

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
N° :.....



DOMAINE : GENIE CIVIL
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : MATERIAUX

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Présenté par:

SAID Aissa

BOUGUERRA Walid

Intitulé

**Etude du comportement d'un béton compacté au
Rouleau(BCR) à base des granulats recyclés.**

Soutenu Publiquement le: 17/06/2018

Devant le jury:

Mr. BEN CHIKH Mohamed	Prof	UMB M'sila	Président
Mr. BEDDAR Miloud	Prof	UMB M'sila	ENCADREUR
Mr. MEDDAH Abd elaziz	M.C.A	UMB M'sila	Co- ENCADREUR
Mr. SILINE Mohamed	M.C.A	UMB M'sila	Examineur
Mr. BELOUADAH Ibtissam	M.A.A	UMB M'sila	Examineur

Année Universitaire : 2017 / 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Le premier remerciement c'est pour le DIEU qui nous a permis d'être dans cette situation et d'avoir cette formation.

Merci, « Pr. Beddar. Miloud » qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, ainsi que pour leurs soutiens tout au long de réalisation de ce projet.

Merci, chers parents, vous source de mon énergie dans la vie, base de ma réussite et mon appui dans tous les temps.

Et tous mes amis de spécialités « Matériaux de construction ». Et tous mes enseignants du département de génie civil surtout « Dr. Meddah. Abdelaziz et Mr. deghfel. Moussa » qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même a assurer une Formation aussi meilleure que possible.

Nous remercions les membres de jury et responsable de laboratoire matériaux de construction « Bakhti Yammna ».

Nous remercions aussi « Pr. Nasri » qui nous aide toujours au niveau de département génie civil et au domaine de ma spécialité.

Nous remercions particulièrement tous le personnel pour leur aide et tous les étudiants de génie civil

Dédicaces

*Je dédie ce projet de fin d'étude en
premier lieu mes parents qui m'ont
aidé et soutenu durant toutes ces
longues années d'étude.*

*A mes chers frères et sœurs, et à toute
ma famille, à tous mes amis, et à tous
mes collègues de la promotion 2018.*

AISSA

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma chère mère et
mon cher père, à mes chers frères et
sœurs, à toute ma famille, à tous mes
amis, tous mes collègues de la promotion
2018.*

Walid

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Introduction generale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BCR

1-1- DEFINITION DU BCR.....	03
1-2-HISTORIQUE.....	05
1.3 CONSTITUANTS.....	07
1.3.1 Granulats.....	08
1.3.2 Liant.....	09
1.3.3 adjuvant.....	11
1.3.4 Eau.....	11
1.4 TECHNIQUES DE PRODUCTION, MISE EN PLACE ET COMPACTAGE.....	11
1.4.1 Production et mise en place.....	11
1.4.2 Compactage.....	12
1.5 AVANTAGES DU BCR.....	14
1.6 INCONVENIENTS DU BCR.....	15
1.7 METHODES DE FORMULATION.....	15
1.7.1 Méthode basée sur les limites de maniabilité.....	16
1.7.2 Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique.....	16
1.7.3 Autres methodes.....	17
1.8 CONCLUSION.....	19

CHAPITRE 02 : GENERALITE SUR LES GRANULATS RECYCLES

2.1 INTRODUCTION.....	20
2.2 INTERET DU RECYCLAGE DANS LE GENIE CIVIL.....	20
2.3 SOURCES DE DECHETS UTELISES EN GENIE CIVIL.....	21
2.3.1 Déchets de construction et de démolition.....	21
2.3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie.....	21

TABLE DES MATIERES

2.4 CLASSIFICATION DES DECHETS DANS LE GENIE CIVIL.....	21
2.4.1 Déchets inertes.....	21
2.4.2 Déchets banals.....	21
2.4.3 Déchets dangereux.....	21
2.5 DESCRIPTION DES GRANULATS RECYCLES.....	21
2.6 LES TYPES DES GRANULATS RECYCLES.....	22
2.7 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT FRAIS.....	23
2.7.1 Ouvrabilité.....	23
2.7.2 La masse volumique et la teneur en air.....	23
2.8 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT DURCI.....	23
2.8.1 Perméabilité.....	23
2.8.2 Porosité.....	23
2.8.3 Résistance à la compression.....	23
2.8.4 Résistance à la traction et à la flexion.....	23
2.8.5 Module d'élasticité.....	24
2.9 PROPRIETE LIEE A LA DURABILITE.....	24
2.9.1 Retrait et fluage.....	24
2.10 CONCLUSION.....	24

CHAPITRE 03 : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BCR

3.1 INTRODUCTION.....	25
3.2 MATERIAUX UTILISES.....	25
3.2.1 CARACTERISTIQUES DU SABLE.....	25
3.2.1.1 Analyse granulométrique (NF P 18-304).....	25
3.2.1.2 Module de finesse (NF P18-540).....	27
3.2.1.3 Propreté « équivalent de sable» (NF PI8-590).....	27
3.2.1.4 Masse volumique absolue (NF P 18-555).....	29
3.2.1.5 Masse volumique apparente (NF P 18-554).....	29

TABLE DES MATIERES

3.2.2. CARACTERISTIQUES DES GRAVIERS.....	30
2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560).....	30
3.2.2.2 Masse volumique (NF P 18 -555)	32
3.2.2.3 La porosité.....	32
3.2.2.4 La compacité.....	33
3.2.2.5 L'indice des vides.....	33
3.2.2.6 Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554.....	33
3.2.2.7 La résistance à la fragmentation par chocs, essai LOS ANGLOS (NFP18-573).....	34
3.2.3 CARACTERISTIQUES DU CIMENT UTILISE.....	36
3.2.4 EAU DE GACHAGE.....	36
3.2.5 LE LAITIER.....	36
3.2.6 Le MEDACURE.....	36
3.3 FORMULATION DU BCR ET PROCEDURES DES ESSAI REALISES.....	37
3.3.1 Fuseau granulométrique.....	37
3.3.2 Pourcentage des granulats.....	38
3.3.3. Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment...	38
3.3.4. Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR.....	40

