	1	49,45	40	36,78	25,46	25,96	17,86	18,55
			2	48,78	41,27	32,45	27,86	25,46	16,28	16,45
			3	-	-	-	-	-	-	-
		moyenne	49,115	40,635	34,615	26,66	25,71	17,07	17,5	
	Densité	N° essai	1	2,453	2,486	2,453	2,431	2,379	2,314	2,356
			2	2,513	2,468	2,413	2,389	2,371	2,296	2,269
			3	-	-	-	-	-	-	-
		moyenne	2,483	2,477	2,433	2,41	2,375	2,305	2,269	



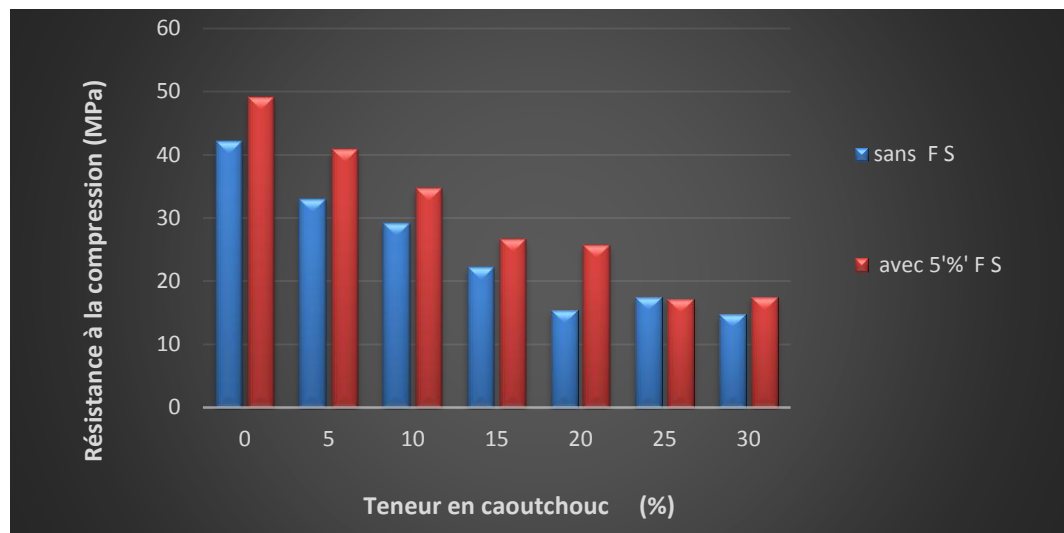
**Figure 38:** Résistance à la compression du BCR avec 5% fumée de silice



**Figure 39:** Résistance à la compression du BCR à 7 jours.



**Figure 40:** Résistance à la compression du BCR à 14 jours.



**Figure 41 :** Résistance à la compression du BCR à 28 jours.

### Interprétation :

D'après les tableaux (v.3) et (v.4) et les figures (v.3) et (v.4), On distingue que la résistance à la compression diminue lorsque le pourcentage de caoutchouc augmente dans tous les mélanges. En absence de fumée de silice, la résistance diminue de 42,17 jusqu'à 14,76 MPa lorsque le caoutchouc est ajouté avec taux de 30% (figure (V .4)). Pour les mélanges préparés à base de fumée de silice, la résistance diminue également avec l'augmentation de concentration de caoutchouc. La résistance diminue de 49,11 jusqu'à 17,5 MPa (figure (V .4))

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

D'après les histogrammes (v.5-7), ont constaté clairement pour tous les mélanges que la résistance à la compression augmente dans le temps, elle arrive de plus que 50%, A jeune âge, de la résistance maximale (à 28 jours), Cette augmentation est due par l'hydratation de la pâte de ciment au cours de temps sous le mode de conservation utilisé (conservation dans l'eau).

On remarque aussi que l'ajout de 5% de fumée de silice dans les mélanges influe sur la résistance à la compression positivement à différents âges, cette influence est apparue complètement après 28 jours car la fumée de silice est définie comme un ajout qui est dont l'effet observable à long terme , aussi que sa grande finesse joue un rôle très important dans les mélanges tel que le remplissage des vides entre les agrégats ainsi l'amélioration de la rhéologie.



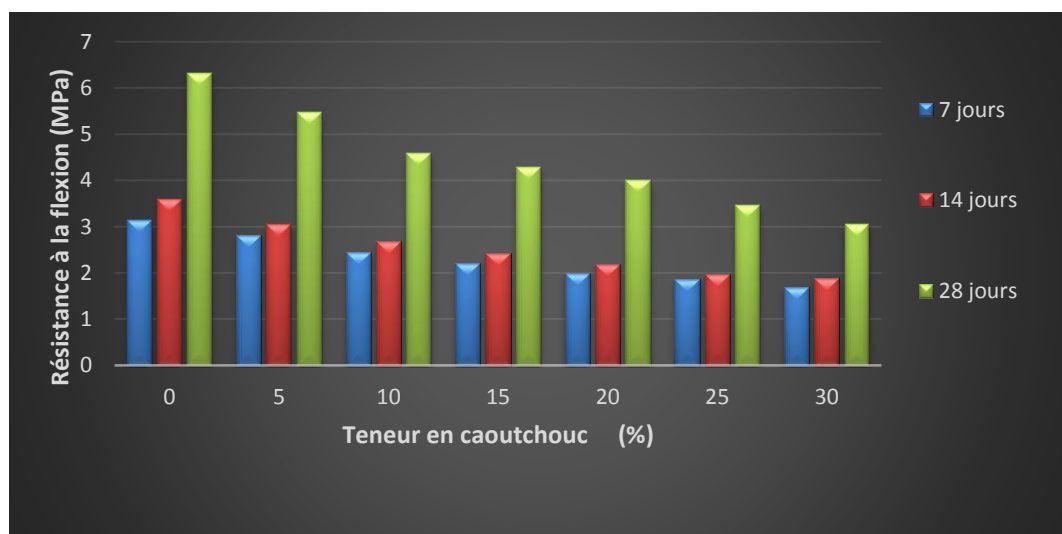
### 2.2.2. La résistance à la flexion

Les éprouvettes confectionnés pour cet essai sont des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm et le principe d'essai selon la norme EN 12390-5. Cet essai permet de déterminer la résistance en flexion de BCR qu'est soumise a un moment de flexion par application d'une charge.

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux (V.5), (V.6) être présentés dans les figures ci-dessous :

**Tableau 34:** les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc.

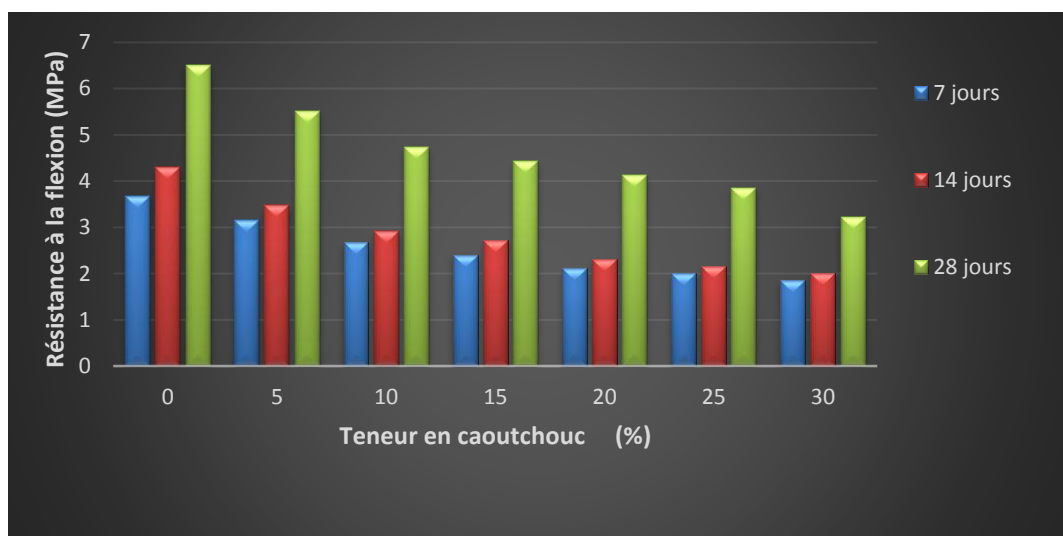
âge (jour)	caractéristique	Pourcentage de caoutchouc (%)						
		0	5	10	15	20	25	30
7	$R_f$	3,13	2,821	2,448	2,206	2	1,859	1,679
	densité	2,449	2,41	2,39	2,33	2,32	2,32	2,28
14	$R_f$	3,596	3,04	2,684	2,426	2,189	1,971	1,894
	densité	2,41	2,42	2,37	2,34	2,34	2,29	2,27
28	$R_f$	6,317	5,47	4,58	4,289	4	3,45	3,049
	densité	2,45	2,4	2,371	2,34	2,31	2,27	2,28



**Figure 42:** Résistance à la flexion du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc.

**Tableau 35:** Les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc et 5% fumée de silice

âge (jour)	caractéristique	Pourcentage de caoutchouc (%)						
		0	5	10	15	20	25	30
7	$R_f$	3,672	3,159	2,668	2,406	2,112	2,005	1,842
	densité	2,44	2,4	2,36	2,33	2,31	2,29	2,26
14	$R_f$	4,3	3,472	2,912	2,718	2,314	2,15	2,014
	densité	2,43	2,42	2,37	2,332	2,3	2,27	2,266
28	$R_f$	6,512	5,5	4,737	4,434	4,13	3,85	3,217
	densité	2,42	2,4	2,37	2,324	2,302	2,288	2,27