CHAPITRE 04 : RESULTATS ET DISCUSSION

4-1- Introduction.....	42
4-2- Béton frais.....	46
4-3- Béton durci.....	47
4-3-1- Effet de granulats recyclés sur les propriétés du BCR.....	47
4-3-1-1- Analyse des propriétés mécaniques (Résistance à la compression).....	47
4-3-1-2- Analyse des propriétés Physiques.....	49
A-Retrait.....	49
B-Absorption d'eau capillaire.....	51
C-Absorption d'eau totale.....	53
4-3-2- Amélioration des propriétés du BCR recyclés par le traitement de la surface	55

TABLE DES MATIERES

des Granulats recyclés.....	
4-3-2-1- Procédure expérimentale suivie.....	55
4-3-2-1- Résultats et interpretations.....	56
4-4-Conclusion.....	59
Conclusions générale et perspectives.....	60
Références	

Liste des Tableaux**Tableaux du chapitre I**

Tableau 1.1. Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers.....	09
Tableau 1.2. Distribution granulométrique idéale de granulats fins.....	09

Tableaux du chapitre III

Tableau 3.1. Analyse granulométrique du sable de dune de BOUSAADA.....	26
Tableau 3.2. Classification des sables en fonction du module de finesse.....	27
Tableau 3.3. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable Esv et Esp...	28
Tableau 3.4. Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune.....	29
Tableau 3.5. Caractéristique physiques du sable de dune (BOUSAADA).....	30
Tableau 3.6. Analyse granulométrique de gravier par tamisage.....	31
Tableau 3.7. La masse volumique des graviers.....	32
Tableau 3.8. Porosité, compacité et indice des vides du gravier.....	33
Tableau 3.9. Degré d'absorption d'eau de gravier.....	34
Tableau 3.10. Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	35
Tableau 3.11. Classification des roche en fraction du coefficient L_a	35
Tableau 3.12. Tamisât de différentes fractions d'agrégats.....	37
Tableau 3.13. Poucentage des granulats.....	38
Tableau 3.14. Les quantités des granulats, ciment et d'eau pour les mélanges de BCR....	39
Tableau 3.15. Résultats de la formulation aux différents dosages en ciment et teneurs en eau.....	39
Tableau 3.16 : Pourcentage des constituants de BCR dans un (m3).....	41
Tableau 3.17 : Les quantités des constituants de BCR dans un (m ³).....	41

Tableaux du chapitre IV

Tableaux (4.1) : Résultats d'essais à la compression Rc (MPa).....	44
--	----

Liste des Tableaux

Tableaux (4.2) : Résultats d'essais de retrait (%).....	45
Tableaux (4.3) : Résultats d'essais d'absorption d'eau capillaire (%).....	45
Tableaux (4.4) : Résultats d'essais d'absorption d'eau totale (%).....	46

Liste des figures

Figures du chapitre I

Figure. 1.1. Définition d'un béton compacté au rouleau.....	04
Fig. 1.2. Mise en place d'un BCR routier.....	04
Fig. 1.3. Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction.....	04
Fig. 1.4. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930.....	06
Fig. 1.5. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique.....	06
Fig. 1.6. Barrage de Shimajigawa au Japon.....	07
Fig. 1.7. Malaxage du BCR par gâchée.....	12
Fig. 1.8. Schéma d'une centrale de malaxage en continu.....	12
Fig. 1.9. Rouleaux compacteurs sur pneus et cylindres.....	13
Fig. 1.10. Schéma du compactage typique du BCR.....	14
Fig. 1.11. Détermination du volume de pâte minimal.....	16
Fig. 1.12. Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR.....	17
Fig. 1.13. Courbes de Proctor.....	18

Figures du chapitre II

Figure .2.1. Représentation en chiffres des déchets.....	21
Figure .2.2 . Schématisation d'un granulat recyclé.....	22
Figure .2.3. Différents type des granulats recyclés.....	22
Figure. 3.1. Une balance et une tamiseuse vibrante.....	25

Figures du chapitre III

Figure 3.2. L'Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA).	26
Figure 3.3. Essais d'équivalent de sable.....	27
Figure 3.4. Courbe granulométrique des granulats (3/8), (8/15), (15/20).	32
Figure. 3.5. Appareil de l'essai Los Angeles.	34

Figure 3.6. Fuseau granulaire.....	37
Figure 3.7. Détermination les pourcentages des différentes fractions des granulats.	38
Figure 3.8 : la densité sèche en fonction de la teneur en eau et le dosage de ciment.....	40

Figures du chapitre IV

Figure (4.1): Marteau Vibrant.....	42
Figure (4.2): Presse à béton.....	43
Figure (4.3) : équipement pour le retrait.....	43
Figure (4.4) : apparition d'une ségrégation claire dans le BCR à base des GR.....	46
Figure (4.5) : évolution de la résistance à la compression des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.	47
Figure (4.6) : effet de granulats recyclés sur la résistance à la compression du BCR.....	48
Figure (4.7) : Perte de résistance de compression en fonction de taux de GR du BCR à 28 Jours.	48
Figure (4.8) : évolution du retrait des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.	50
Figure (4.9) : effet de granulats recyclés sur le retrait du BCR à 28 Jours.	50
Figure (4.10) : Augmentation de retrait avec le taux des Granulats recyclés.....	51
Figure (4.11) : évolution de l'absorption d'eau capillaire des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.....	52
Figure (4.12) : Effet de granulats recyclés sur L'absorption d'eau capillaire du BCR.	52
Figure (4.13) : Augmentation de l'absorption d'eau capillaire avec le taux des Granulats recyclés.....	53
Figure (4.14) : évolution de l'absorption d'eau totale des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.....	54
Figure (4.15) : Effet de granulats recyclés sur L'absorption d'eau totale du BCR.....	54
Figure (4.16) : Augmentation de l'absorption d'eau totale avec le taux des Granulats recyclés.....	55
Figure (4.17): les étapes de traitement des granulats recyclés.....	56
Figure (4.18) : Variation de la résistance à la compression en fonction du mode de traitement des GR.....	57
Figure (4.19) : Variation du retrait en fonction du mode de traitement des GR.	57
Figure (4.20) : Variation de l'absorption d'eau capillaire en fonction du mode de traitement des GR.	58
Figure (4.21) : Variation de l'absorption d'eau totale en fonction du mode de traitement des GR.	58

Résumé :

Cette étude vise à valoriser les déchets de béton sous forme de granulats dans les mélanges de béton compacté au rouleau (BCR). Les particules de granulat recyclé ont été ajoutées aux mélanges en remplacement partiel du volume total de graviers à différents pourcentages (25%, 50%, 75%, et 100%). La démarche expérimentale entreprise dans ce travail de mémoire consiste à étudier l'influence du granulat recyclé sur les propriétés du BCR, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence du granulat recyclé, le BCR est devenu moins dense, plus ségrégué, et plus absorbant à l'eau. Le principal inconvénient lié à l'incorporation du granulat recyclé dans le BCR est la chute des propriétés mécaniques. Pour remédier à ce problème, nous avons procédé au traitement des granulats recyclés en les lavant et également à l'addition du produit de cure (MEDACURE) et le laitier. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'améliorer la performance du BCR à base des granulats recyclés par modification de la rugosité de surface du granulat recyclé. En effet, une grande partie de la chute de résistance induite par le granulat recyclé a été corrigée.

Mots clés :

BCR, granulat recyclé, valorisation, résistance, amélioration, Laitier.

Abstract:

This study aims to valorize concrete waste in the form of aggregates in roller compacted concrete (RCC) mixtures. The recycled aggregate particles were added to the blends to partially replace the total volume of gravel at different percentages (25%, 50%, 75%, and 100%). The experimental approach undertaken in this thesis is to study the influence of the recycled granulate on the properties of the BCR, both in the fresh state and in the hardened state.

In the presence of recycled granulate; BCR has become less dense, more segregated, and more absorbent to water. The main drawback associated with the incorporation of recycled granulate into the BCR is the drop in mechanical properties.. To remedy this problem, we proceeded to the treatment of the recycled aggregates by washing them and also to the addition of the cure product (MEDACURE) and the slag. The results obtained show that it is possible to improve the performance of the BCR based on the recycled aggregates by modifying the surface roughness of the recycled granulates. Indeed, a large part of the resistance drop induced by the recycled granulate has been corrected.

Key words:

RCC, recycled granulate, valorization, strength, improvement ,slag

ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل إمكانية تامين نفايات الخرسانة في الخرسانة المدكوكة ، على شكل حصى أضيفت حبيبات المدورة باستبدال جزئي للحجم الكلي للحصى بنسب مختلفة (25% . 50% . 75% . 100%). يعتمد المنهج التجريبي المتبع في هذه الأطروحة على دراسة آثار الحبيبات المدورة على خصائص الخليط في الحالة الطازجة كما في الحالة الصلبة.

أدى استعمال الحبيبات المدورة إلى الحصول على مادة أخف وزنا ، أكثر تمايزا (Ségrégation) اقل مقاومة للتشققات وأكثر امتصاصا للماء . والأهم أن استعمال الحبيبات المدورة أدى إلى فقدان الخواص الميكانيكية للخرسانة. من أجل معالجة هذه المشكلة ، قمنا بمعالجة جزيئات الحبيبات المدورة وذلك أولا بغسلها ثم باستخدام منتج الشفاء ميداكير (MEDACURE) ومادة إضافية أخرى خبث الحديد (Laitier) . أظهرت النتائج أن أداء الخرسانة المدكوكة والمحتوية على الحبيبات المدورة يمكن تحسينها عن طريق تعديل خشونة سطحها. وبذلك تم تصحيح جزء كبير من ضياع المقاومة.

كلمات البحث:

الخرسانة المدكوكة ، الحبيبات المدورة ، تامين ، المقاومة ، تحسين ، خبث الحديد

Introduction générale

Tout au long de son évolution, l'Homme a cherché à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. De nos jours, le secteur de la construction et travaux publics nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux. Parmi ceux-ci et avec 1m^3 mis en œuvre par an et par habitant sur la planète [1], le béton de toute sorte est le matériau le plus utilisé au monde. Parallèlement à cela, on assiste à une accélération de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de gravats. Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer de nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre. Parmi les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction a pour double objectif de préserver les ressources naturelles ainsi que de désengorger les sites de stockage.

Le béton compacté au rouleaux (BCR) est considéré comme une technologie évolutive, ce matériau est défini comme étant un mélange, raide à affaissement nul, de granulats, de ciment et d'eau (éventuellement avec ajouts cimentaires) qui est compacté en place en utilisant un matériel spécifique comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou un matériel couramment utilisé en travaux publics tel que les rouleaux compacteurs. A l'état frais, le BCR se comporte comme un sol légèrement humide mais, en passant à l'état durci, il se comporte comme un béton.