**Figure 43:** Résistance à la flexion du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc et 5% fumée de silice

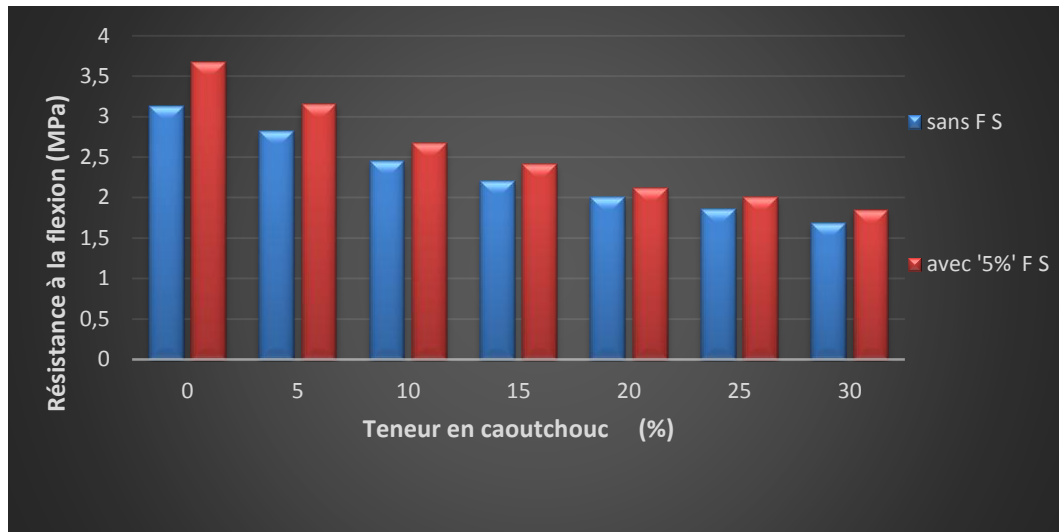


Figure 44: Résistance à la flexion du BCR à 7 jours

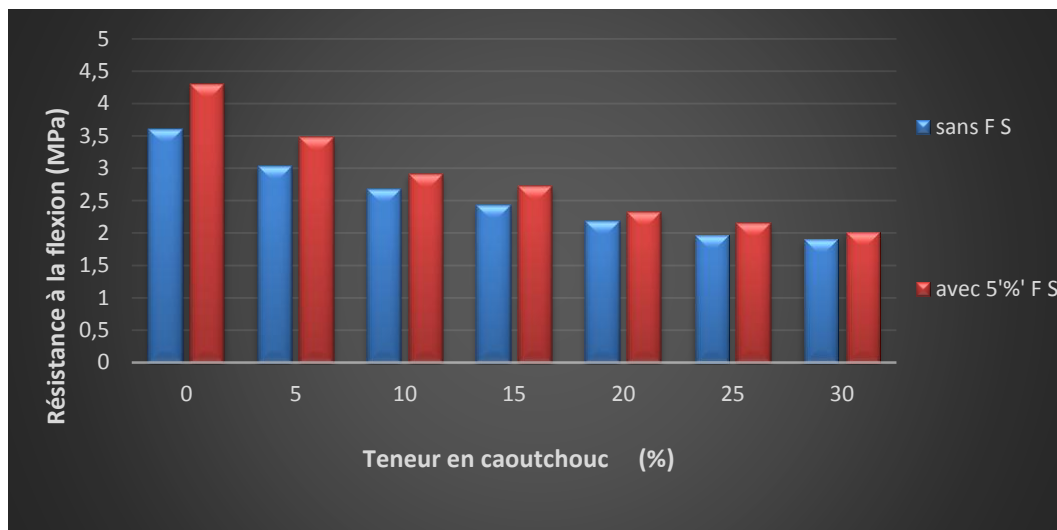


Figure 45: Résistance à la flexion du BCR à 14 jours

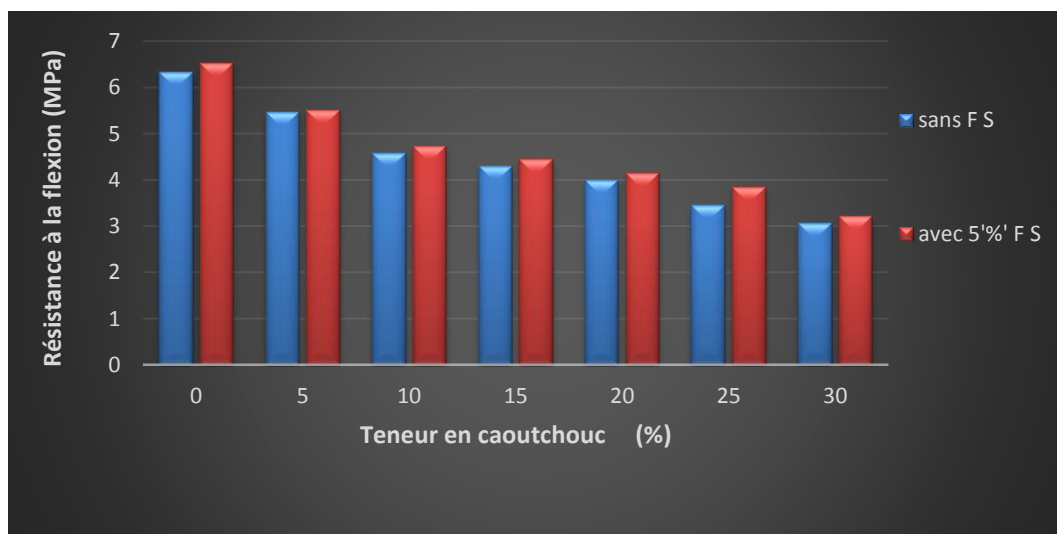


Figure 46: Résistance à la flexion du BCR à 28 jours

**Interprétation :**

D'après les tableaux (v.5) et (v.6) et les histogrammes (v.8) et (v.9) précédents :

On constate que la résistance à la flexion diminue pour tous les mélanges avec l'augmentation de pourcentage du caoutchouc. De 6,317 jusqu'à 3,049 MPa pour le mélange sans fumée de silice (figure (v.8)), et de 6,512 jusqu'à 3,217 MPa pour le mélange avec 5% fumée de silice (figure (v.9)). Cette réduction de la résistance à la flexion due par la faible densité des granulats de caoutchouc par rapport aux agrégats minéraux. Ce dernier impliquée une faible compacité du squelette granulaire du caoutchouc.

La résistance à la flexion augmente par le temps (7, 14 et 28 jours) dans tous les mélanges jusqu'à 6,31MPa Pour les mélanges sans fumée de silice (la figure (v.8)) et jusqu'à 6,512 MPa Pour les mélanges avec l'ajout de 5% de fumée de silice (La figure (v.9)). Ceci montré par l'hydratation de la pâte de ciment (milieu de conservation 100% humide) ainsi due à l'effet de cohésion mécanique générée par le compactage

Les figures (v.10-12) permettent de bien visualiser l'influence de L'addition de 5% de la fumée de silice sur la valeur de la résistance à la flexion, ce dernier augmenté plus dans les mélanges avec la fumée de silice que les mélanges sans fumée de silice.

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

**Note :** la variation dans le pourcentage du caoutchouc de 0% à 30% implique aussi la variation dans la valeur de la résistance à la flexion avec la même manière précédente.

**Remarque :**

On a remarqué pendant la réalisation des essais que le mode de rupture a été affecté par l'incorporation de caoutchouc et les fissures sont inversement proportionnelles au dosage des agrégats en caoutchouc dans le mélange (figure V.13). En présence de caoutchouc, le BCR devient ductile ce qui permet d'éviter la rupture brutale des chaussées et les particules de caoutchouc jouent le rôle des fibres pour la couture des fissures. Vue l'absence des moyens de visualisation et de contrôle dans notre laboratoire on n'a pas pu suivre ce phénomène dans l'essai de compression.



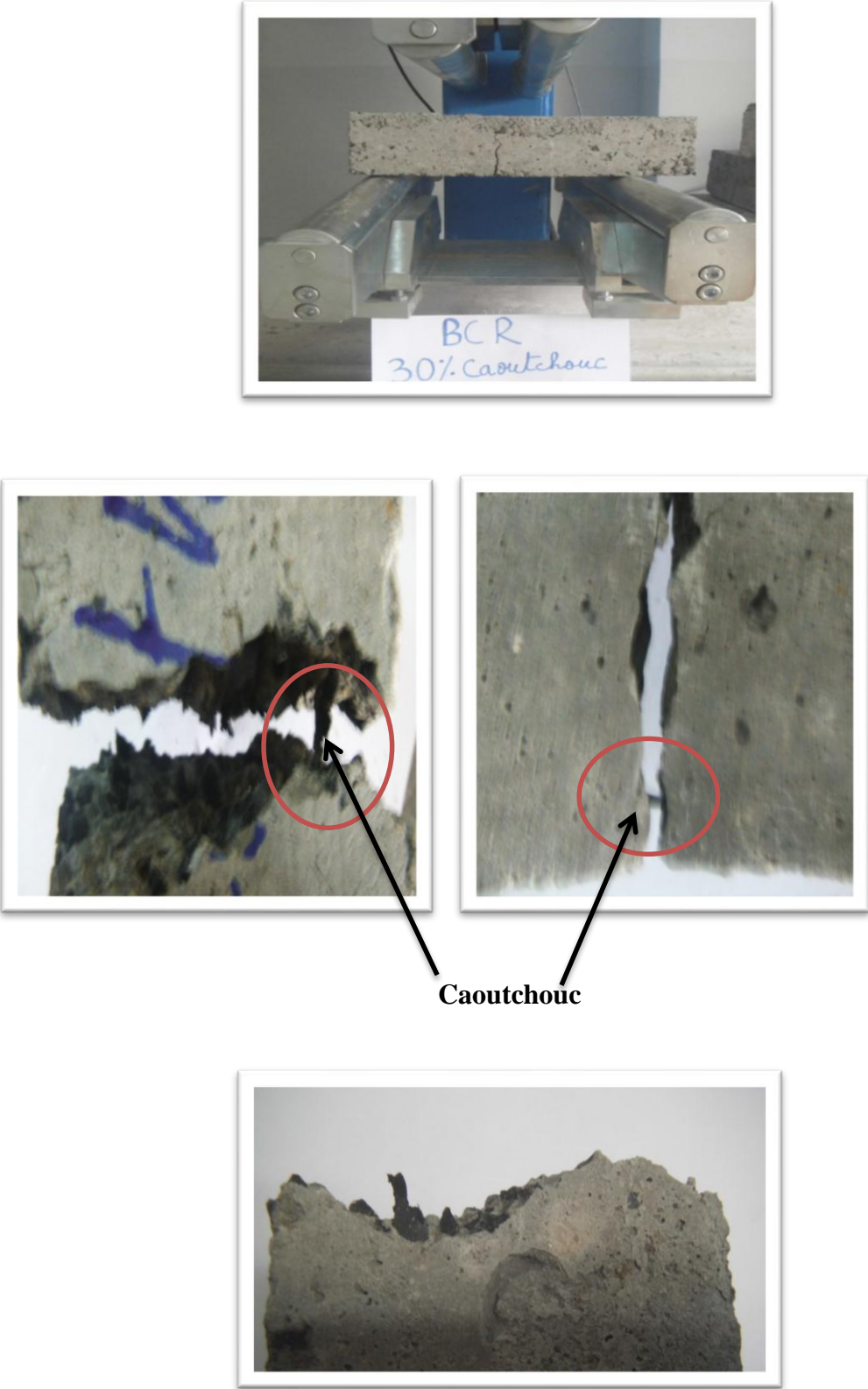


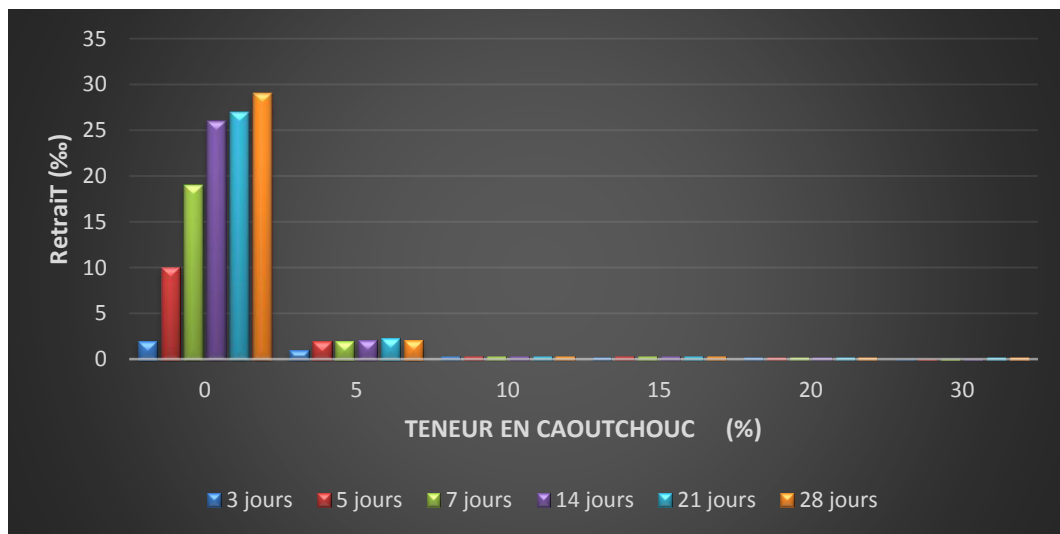
Figure 47: L'état de rupture de chaque pourcentage de caoutchouc.

### 2.2.3. Retrait

On a utilisé dans cet essai des mélanges contenant (0, 5, 10, 15, 20, 30%) de caoutchouc Les résultats soutirés sont regroupés dans les tableaux suivant :

**Tableau 36:** Evolution du retrait de BCR.

Caoutchouc (%)	03j(‰)	05j(‰)	07j(‰)	14j(‰)	21j(‰)	28j(‰)
<b>0</b>	2	10	19	26	27	29
<b>5</b>	1	1,9	2	2,1	2,3	2,1
<b>10</b>	0,27	0,29	0,29	0,3	0,33	0,33
<b>15</b>	0,25	0,26	0,28	0,28	0,29	0,3
<b>20</b>	0,18	0,19	0,19	0,2	0,21	0,21
<b>30</b>	0,1	0,12	0,12	0,14	0,17	0,17



**Figure 48:** retrait du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc

### Interprétation

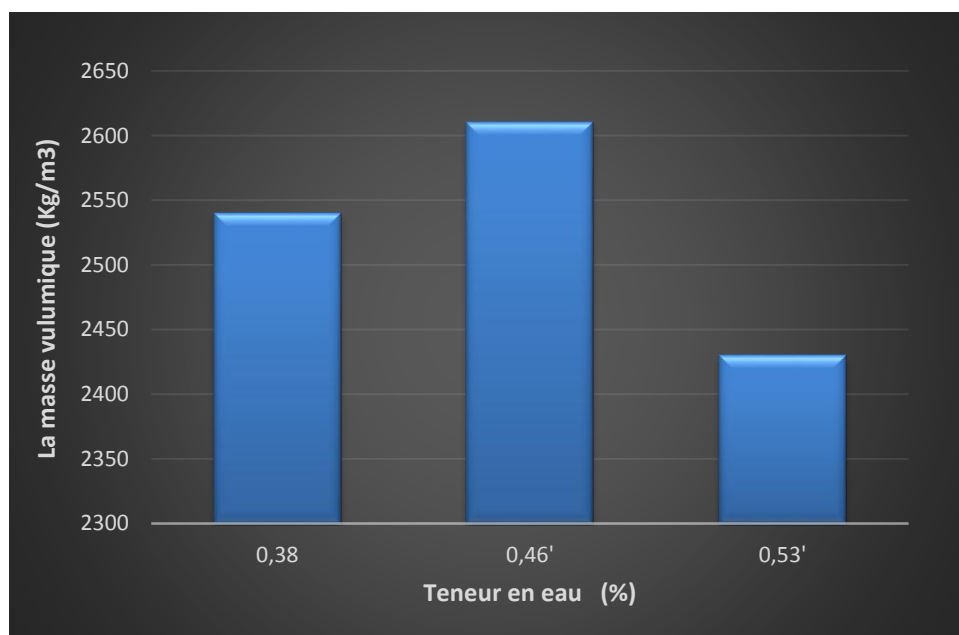
D'après la figure on conclue que le retrait de BCR faible et va diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de caoutchouc, cette diminution peut expliquer par l'effet de caoutchouc.