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 construction et les méthodes de mise en place diffèrent en fonction du type de BCR. On considère, dans ce travail, que le BCR pour les travaux routiers. Bien qu'il soit mis en place comme un sol, les propriétés essentielles de ce matériau sont analogues à celles des bétons conventionnels (BC).

Les granulats constituent la matière première principale de BCR en représentant 60 à 70 % de leur volume. Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés issus de la déconstruction présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influencent plusieurs de leurs propriétés, notamment une absorption élevée et induisent la présence de fines en quantité élevée [2, 3]. Ces éléments peuvent se trouver sous forme broyée (éléments fins) ou concassée, accolés ou non au granulat du béton démolé (béton parent) [4, 5]. Les propriétés des bétons réalisés avec ces matériaux recyclés peuvent alors être modifiées.

Cette étude s'inscrit dans une démarche de développement durable permettant le développement de l'utilisation de BCR composé à 100% de granulats recyclés.

Alors Le but de cette étude est d'identifier et d'analyser les caractéristiques de béton compacté aux rouleaux à base des granulats recyclés.

Cette étude comprend quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par une étude bibliographique décrivant l'état de l'art de ce matériau. Cette partie comporte l'historique du BCR, sa composition, les dosages utilisés ainsi que le domaine d'application de cette technique dans le monde et les intérêts de son utilisation.

Le deuxième chapitre contient une description des grains, de leurs avantages, des sources les plus importantes ainsi que des types et caractéristiques les plus importants.

Le troisième chapitre décrit les résultats d'identification des matériaux employés pour la confection des mélanges. Les différentes étapes de formulation y seront également présentées.

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

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

**CHAPITRE 01 : ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LE BCR**

1-1- DEFINITION DU BCR

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

Le rapport de l'Institut Américain du Béton [6] définit le BCR comme un béton compacté à l'aide des rouleaux compacteurs; à son état frais, il va supporter la surcharge induite par les rouleaux vibrateurs ce qui permet de le serrer. L'aspect sec du BCR nécessite l'application d'une énergie de compactage pour le consolider. La consistance du mélange doit être donc, d'une part, suffisamment rigide pour le maintenir stable sous les rouleaux compacteurs et, d'autre part, assez humide et maniable pour éviter les ségrégations [7]

Le BCR est un matériau intermédiaire entre le sol et le béton. Dans les premières heures de son malaxage il se comporte comme un sol (techniques de mise en place et compactage) et après quelques jours, il devient un béton indéformable; entre les deux, c'est un matériau avec des propriétés assez mal connues et nécessite des recherches tant sur les plans théoriques qu'expérimentales pour comprendre ses mécanismes fondamentaux de comportement [8]

La Figure (1.1) présente une comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus. En fonction de la teneur en liant, le BCR contient une quantité inférieure par rapport à un béton ordinaire et plus grande que celle utilisée dans la technique du gravier- traité, qui nécessite généralement une quantité de ciment de l'ordre de 4-5% de la masse totale des granulats [9].

Le BCR est utilisé principalement pour la construction des chaussées et des barrages figures (1.2 et 1.3), sa formulation dépend de la destination du projet. Puisque le BCR routier est plus sollicité en service (sollicitations mécaniques et climatiques), il nécessite une résistance mécanique plus élevée ce qui requiert l'utilisation d'une quantité plus grande de liant. En plus, le diamètre maximal de granulats est limité à 20 mm en corps routier, pour éviter le problème de ségrégation

Outre les barrages et les chaussées, le BCR a été utilisé avec succès dans plusieurs applications telles que : aires de stockage, parking de voitures et de camions, piste de véhicules militaires, routes de transport minière et forestière, autoroutes, parcs de conteneurs intermodaux, etc. [10].

D'après Vahedifard et al. (2010) [11] , le gain en coût associé à l'utilisation du BCR en tant que matériau de construction alternatif, pour les routes fortement sollicitées, a montré des économies initiales qui peuvent arriver à 58%, par rapport à l'utilisation du béton de pavage classique.

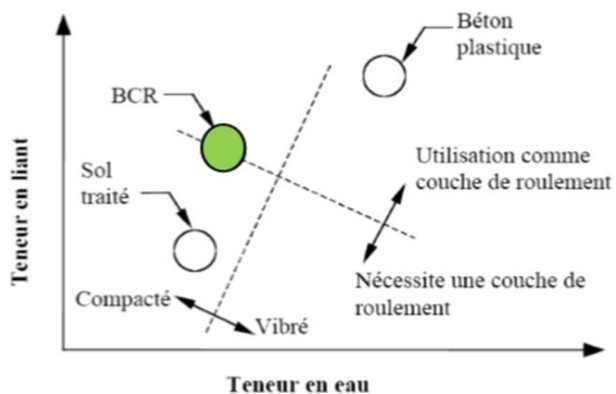


Figure. 1.1. Définition d'un béton compacté au rouleau [12]



Fig. 1.2. Mise en place d'un BCR routier[10].



Fig. 1.3. Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction

1-2-HISTORIQUE

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

Historiquement, le concept du BCR a été utilisé pour la première fois aux Etats Unis en 1942 avec la construction d'une route à Yakima (Washington) par U.S Army Corps of Engineers [12,10].

La technologie du gravier-traité est apparue en Suède en 1930, comme le BCR, il a les mêmes ingrédients que le béton ordinaire, il est mis en place et compacté également de façon similaire au BCR (Fig. 1.4). Le gravier-traité a été employé pour la construction des routes, l'amélioration des sols de fondation, la protection des pentes, et la construction des couches étanches. Il existe cependant une différence essentielle entre le BCR et le gravier-traité, dans la teneur en matériaux cimentaires et la gradation des granulats. Dans la littérature certains ouvrages considèrent le matériau gravier-traité comme une forme de BCR [13,4,5]

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

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

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

Le BCR a été utilisé également durant les années quatre-vingt avec succès pour les installations intermodales où les charges sont très élevées. Des aires ont des surfaces de l'ordre de 44313 m² et 107021 m² ont été réalisées à Houston (Texas) et Denver (Colorado), respectivement. Une grande surface de BCR a été construite, entre 1986 et 1988, au port de Conley et de la Marine de Moran à Boston [10].



Fig. 1.4. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930 [13].



Fig. 1.5. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique [14].

La première utilisation du BCR en corps de barrages a été effectuée dans les années soixante avec la réalisation du barrage Gere à Italie et au Manicouagan I au Canada avec un béton très ferme placé et compacté à l'aide des bulldozers. Ce béton a été considéré comme un BCR [15].

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

Deux années plus tard, Canon a utilisé les idées de Raphael pour présenter un papier intitulé « Concrete Dam Construction Using Earth Compaction Methods ». Canon a présenté des résultats sur un béton ferme contenant des granulats avec graduation contrôlée. Ce béton est

transporté par des camions, mis en place et diffusé avec des chargeurs frontaux puis compacté avec des rouleaux vibrateurs. Il a rapporté comment cette procédure peut être meilleure pour construire un barrage, de même configuration, que la méthode conventionnelle de construction de barrage-poids en béton [16].

Au début des années soixante-dix, la philosophie de conception et construction suivant la technique du BCR, est apparue au Japon sous le nom RCD (Roller-Compacted Dam) pour la construction du barrage de Shimajigawa avec utilisation partielle de la technique du BCR (Figure 1.6). Ce barrage a été achevé en 1981 avec un volume total de BCR de 317000 m³. Le barrage de Willow Creek achevé en 1982 et devenue opérationnel à partir de 1983 a été le premier barrage construit totalement avec la technique du BCR, il présente un volume total de 330 000 m³[8,15].

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



Fig. 1.6. Barrage de Shimajigawa au Japon [15].

1.3 CONSTITUANTS

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

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

1.3.1 Granulats

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

A l'état frais, la maniabilité, le potentiel à ségréguer et la souplesse du mélange sous les rouleaux compacteur sont largement influencés par la nature et le type des granulats utilisés. A l'état durci, la résistance mécanique, le module d'élasticité et les propriétés thermiques sont grandement affectés par les propriétés intrinsèques des granulats. La compactibilité, la densité in situ et conséquemment l'état final de la surface de chaussée (surface de l'usure) sont également influencés par la gradation des granulats [13].

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

Le BCR diffère du béton ordinaire par la gradation des granulats, compte tenu que le squelette granulaire, va consolider avec les pressions appliquées par les paveuses et les rouleaux compacteurs. Les différentes proportions de granulats doivent être choisies dans le but de réaliser les objectifs suivants : (i) assurer une consistance appréciable, (ii) aboutir une bonne compactibilité, (iii) satisfaire les spécifications techniques exigées (iv) obtenir un fini de surface appréciable [14].

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

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

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

L'emploi de granulats fins dans le BCR permet de remplir les vides inter- granulaires et facilite donc le compactage, pour avoir un squelette aussi dense que possible. En effet, et pour arriver à une gradation optimale, il est préférable que la gradation de granulats grossiers et fins se situe entre les limites présentées dans les Tableaux 1.2 et 2.3 [17].

CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BCR

Tableau 1.1. Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après [17].

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

Tableau 1.2. Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après [17].

Diamètre mm	Tamisât cumulé (%)
9.5	100
4.75	95-100
2.36	75-95
1.18	55-80
0.6	35-60
0.3	24-40
0.15	12-28
0.075	6-18
Module de finesse	2.1-2.75

1.3.2 Liant

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

CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BCR

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

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

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

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation de ces ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparés au ciment portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans le béton est, en réalité, l'apport des avantages techniques. En effet, dans plusieurs cas, ils sont utilisés de préférence au ciment portland indépendamment des considérations économiques ou environnementales [18].

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

Certains chercheurs ont recommandé de limiter le pourcentage maximal des cendres volantes incorporées à 20% [11,19]. Autres chercheurs [20,21]. ont rapporté que l'utilisation des cendres volantes avec des pourcentages plus élevés n'affecte pas négativement la performance à long terme. Selon ces travaux, l'effet-filler des cendres volantes peut compenser sa faible réactivité hydraulique. Suite à ces observations opposées, une attention particulière doit être accordée à l'emploi des cendres volantes, car elles sont diversifiées selon leur origine, leur granulométrie et leur composition chimique [19].

Les additions cimentaires sont ajoutées généralement aux mélanges de BCR par remplacement partiel du ciment. L'expérience montre que l'utilisation de la fumée de silice (composée des particules sphériques extrêmement fines) dans les mélanges de BCR, permet d'améliorer les caractéristiques de résistance à court et à long terme. Tandis que les cendres volantes ont un effet bénéfique sur la réponse mécanique à long terme. D'après (Marchand et al., 1997; Vahedifard et al., 2010) [11,19], le pourcentage maximal des fumées de silice dans le BCR ne doit pas dépasser 10% de la quantité totale de ciment.

D'après Harrington et al. [13] La fumée de silice a, cependant, été utilisée au cours des 10 dernières années dans l'Est du Canada, particulièrement au Québec, pour la production du BCR à haute performance. Dans les régions à temps froid, la fumée de silice peut améliorer les propriétés mécaniques et accélérer le développement de la résistance du BCR. La fumée de silice est principalement utilisée dans les ciments composés à un niveau de 7-8% de remplacement. Les

ciments composés à base de pouzzolane et de laitier peuvent être employés également dans la production du BCR.