### 3. AMILIORATION DE L'ULILISATION DE FUMEE DE SILICE

D'après les résultats précédents on a dit que la fumée de silice nécessite une quantité d'eau plus. Car elle entré dans les réactions chimique à cause de son nature active, ci pour ça on a proposé l'expérience suivante, basée sur l'augmentation de la teneur en eau de 5% jusqu' à 7% pour avoir l'effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression, les résultats représenté sou forme un tableau est des figure pour faciliter leur interprétation

**Tableau 37:** les résultats de la densité à l'état frais.

Rapport (E /C)	0,38	0,46	0,53
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	2540	2610	2430

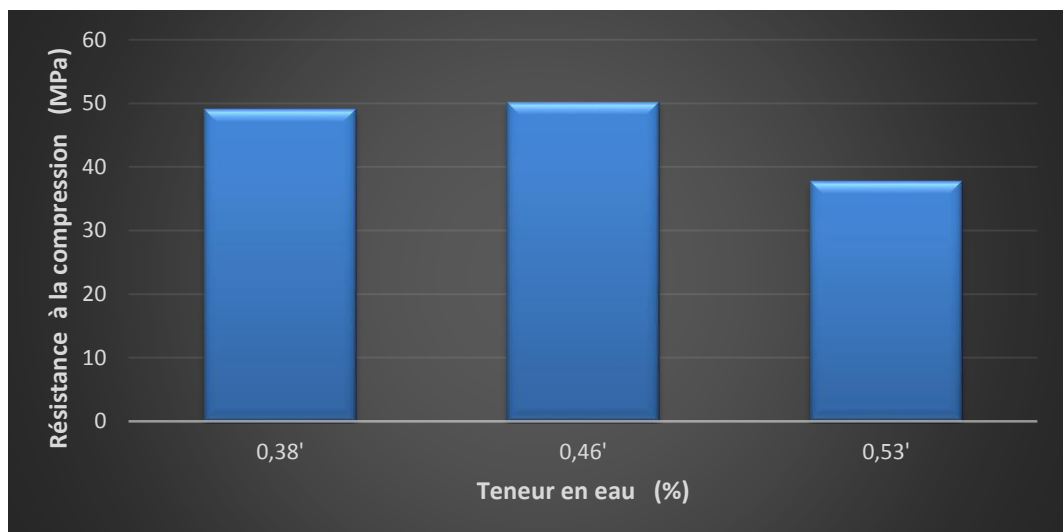


**Figure 49:** Variation de la densité du BCR avec l'ajout de 5% fumée de silice en fonction de E/C.



**Tableau 38:** les résultats de la résistance à la compression du béton avec l'ajout de 5% fumée de silice

âge (jour)	caractéristique			E /C		
				0.38	0.46	0.53
28	Rc (MPa)	N° essai	1	49,45	48,11	35,78
			2	48,78	50,66	37,56
			3	-	51,77	39,88
		moyenne	49,115	50,18	37,74	
	Densité	N° essai	1	2,453	2,49	2,43
			2	2,513	2,51	2,4
			3	-	2,50	2,388
		moyenne	2,483	2,50	2,4	



**Figure 50:** Résistance à la compression du BCR avec l'ajout de 5% fumée de silice à 28 jours

## Interprétation

La figure v.17 montre que l'ajout de fumée de silice avec la valeur de rapport E/C = 0,46 peut donner une densité grande que E/C=0,38 et 0,53 car l'ajout de 5% fumée de silice dans le mélange nécessite plus de E/C=0,38 mais une valeur supérieure de 0,46 permet d'obtenir une faible densité ceci est expliqué par l'optimum Proctor

D'après la figure v. on constate que l'augmentation de E/C dans un mélange contenant 5% fumée de silice influe sur la résistance à la compression est le meilleur résultat obtenue par le rapport E/C= 0.46

Ce qu'explique que la fumée de silice trouve une quantité d'eau suffisante pour fait leur réaction chimique et joué leur rôle correctement. Mais l'augmentation de  $E/C=0,53$  influe sur la consistance de béton. Une mal consistance implique un mal compactage qui lui-même influe sur la résistance à la compression.

#### 4. LES TRAITEMENTS

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

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

On a choisi le pourcentage 10%, 20%, 30% pour le traitement, ce traitement dont le but de confirmer la théorie proposée précédemment (faible adhérence entre liant-caoutchouc).

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

Les éprouvettes confectionnés sont des éprouvettes cylindriques (10x10 x10) cm pour l'essai de compression et prismatiques (7 x 7x 28) cm pour la flexion, l'âge d'écrasement est 14 ,28 jours.

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

##### 4.1. Traitement par la résine

L'objectif d'utiliser le traitement par la résine est l'obtention des surfaces de caoutchouc rugueuses. La résine qu'on a utilisée est 'MEDAPOXY AL', elle est fournie sous forme de kit pré dosé en deux composants :-

- ✓ Élément A : Résine.
- ✓ Élément B : durcisseur.

Le rôle de cette résine, c'est comme une colle entre les grains de caoutchouc et le sable. Ce dernier peut donner plus de rugosité dans caoutchouc .c'est pour cela qu'on utilise la résine 'MEDAPOXY AL''

#### 4.1.1. L'opération

- On a utilisé 1.3 kg de résine et 470 ml de durcisseur pour 9 kg de caoutchouc
- On a pris une quantité suffisante de caoutchouc puis on l'a mélangé avec la résine

Comme il est montré dans la figure ci-dessous



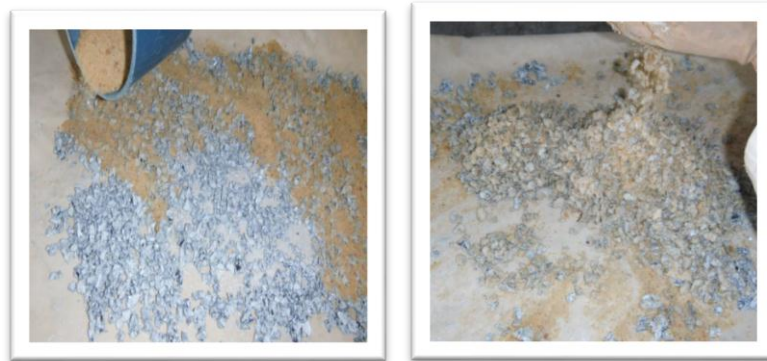
**Figure 51:** *mélange la résine avec le caoutchouc*

- on a ajouté le durcisseur dans le mélange avant dès les biens mélangés.



**Figure 52:** *mélange le durcisseur avec le caoutchouc et la résine*

- enfin on a ajouté le sable est puis on a mélangé l'ensemble (caoutchouc, sable, résine)



**Figure 53:** *mélanger l'ensemble*

- Faire attendre 24 heures avant l'utilisation



**Figure 54:** *le caoutchouc va reposer.*



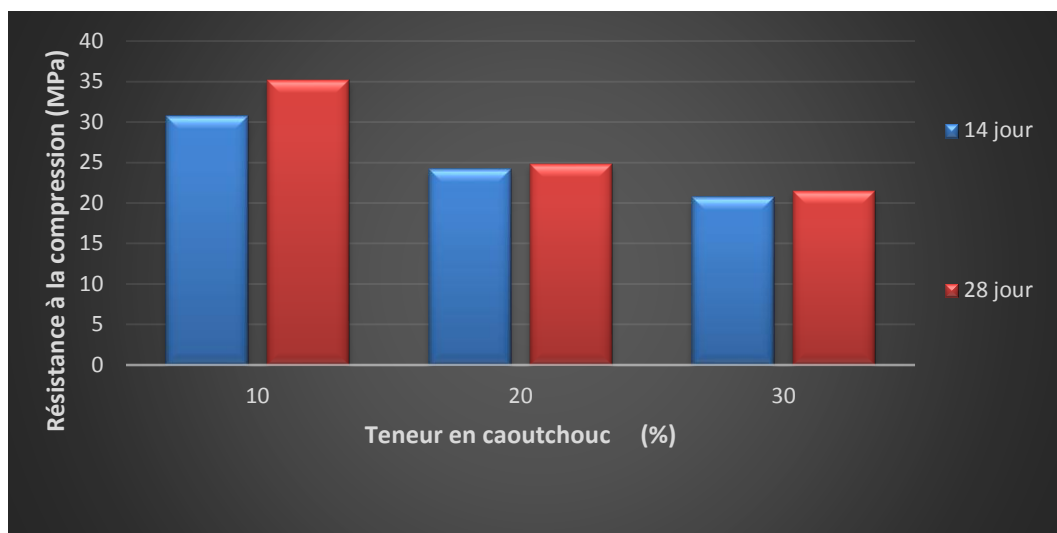
**Figure 55:** *le caoutchouc après 24 heures.*

## 4.1.2. Les résultat à la Compression

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

**Tableau 39:** les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine

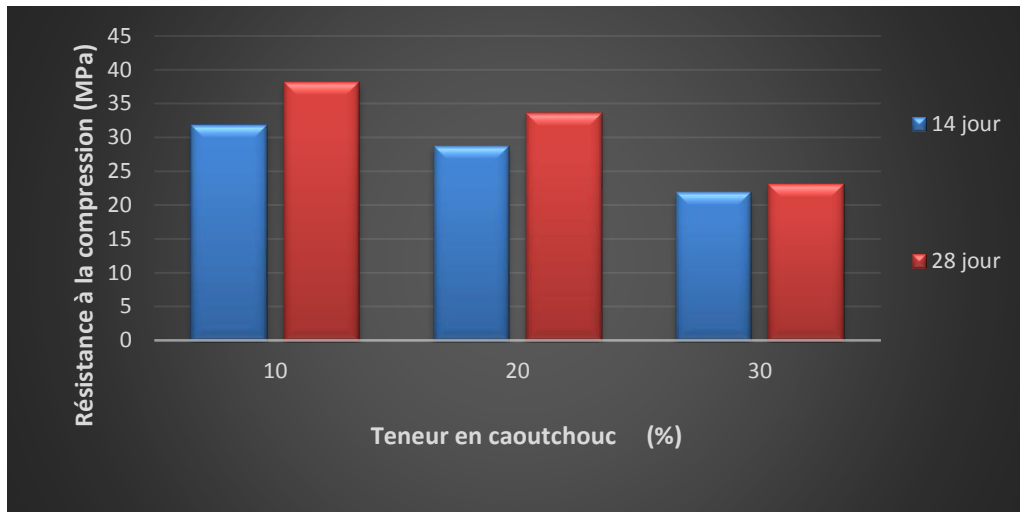
âgé (jour)	caractéristique		Pourcentage de caoutchouc (%)			
			10	20	30	
14	Rc (MPa)	N° essa i	1	27,35	26,21	22,02
			2	30,6	24,12	18,52
			3	34,21	22,14	21,65
		moyenn e	30,72	24,156	20,73	
	Densité	N° essa i	1	2,496	2,41	2,354
			2	2,434	2,39	2,409
			3	2,44	2,383	2,394
		moyenn e	2,45	2,39	2,38	
28	Rc (MPa)	N° essa i	1	34,03	30,59	22,79
			2	36,4	19,02	20
			3	-	-	-
		moyenn e	35,215	24,805	21,395	
	Densité	N° essa i	1	2,486	2,466	2,456
			2	2,45	2,418	2,318
			3	-	-	-
		moyenn e	2,46	2,44	2,387	



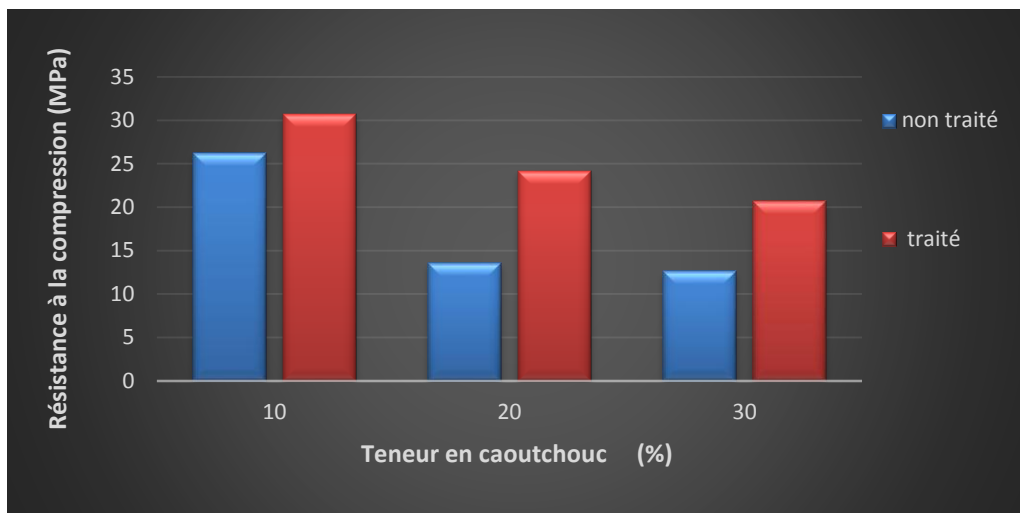
**Figure 56:** Résistance à la compression du BCR en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par la résine

**Tableau 40:** les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par résine et 5% fumée de silice

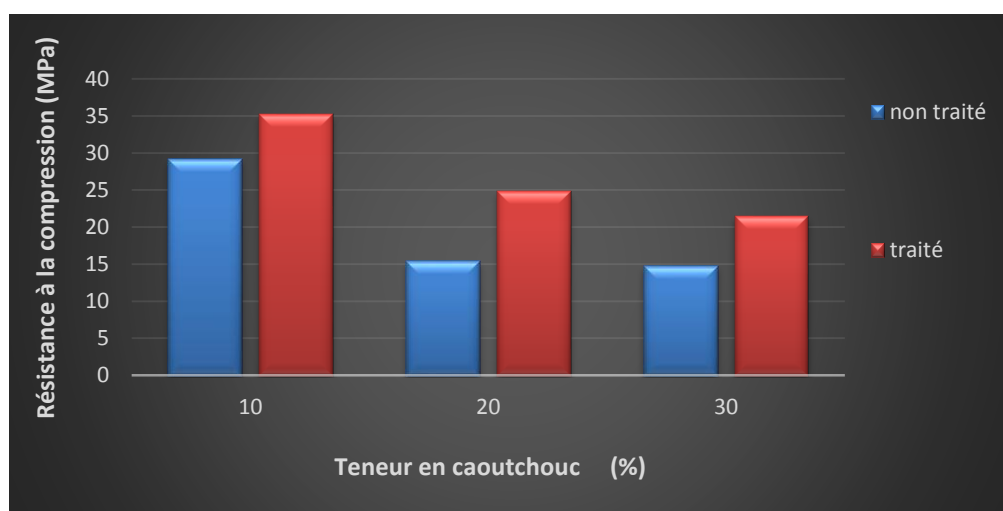
âgé (jour)	caractéristique			Pourcentage de caoutchouc (%)		
				10	20	30
14	Rc (MPa)	N° essai	1	31,61	28,44	19,76
			2	28,43	28,21	20,7
			3	35,4	29,57	25,34
		moyenne	31,81	28,74	21,93	
	Densité	N° essai	1	2,51	2,387	2,419
			2	2,437	2,474	2,379
			3	2,428	2,478	2,388
moyenne		2,46	2,44	2,395		
28	Rc (MPa)	N° essai	1	46,33	33,28	23,45
			2	30,11	33,97	22,75
			3	-	-	-
		moyenne	38,22	33,625	23,1	
	Densité	N° essai	1	2,475	2,444	2,335
			2	2,449	2,406	2,338
			3	-	-	-
moyenne		2,462	2,42	2,33		



**Figure 57:** Résistance à la compression du BCR avec 5% fumée de silice en fonction de pourcentage de caoutchouc traité par la résine



**Figure 58:** Résistance à la compression du BCR à 14 jours



**Figure 59:** Résistance à la compression du BCR à 28 jours

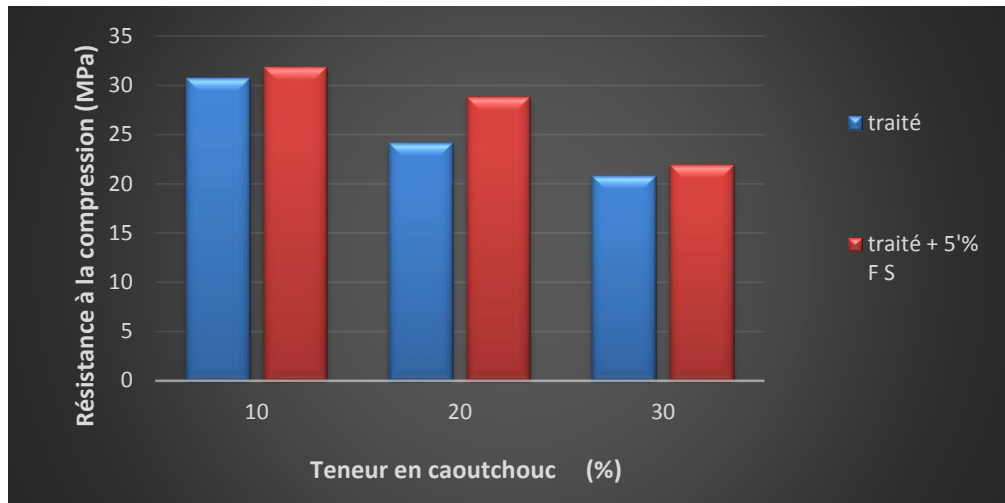


Figure 60: Résistance à la compression du BCR à 14 jours.

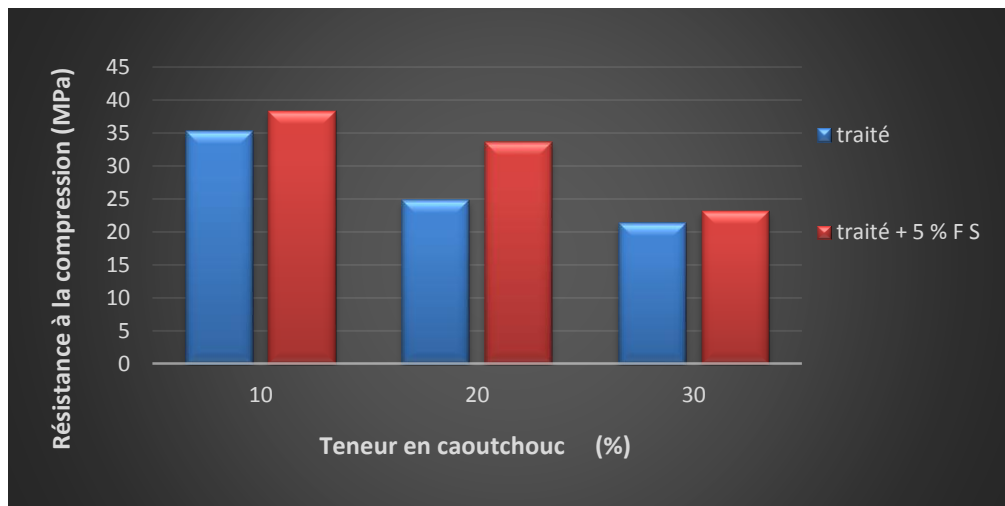


Figure 61: Résistance à la compression du BCR à 28 jours

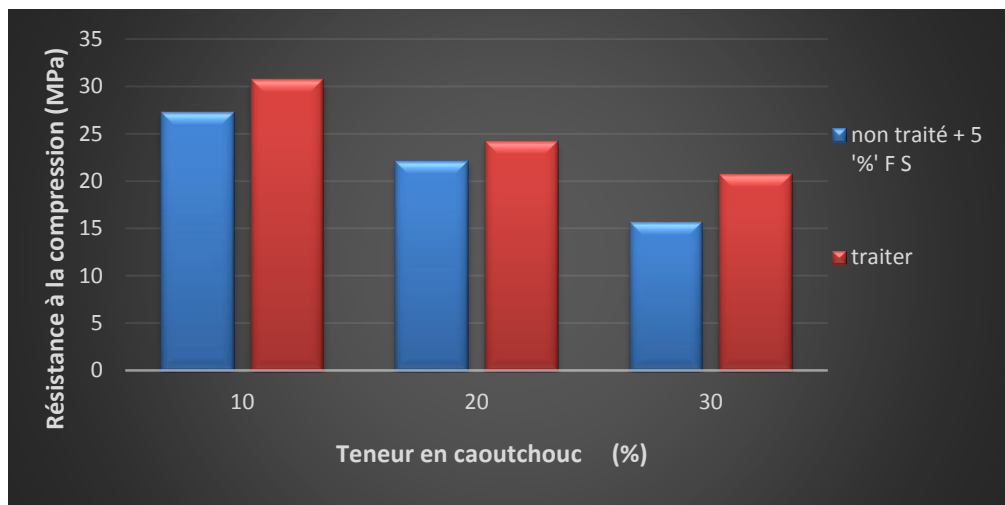
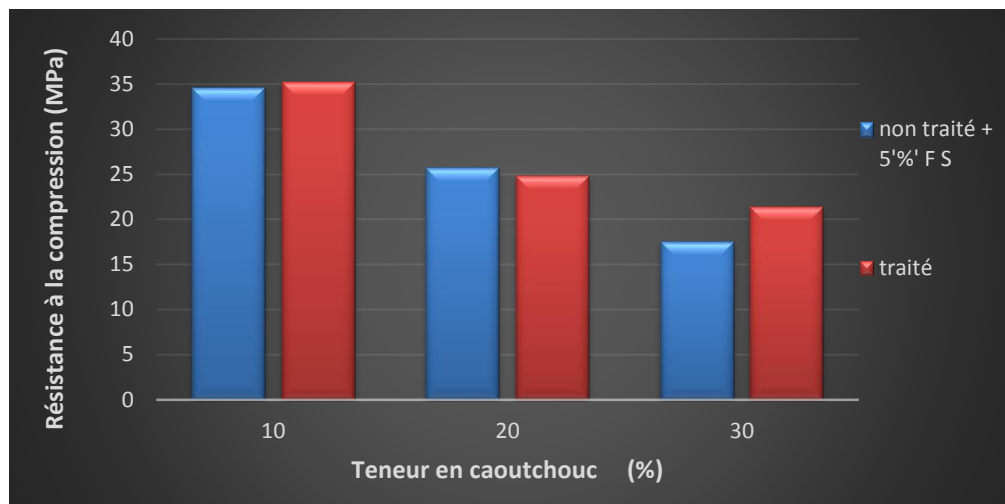


Figure 62: Résistance à la compression du BCR à 14 jours





**Figure 63:** Résistance à la compression du BCR à 28 jours.

### Interprétation :

Comme on a vu dans les précédentes expériences, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc, elle s'augmente aussi plus en plus au cours du temps et même avec l'ajout de fumée de silice, alors c'est ce qu'on a trouvé là (dans cette expérience) voir la figure (v.22) (v.23).

Maintenant on a besoin de faire comparer les résultats de chaque une de ces expériences.

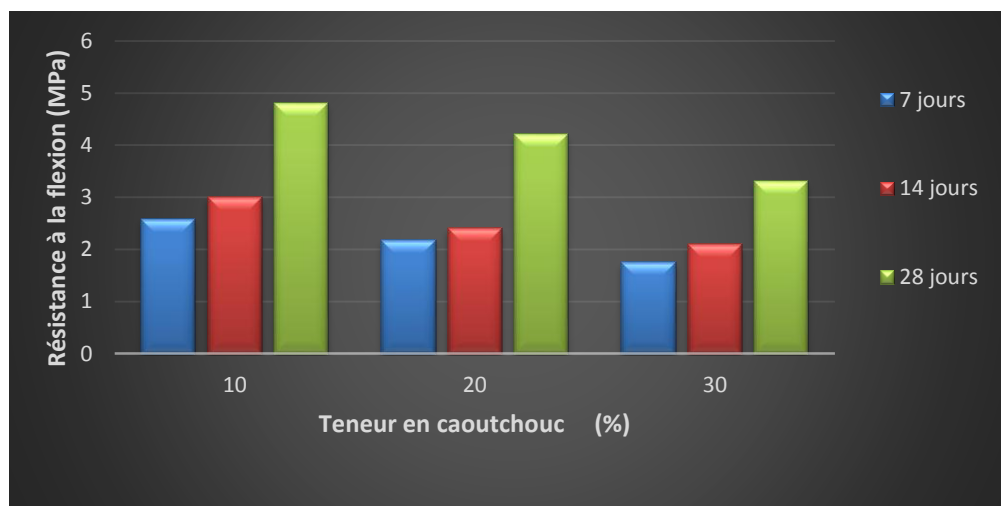
la résistance à la compression augmente plus avec le caoutchouc traité qu'avec le caoutchouc non traité voir la figure (v.24) (v.25) et ça à cause de la rugosité produite par le traitement avec la résine et son effet positif sur les surfaces lisses du caoutchouc cette dernière va élever l'adhérence entre liant-caoutchouc .

la résistance à la compression s'augmente plus avec le caoutchouc traité par la résine qu'avec le caoutchouc plus la fumée de silice voir la figure (v.28-29), cela peut être causée par la rugosité produite du traitement avec la résine sur les surface de caoutchouc qui va faire augmenter plus la compacité du squelette granulaire sou l'effet compactage par rapport celui-ci dans les mélanges avec la fumée de silice.

## 4.1.3. Les résultats à la flexion

**Tableau 41:** les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par la résine.

âge (jour)	caractéristique	Pourcentage de caoutchouc (%)		
		10	20	30
7	<b>R<sub>f</sub></b>	2,587	2,18	1,751
	<b>densité</b>	2,38	2,33	2,29
14	<b>R<sub>f</sub></b>	3	2,394	2,1
	<b>densité</b>	2,36	2,34	2,28
28	<b>R<sub>f</sub></b>	4,8	4,2	3,3
	<b>densité</b>	2,39	2,33	2,27



**Figure 64:** Résistance à la flexion du BCR.

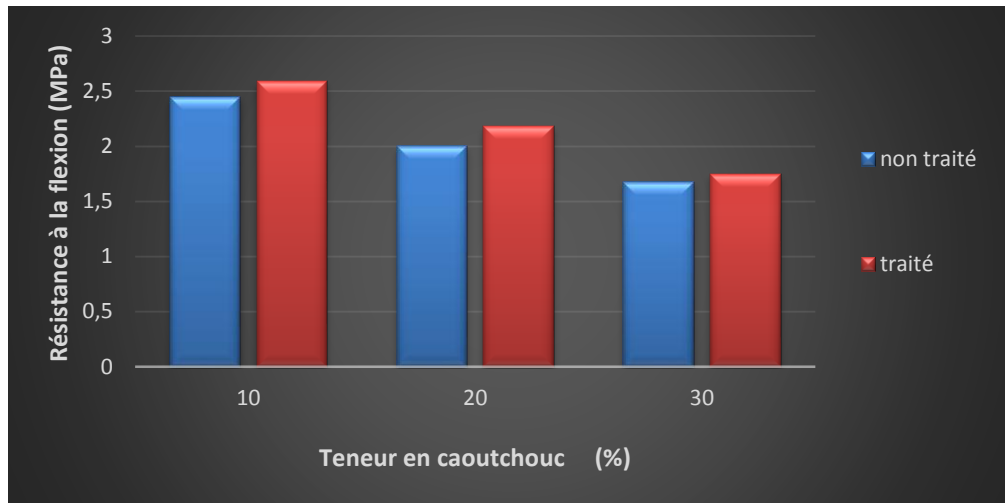


Figure 65: Résistance à la flexion du BCR à 7 jours.