1.3.3 adjuvant

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

A cause de l'aspect sec du BCR, les adjuvants doivent être ajoutés avec des quantités supérieures à celles utilisées dans le béton classique pour être efficaces [12,13].

1.3.4 Eau

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

1.4 TECHNIQUES DE PRODUCTION, MISE EN PLACE ET COMPACTAGE

1.4.1 Production et mise en place

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

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

Le malaxage discontinu est utilisé généralement pour les petits projets. Le BCR est mélangé dans un tambour fixe (Fig. 1.7) ou dans les camions mélangeurs. Il est produit par lot (gâchée). Il est important de noter que le tambour doit être vidé complètement après chaque cycle de malaxage. En revanche, Le malaxage continu consiste à produire le BCR avec une vitesse constante dans une centrale alimentée continuellement en granulats, en matériaux cimentaires et en eau (Fig. 1.8). Le BCR frais sort du deuxième côté à une cadence régulière. Ce type de malaxage est utilisé dans les grands projets [13].

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



Fig. 1.7. Malaxage du BCR par gâchée [13].

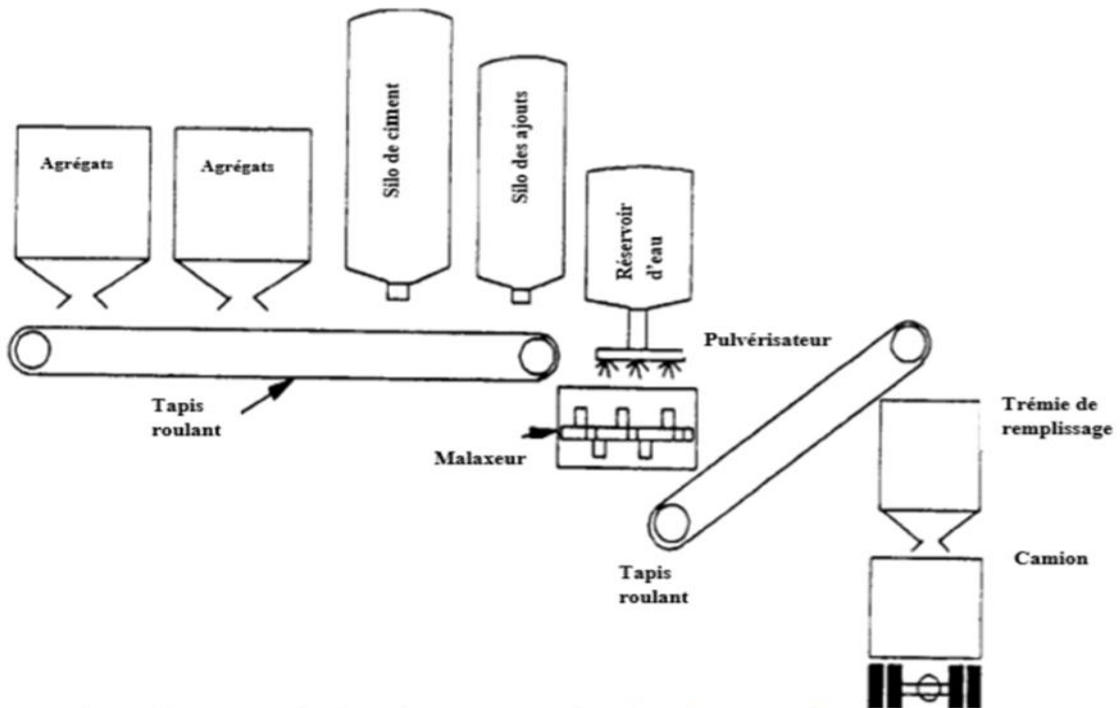


Fig. 1.8. Schéma d'une centrale de malaxage en continu [13].

1.4.2 Compactage

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

En effet, le béton doit être mis en place et compacté en couches successives, que ce soit pour les structures massives ou pour les routes. La phase de compactage commence juste après la mise en place du BCR, généralement à l'aide d'un rouleau compacteur vibrateur de 10 tonnes (Fig. 1.9) [8,12,13]. Dans les endroits où l'accès est difficile, il est nécessaire d'employer des petits compacteurs.



Fig. 1.9. Rouleaux compacteurs sur pneus et cylindres.

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

D'après Pittman (1989) [22], un compactage typique consiste à réaliser deux passages (un mouvement de va et vient égal à deux passages) à partir d'un pied (30cm) du bord libre suivis par deux passages le long du joint frais (Fig. 1.10) et finalement deux passages sont réalisés au centre de la voie. Ce schéma de compactage par rouleaux doit être répété pour un nombre de six passages vibratoires. Ensuite, quatre à huit passages sont réalisés immédiatement par les rouleaux pneumatiques pour resserrer la surface de la chaussée.

La densité et la résistance à la compression des mélanges de BCR sont directement liées à la qualité du compactage réalisé. Pour un mélange correctement formulé, le compactage est considéré comme suffisant, si le pourcentage de vides est inférieur à 1,5%. Un compactage insuffisant avec 5% de vides peut conduire à une chute de résistance de 30%. Alors que 20% de vides produisent une chute de résistance de l'ordre de 80% [17].

D'après Berga et al. (2003) [23], l'application d'une énergie de compactage insuffisante crée des zones de faibles densités à la partie basse des couches du BCR. Ces zones peuvent créer des problèmes de stabilité, surtout en cas de développement des contraintes de traction sous l'effet d'un éventuel séisme. Plusieurs facteurs peuvent influencer la compactibilité du mélange de BCR : la composition, la distribution granulométrique des granulats, la quantité de l'eau libre dans le mélange et le niveau d'énergie de compactage appliqué [24,25].