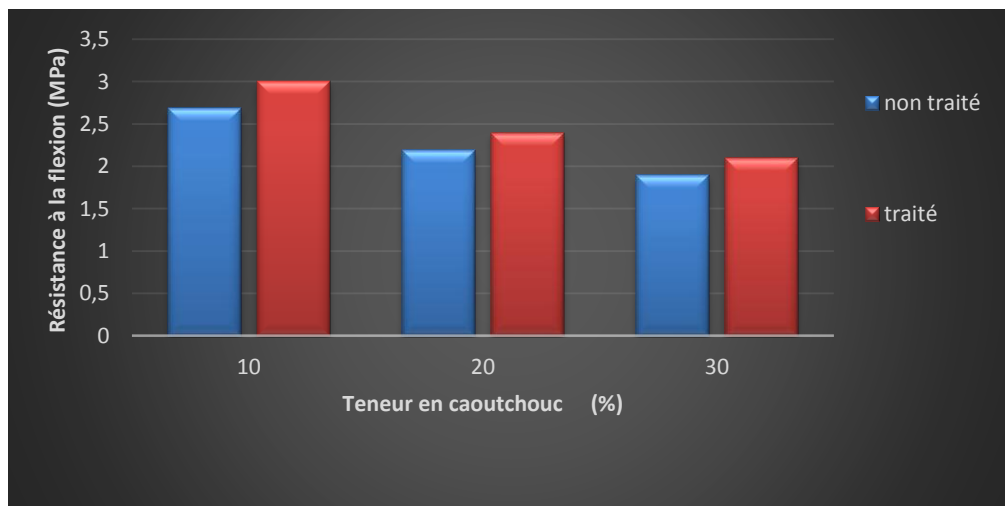


Figure 66: Résistance à la flexion du BCR à 14 jours.

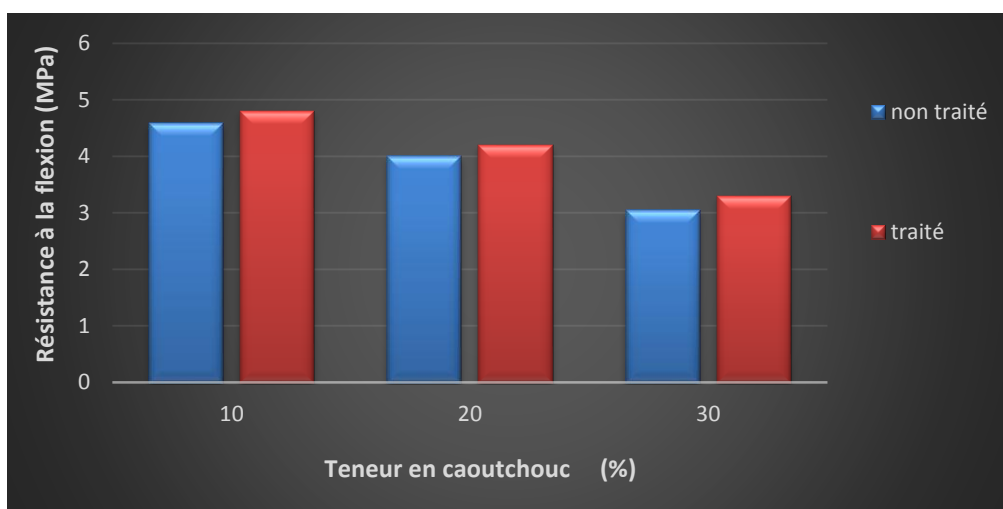
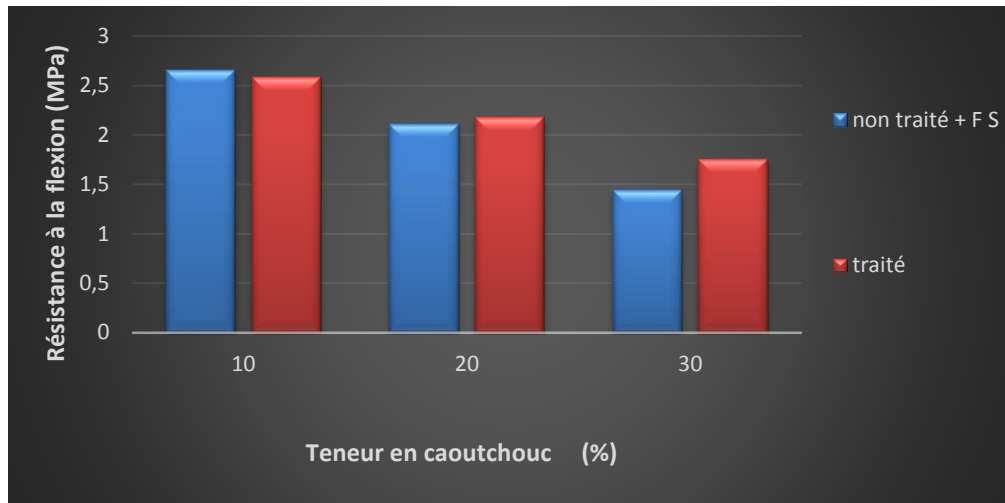
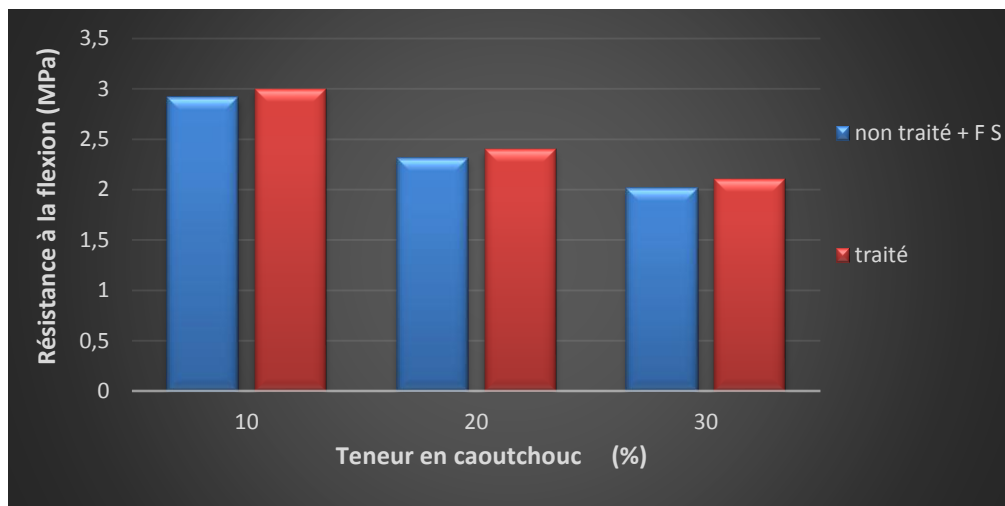


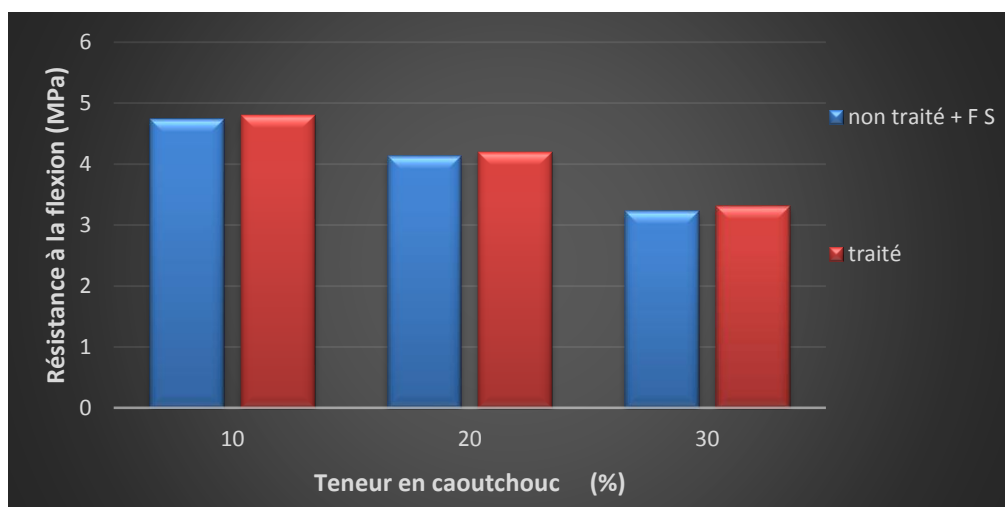
Figure 67: Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.



**Figure 68:** Résistance à la flexion du BCR à 7 jours



**Figure 69:** Résistance à la flexion du BCR à 14 jours



**Figure 70:** Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.

## Interprétation

D'après les essais précédents on a déjà trouvé que la résistance à la flexion se diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc, et qu'elle s'augmente aussi plus en plus au cours du temps voir la figure (v.30).

Maintenant on va faire comparer les résultats de chaque une de ces expériences.

La résistance à la flexion s'augmente plus avec le caoutchouc traité qu'avec le caoutchouc non traité voir la figure (v.31-33) et ça à cause de la rugosité produite par le traitement avec la résine ,cette rugosité va élever l'adhérence entre liant-caoutchouc.

La résistance à la flexion s'augmente plus avec le caoutchouc traité par la résine qu'avec le caoutchouc plus la fumée de silice voir la figure (v.34-36). Peut-être causé par la rugosité produite par le traitement avec la résine augmenté la compacité du squelette granulaire et amélioré l'adhérence entre liant-caoutchouc sou l'effet de compactage qu'avec l'ajout de fumée de silice.

## 4.2. Traitement par NaOH

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

### 4.2.1. L'opération

- Préparer une solution de NaOH à une concentration 10%
- immerger une quantité suffisante de caoutchouc dans cette solution pendant 24 heures
- après 24 heures, faire laver cette quantité de caoutchouc pour Neutraliser leur concentration
- sécher le caoutchouc avant leur utilisation

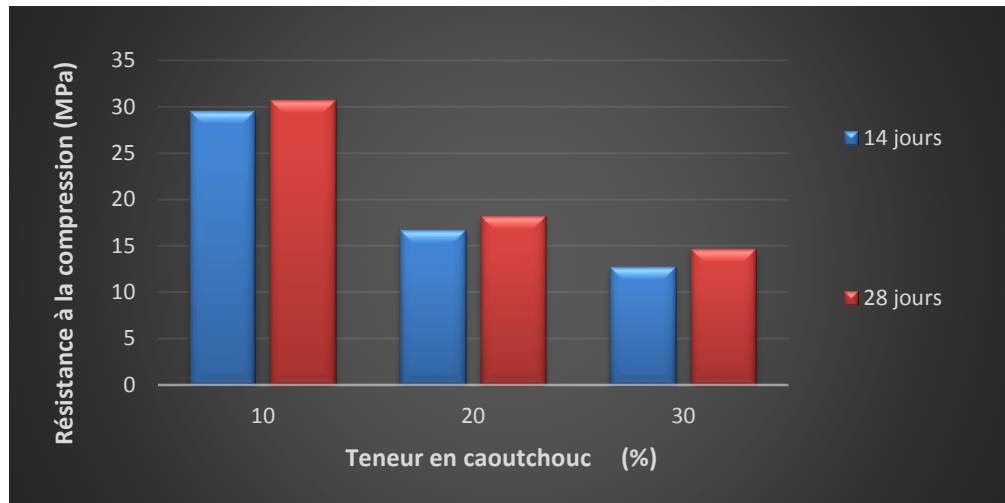


**Figure 71:** Caoutchouc traité par NaOH

#### 4.2.2. Les résultats à la Compression

**Tableau 42:** les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par NaOH.

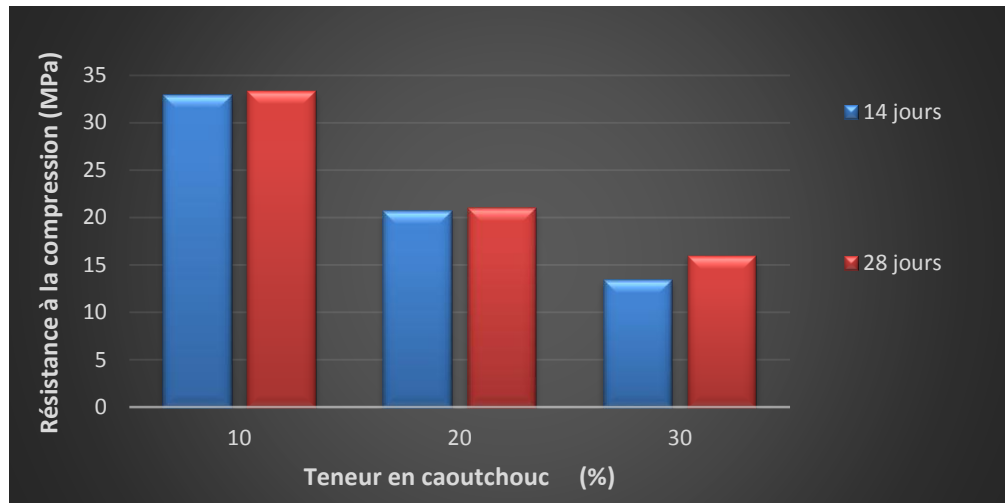
âgé (jour)	caractéristique			Pourcentage de caoutchouc (%)		
				10	20	30
14	Rc (MPa)	N° essai	1	29,48	16,38	13,53
			2	33,1	18,3	12,36
			3	26,46	15,53	12,24
		moyenne	29,68	16,73	12,71	
	Densité	N° essai	1	2,456	2,421	2,343
			2	2,65	2,402	2,362
			3	2,428	2,356	2,385
		moyenne	2,512		2,372	
28	Rc (MPa)	N° essai	1	29,7	18,5	14,67
			2	30,11	19,89	14,74
			3	32,2	16,13	14,3
		moyenne	30,67	18,17	14,57	
	Densité	N° essai	1	2,443	2,354	2,321
			2	2,422	2,364	2,314
			3	2,431	2,431	2,456
		moyenne	2,445	2,383	2,36	



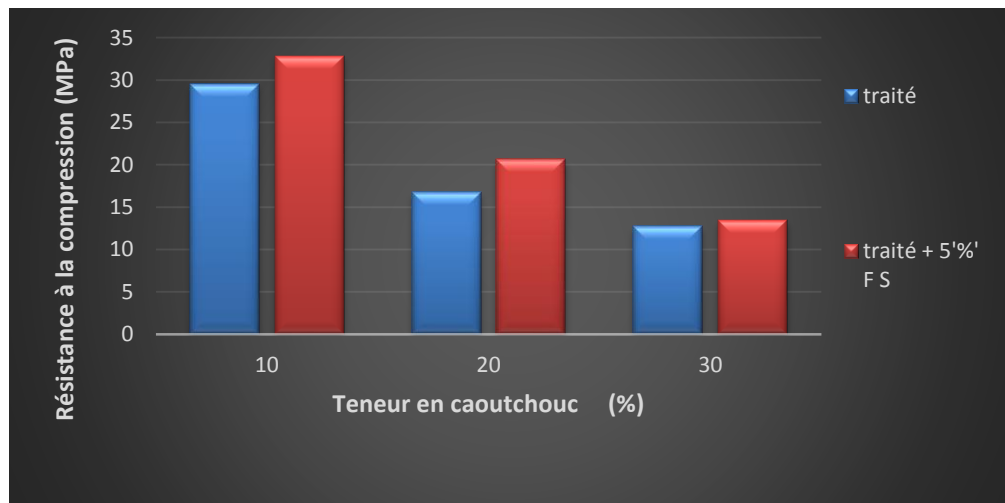
**Figure 72:** Résistance à la compression du BCR en fonction de caoutchouc traité par NaOH

**Tableau 43:** les résultats de la résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par NaOH et 5% fumée de silice

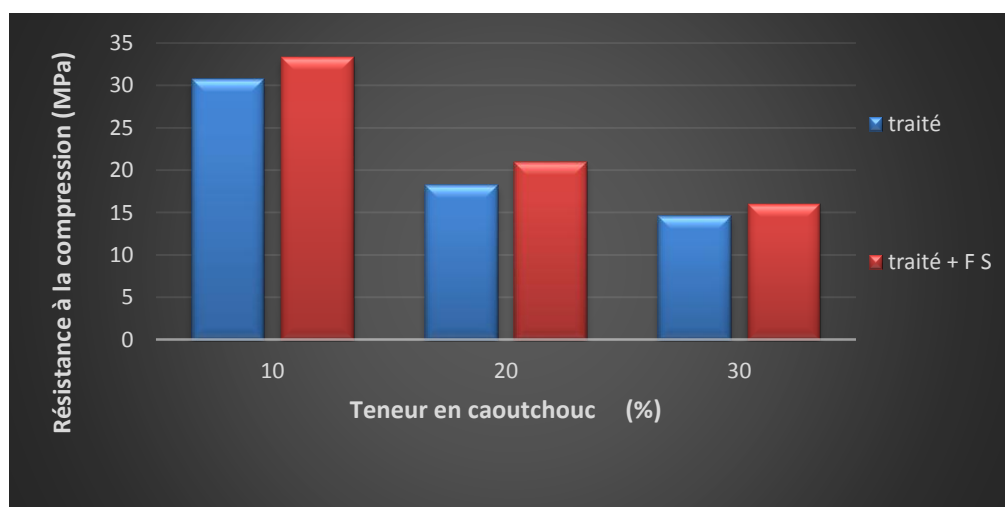
âge (jour)	caractéristique		Pourcentage de caoutchouc (%)			
			10	20	30	
14	Rc (MPa)	N° essai	1	30,7	23,66	13,6
			2	32,89	21,14	12,77
			3	34,96	17,12	13,89
		moyenne		32,85	20,64	13,42
	Densité	N° essai	1	2,451	2,421	2,355
			2	2,431	2,392	2,36
			3	2,423	2,384	2,349
moyenne		2,435	2,399	2,35		
28	Rc (MPa)	N° essai	1	33,48	20,76	15,93
			2	31,39	19,17	15,23
			3	34,94	22,88	16,69
		moyenne		33,27	20,93	15,95
	Densité	N° essai	1	2,394	2,347	2,267
			2	2,419	2,325	2,263
			3	2,438	2,38	2,352
moyenne		2,417	2,350	2,29		



**Figure 73:** Résistance à la compression du BCR en fonction de caoutchouc traité par NaOH et 5% fumée de silice

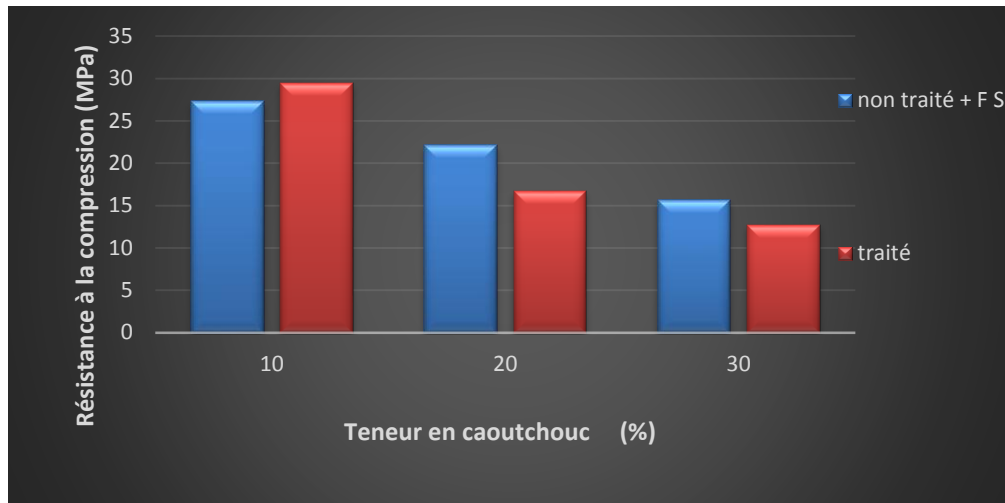


**Figure 74:** Résistance à la compression du BCR à 14 jours.

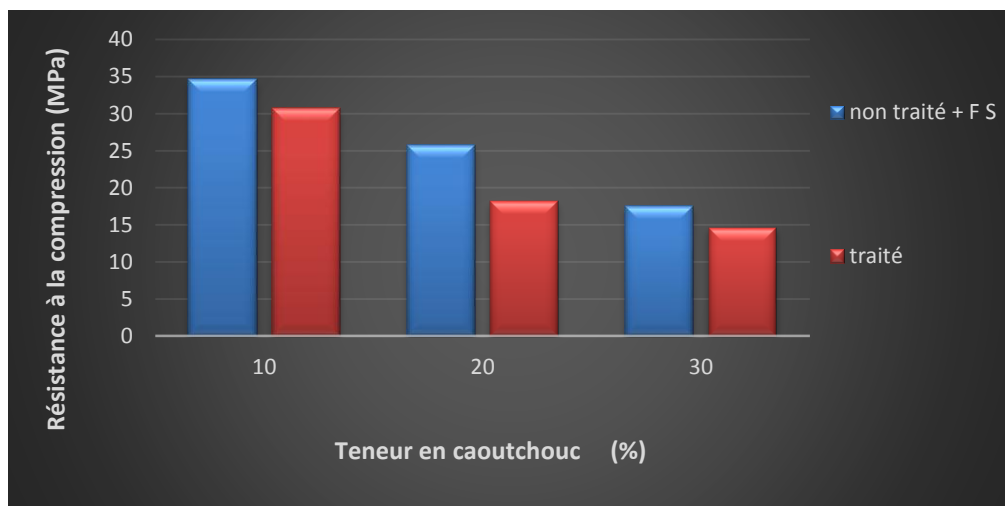


**Figure 75:** Résistance à la compression du BCR à 28 jours.

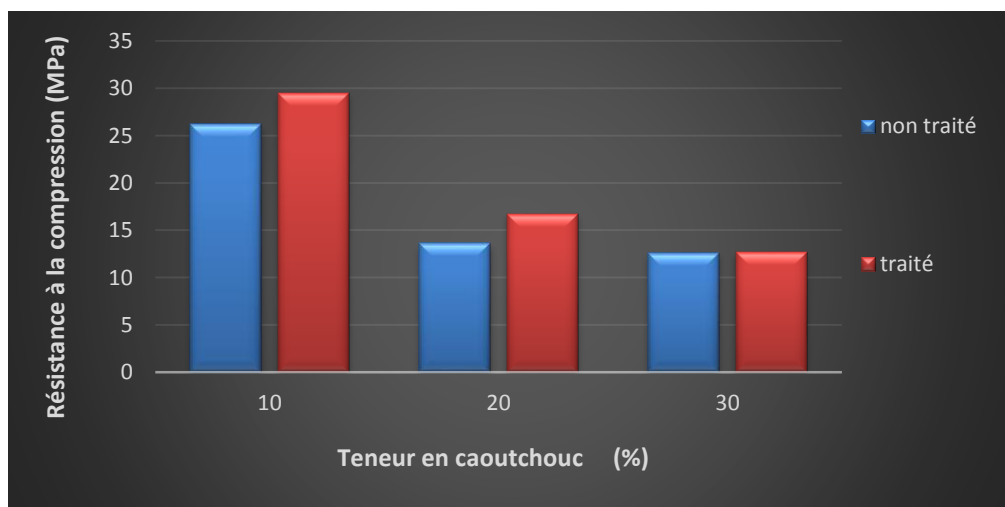




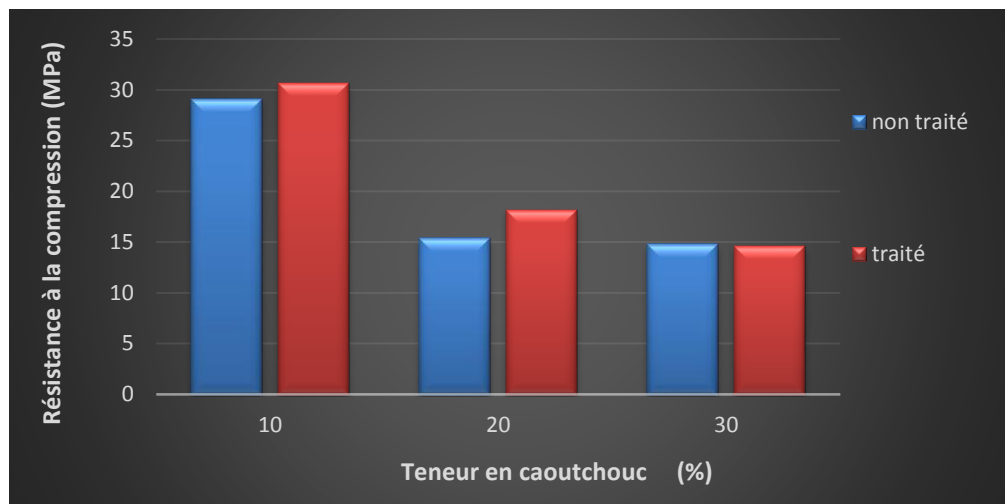
**Figure 76:** Résistance à la compression du BCR à 14 jours.