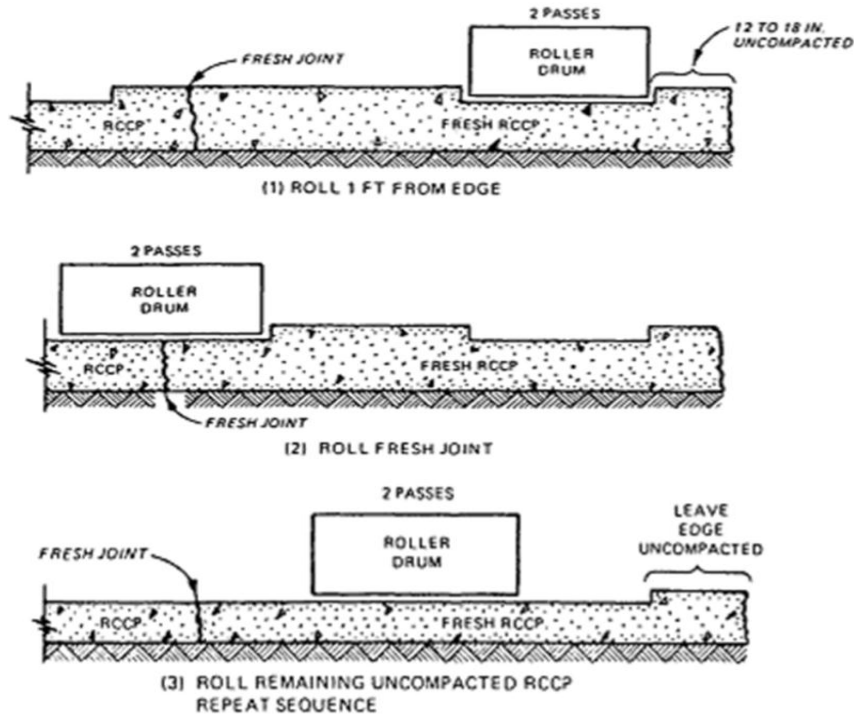


Fig. 1.10. Schéma du compactage typique du BCR [10,22].

1.5 AVANTAGES DU BCR

Les avantages du BCR sont résumés dans les points suivants :

La durabilité: L'un des avantages les mieux connus du béton est sa durabilité. Cette durabilité mène à une réduction des travaux de construction et d'entretien qui entravent la circulation [26,27].

Moins de travaux d'entretien: ERES indique en outre dans son rapport que les routes asphaltées exigent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contraste, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton qu'après 12 ans [26, 27].

Moins de déformation: Vu la souplesse du revêtement en asphalte, les véhicules de fort tonnage peuvent finir par y creuser des ornières. La poussée qu'ils exercent sur le revêtement peut aussi, à long terme, le faire plisser et lui donner l'apparence d'une tôle ondulée. La rigidité du béton empêche toutefois ce genre de déformations de se produire. D'autre part le béton ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur [26,27].

Une meilleure adhérence: Les études ont démontré que le béton assure, dans l'ensemble, une meilleure adhérence et une distance d'arrêt plus courte que l'asphalte, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières [26, 27].

Des économies de carburant (jusqu'à 20 %): La chaussée souple fléchit davantage que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à supposer qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple. La rigidité de la chaussée en béton réduit la déflexion et diminue ainsi la consommation de carburant [22,27].

Une meilleure visibilité la nuit: La chaussée en BCR assure une meilleure visibilité la nuit. Comme le béton est de couleur claire, il réfléchit mieux la lumière des phares et des lampadaires que l'asphalte, qui est foncé. Autrement dit, il y a plus de lumière visible [26,27].

1.6 INCONVENIENTS DU BCR

Les inconvénients du BCR sont résumés aussi dans les points suivants :

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. La texture de la surface d'un revêtement est mesurée à l'aide de l'essai de tache de sable. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macro texture de la surface (ASTM E 965). Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le tex uromètre et la stéréoscopie [26,27].

L'uni d'une chaussée est exprimé par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a resté toujours un problème limitant relativement les applications du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage [26,27].

1.7 METHODES DE FORMULATION

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

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

Le rapport ACI 325 [10]. présente deux procédures pour la formulation des mélanges de BCR destiné au corps routier.

La première est basée sur la recherche d'une limite de maniabilité alors que la seconde est reposée sur le principe de définir l'état le plus dense du mélange utilisant les concepts de la Géotechnique. Les deux méthodes, peuvent être utilisées séparément pour les routes et pour les barrages.

1.7.1 Méthode basée sur les limites de maniable

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

Dans la première étape, une série de mélanges de mortiers est préparée à différents rapports eau/ciment et à différents rapports sable/ciment sont étudiés, afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chaque rapport eau/sable des mélanges sont préparés à différents rapports eau/ciment et la masse volumique est mesurée (Fig. 1.11).

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

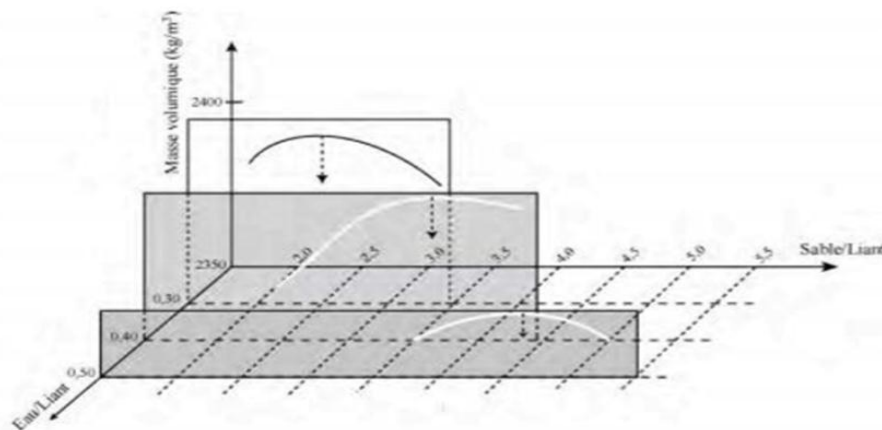


Fig. 1.11. Détermination du volume de pâte minimal [12].