**Figure 77:** Résistance à la compression du BCR à 28 jours.



**Figure 78:** Résistance à la compression du BCR à 14 jours.



**Figure 79:** Résistance à la compression du BCR à 28 jours.

### Interprétation :

D'après les tableaux et les histogrammes de ces essais on a distingué que la résistance à la compression s'augmente avec le traitement par le NaOH voir la figure (v.38-39). Cette augmentation varie comme suite :

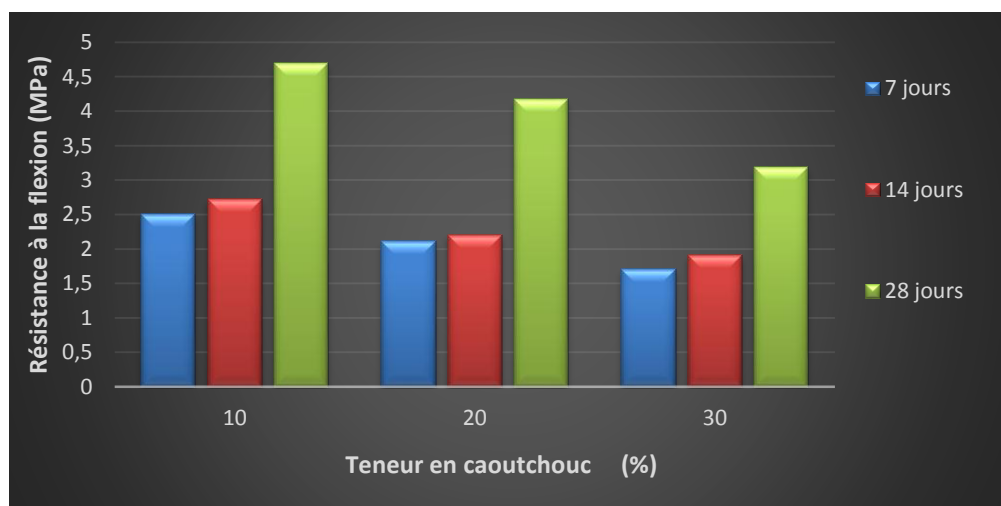
La résistance à la compression augmente plus avec le traitement par NaOH qu'avec le caoutchouc sans traitement, cela est expliqué par la rugosité produite par le NaOH sur les surfaces lisses de caoutchouc (la figure (v.44-45)).

La résistance à la compression augmente légèrement avec le traitement par NaOH par contre elle s'augmente plus avec l'ajout de fumée de silice (tenant en compte que cet ajout se fait avec traitement ou sans traitement) voir la figure (v.40- 43), et on peut expliquer ça par la faible rugosité produite par le NaOH par contre la fumée de silice permet d'améliorer les performances du mélange comme il est noté d'avant.

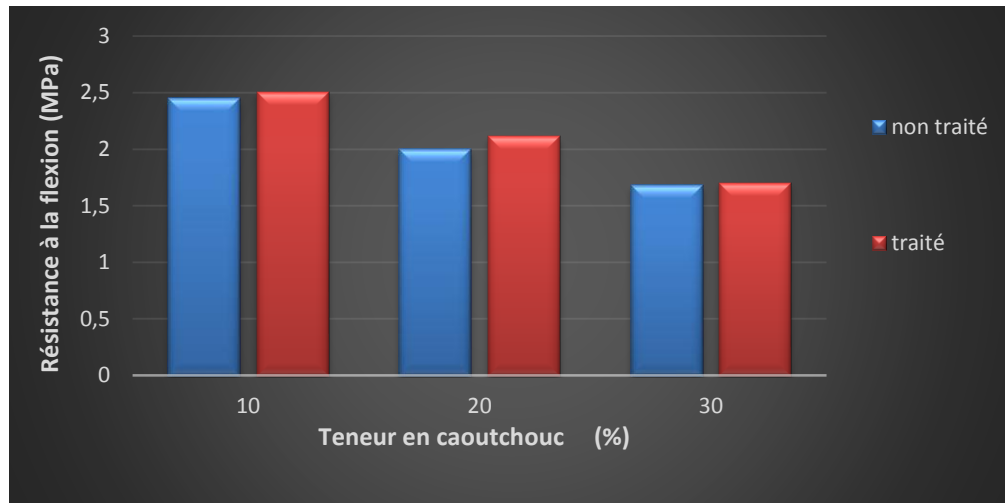
## 4.2.3. Les résultats à la Flexion

**Tableau 44:** les résultats de la résistance à la flexion du béton avec différent pourcentage de caoutchouc traité par NaOH

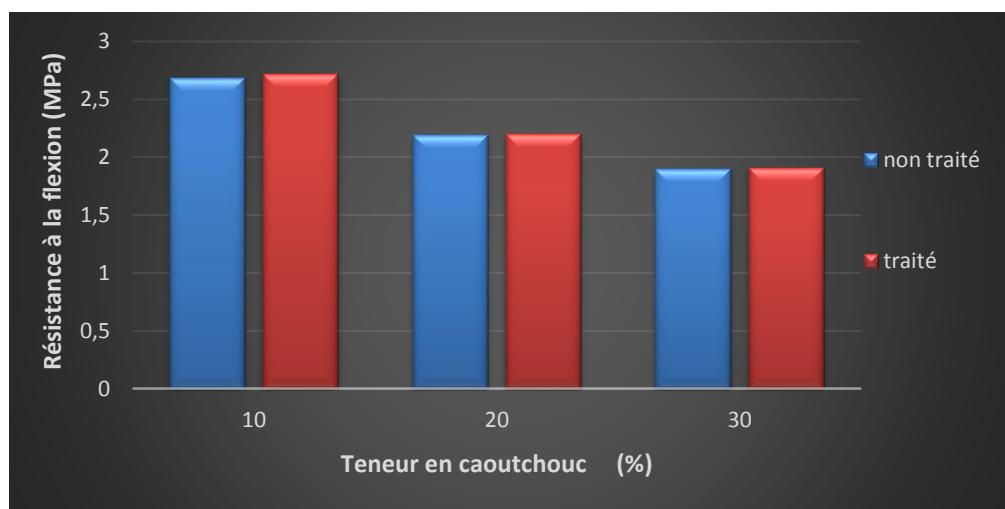
âge (jour)	caractéristique	Pourcentage de caoutchouc (%)		
		10	20	30
7	<b>R<sub>f</sub></b>	2,5	2,11	1,7
	<b>densité</b>	2,36	2,32	2,34
14	<b>R<sub>f</sub></b>	2,72	2,2	1,908
	<b>densité</b>	2,35	2,31	2,27
28	<b>R<sub>f</sub></b>	4,69	4,174	3,187
	<b>densité</b>	2,37	2.34	2,27



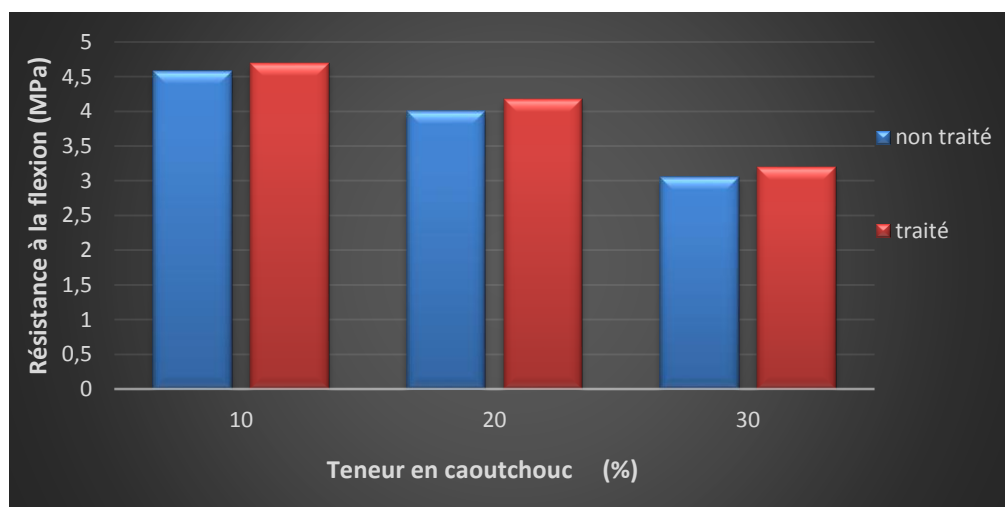
**Figure 80:** Résistance à la flexion du BCR.



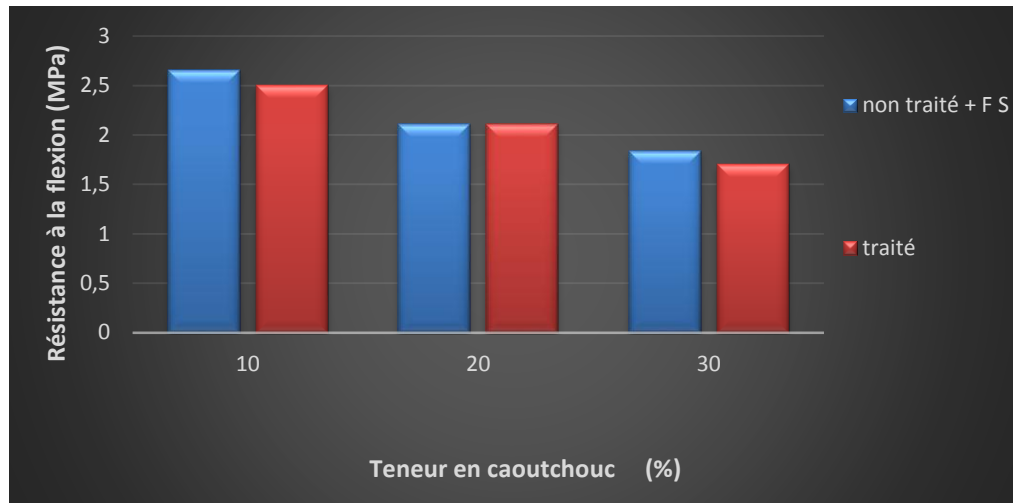
**Figure 81:** Résistance à la flexion du BCR à 7 jours.



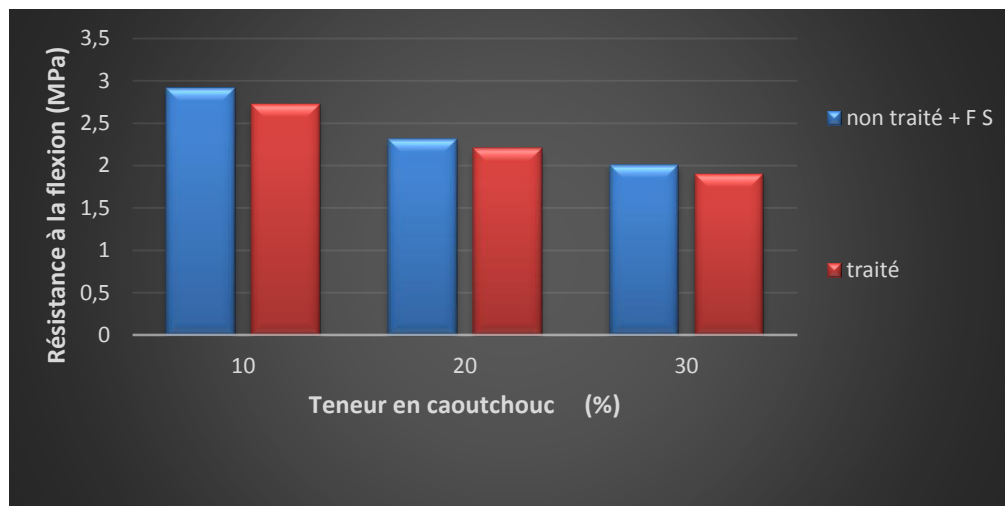
**Figure 82:** Résistance à la flexion du BCR à 14 jours.



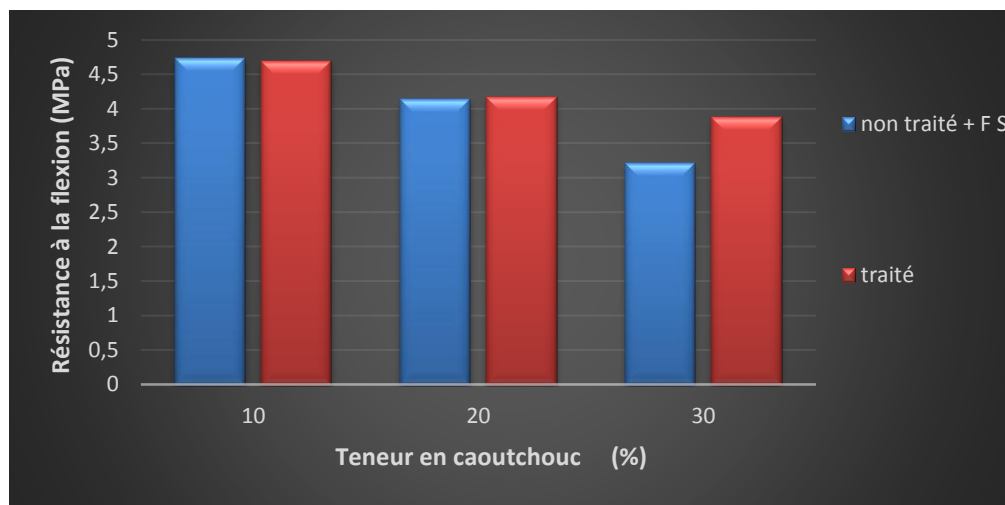
**Figure 83:** Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.



**Figure 84:** Résistance à la flexion du BCR à 7 jours.



**Figure 85:** Résistance à la flexion du BCR à 14 jours.



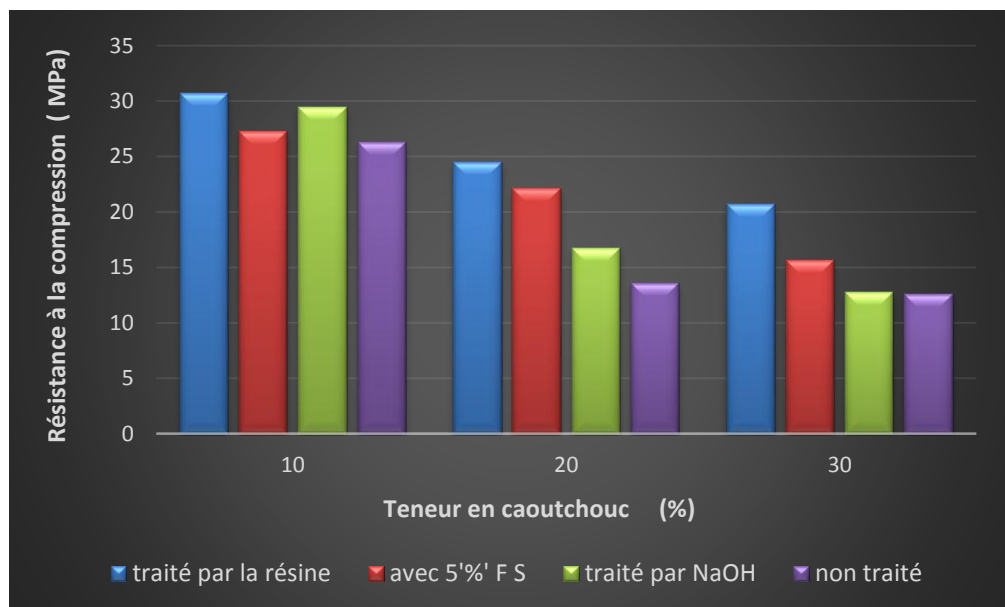
**Figure 86:** Résistance à la flexion du BCR à 28 jours.

**Interprétation :**

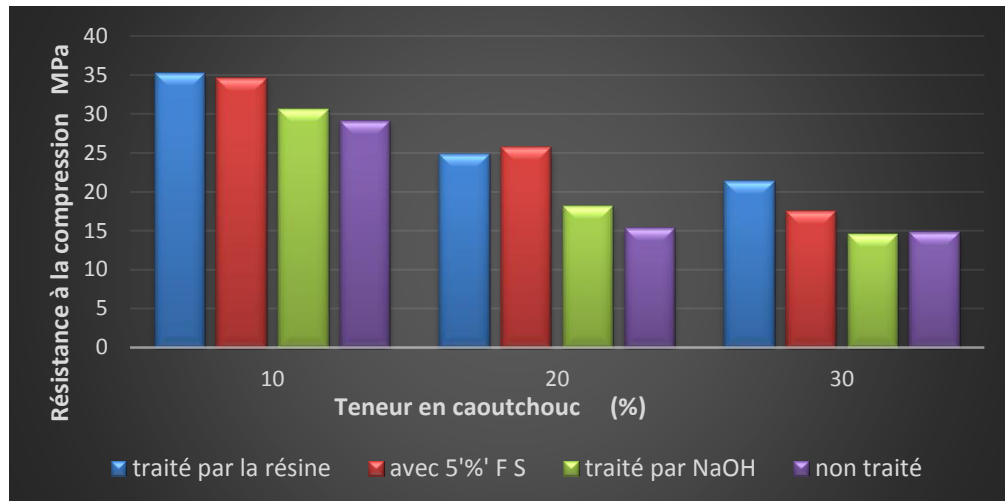
La résistance à la flexion augmente avec le traitement par le NaOH mais cette augmentation se varie comme suite :

La résistance à la flexion augmente plus avec le traitement par NaOH qu'avec le caoutchouc sans traitement (figure (v.47-49)), cela est expliqué par la rugosité produite par le NaOH et cela est visualisable au cours du temps.

la résistance à la flexion augmente avec le traitement par NaOH par contre elle s'augmente plus avec l'ajout de fumée de silice (figure (v.50-52)), et on peut-être expliquer ça par la grande compacité trouvé dans les mélanges avec l'ajout de 5% FS que les mélanges avec caoutchouc traité avec NaOH qui produit une faible rugosité.

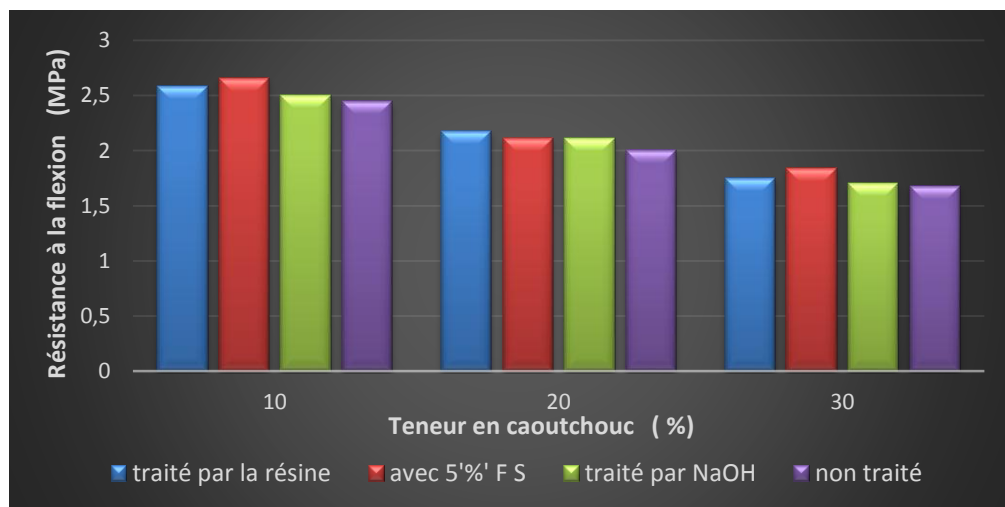
**5. COMPARAISON FINAL****5.1. La compression**

**Figure 87:** Résistance à la compression du BCR à 14 jours en fonction de mode de traitement.

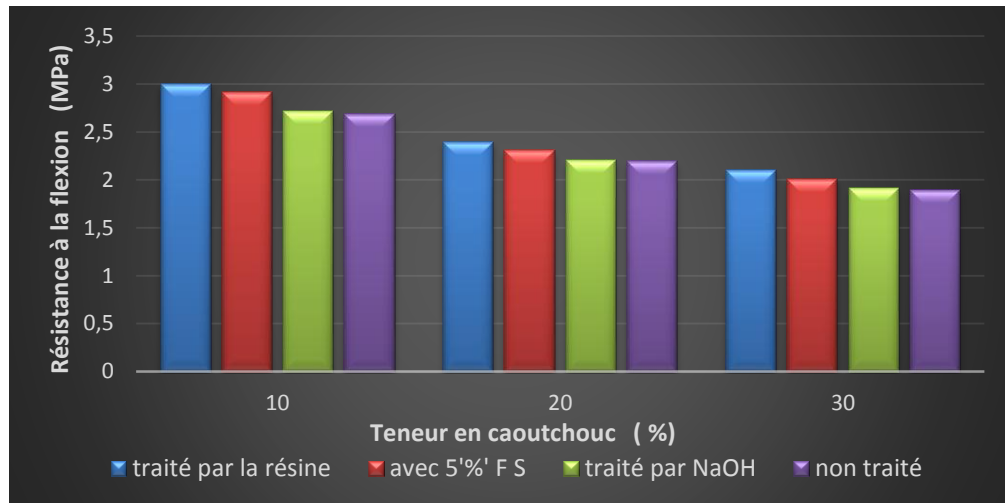


**Figure 88:** Résistance à la compression du BCR à 28 jours en fonction de mode de traitement.

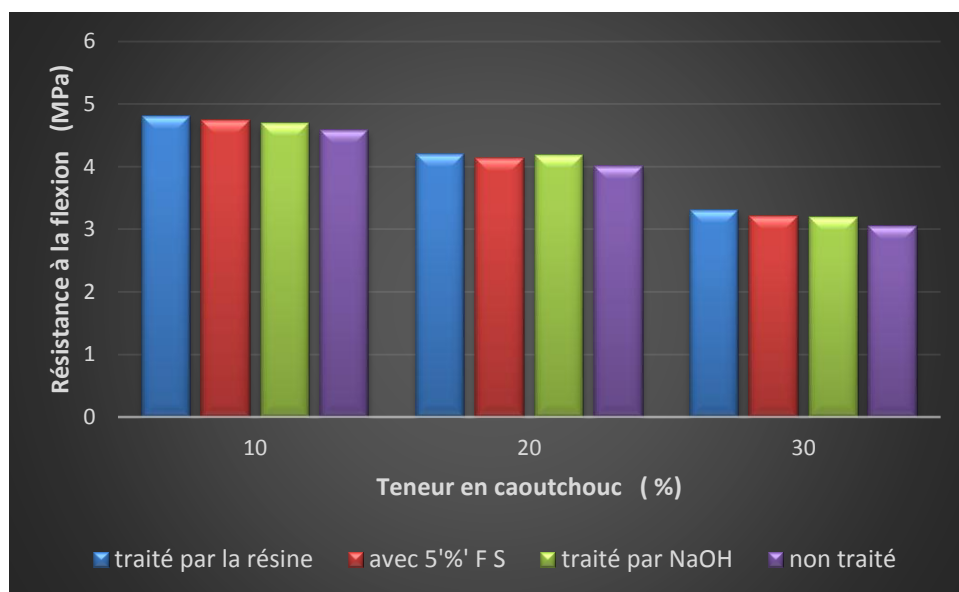
## 5.2. La flexion



**Figure 89 :** Résistance à la flexion du BCR à 7 jours en fonction de mode de traitement.



**Figure 90:** Résistance à la flexion du BCR à 14 jours en fonction de mode de traitement.



**Figure 91:** Résistance à la flexion du BCR à 28 jours en fonction de caoutchouc traité.

### Comparaison :

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

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



## **CONCLUSIONS GENERALES**

Le BCR est un matériau composé de granulats, ciment, matériaux cimentaires, et de l'eau. Il est composé alors des mêmes constituants qu'un béton ordinaire mais avec des proportions différentes. Le BCR a deux approches; une approche béton du point de vue constituants et une approche sol vue son procédure de mis en place et compactage. Les principaux avantages de BCR sont la rapidité d'exécution et le faible cout.

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

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

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

Les principales conclusions qui l'on peut tirer à partir de cette étude sont :

- ✓ la masse volumique de BCR diminue proportionnellement avec l'augmentation de pourcentage de caoutchouc. Cette diminution peut arriver jusqu'à 6,81% pour un taux de 30% caoutchouc de la masse volumique initiale (0% caoutchouc). Cette variation due à la faible densité des particules de caoutchouc.
- ✓ Le temps de compactage (temps vété) de BCR diminue avec l'augmentation de concentration de caoutchouc on peut atteindre, avec un pourcentage de caoutchouc de 30%, à 37,5% de réduction car les particules de caoutchouc ont un taux d'absorption d'eau faible que les agrégats minéraux. Cette diminution peut simplifier et faciliter l'opération de compactage.
- ✓ L'augmentation de pourcentage de caoutchouc change les paramètres résistance de BCR (compression, flexion). Cette influence représentée par une chute de

résistance peut arriver à 65% pour un mélange contenant 30% de caoutchouc. On explique cette chute par la faible densité de caoutchouc et à la faible compacité de squelette granulaire et également de la faible adhérence entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc.

- ✓ Les paramètres de résistance augmentent dans le temps, ça c'est logique à cause de les procédures chimique lier aux l'hydratation de la pâte de ciment ainsi due à l'effet de cohésion mécanique générée par le compactage.
- ✓ L'augmentation de concentration de caoutchouc diminue le retrait de BCR absolument sous l'effet de caoutchouc.
- ✓ L'emploi de la fumée de silice améliore les paramètres de résistance. Pour un remplacement partielle de 5% de ciment, on a trouvé que la résistance à la compression augmente de ; 16,45%, 18,56% pour un taux de caoutchouc ; 0%, 30%, respectivement. Pour la flexion des augmentations de l'ordre de ; 3,2% , 5.6% pour un concentration de 0%, 30% sont enregistrées, respectivement. Ceci expliqué par l'impact de la fumée de silice sur les paramètres de résistance. on conclut aussi qu'un rapport E/C optimal pour un mélange avec l'addition de la fumée de silice peut améliorer les paramètres de la résistance.

Vu la chute des propriétés mécaniques de BCR caoutchouté suivant la faible adhérence entre liant-caoutchouc. On a essayé d'améliorer la performance des particules de caoutchouc dans le BCR. Plusieurs méthodes de traitement ont été employées ; traitement chimique par NaOH et traitement mécanique par le sable collé avec la résine :

- ✓ Le traitement par la résine permet d'augmenter les paramètres de résistance. Pour la résistance à la compression l'augmentation a arrivé à 21% et 44,9% pour un taux de caoutchouc 10% et 30%, respectivement.
- ✓ Le traitement par NaOH donne une augmentation dans les propriétés mécanique de BCR. Une augmentation de l'ordre de 5,39% pour 30% de caoutchouc. De même manière pour la résistance à la flexion mais avec des pourcentages différents. L'augmentation par rapport le caoutchouc non traité est de l'ordre de 2,17% et 4,6% pour 10% et 30% de caoutchouc, respectivement

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

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