1.7.2 Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique

Dans cette méthode, le principe de la détermination des différentes proportions est basé sur le concept de compactage des sols en laboratoire. Elle consiste à utiliser l'essai Proctor modifié, suivant le mode opératoire de la norme ASTM D1557 [28], afin d'obtenir la relation de la variation de la densité en fonction de la teneur en eau.

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

Cette méthode est plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont utilisés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée, ce que l'on trouve généralement avec les mélanges de BCR destinés aux projets routier [12,19].

Les proportions en granulats fins et grossiers sont déterminées par rapport à un fuseau granulométrique (Fig. 1.12). Puis une série de mélanges du béton est préparée variant chaque fois la teneur en matériaux cimentaires, entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs.

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

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

ρ_d : densité sèche.

ρ_h : densité humide maximale mesurée.

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

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est tracée dans un graphique (Fig. 1.13). La teneur en eau correspondant à la densité sèche maximale (sommet de la courbe) représente la teneur en eau optimale. Des essais de résistance en compression sont réalisés sur des éprouvettes préparées à différentes teneurs en eau optimales. Le mélange ayant la teneur en liant minimale et possédant les propriétés mécaniques requises est alors choisi [19].

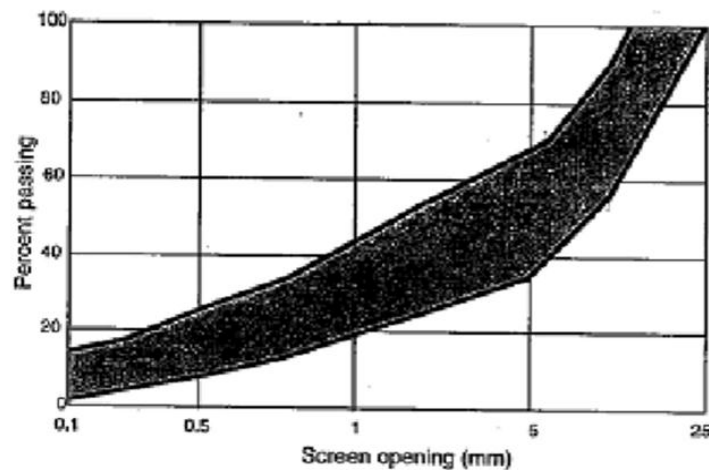


Fig. 1.12. Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR [12,19].

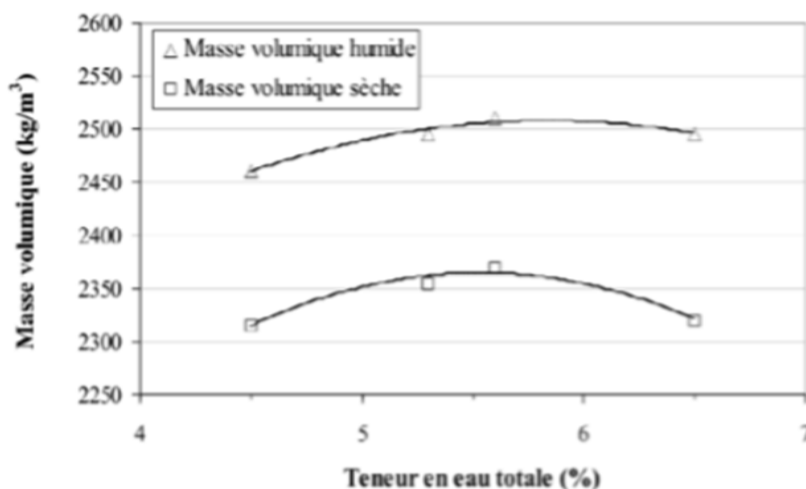


Fig. 1.13. Courbes de Proctor [12].

1.7.3 Autres méthodes

Outre les méthodes présentées précédemment, dans le rapport ACI 207 [15] on y présente d'autres procédures, qui permettent de formuler le BCR. Mais il semble qu'elles sont plus appropriées aux mélanges de BCR destinés aux barrages. Parmi ces méthodes ; la méthode de l'U.S Corps of Engineers et la méthode du volume optimal, y sont citées.

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

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

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

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

Toutes les méthodes citées sont basées sur des approches empiriques ou semi- empiriques. Il existe néanmoins, d'autres méthodes qui s'appuient sur des approches théoriques. Une méthode a été développée au niveau du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par De Larrard. Elle est

basée sur le modèle d'empilement compressible, appelé également modèle de suspension solide. Le principe de la méthode consiste à optimiser la compacité (ou porosité) d'un empilement de grains de différentes dimensions.

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

Le modèle d'empilement compressible permet d'optimiser les différentes proportions de mélange (granulats, matériaux cimentaires). Il permet aussi de tenir compte, non seulement des dimensions des grains, mais également de la forme, de l'angularité et de la texture de la surface qui peuvent influencer considérablement la compacité du squelette granulaire [7,29]. Le modèle d'empilement compressible permet de faire des calculs rapides, surtout que cette méthode est actuellement programmée. Cet avantage est très utile sur chantier pour recalculer les différentes proportions en cas de changement de matériaux [12].

1.8 CONCLUSION

Ce chapitre présente un état de l'art sur le BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement. La mémoire bibliographique a mis en évidence que le BCR est un matériau performant, économique et durable. Pour un mélange de BCR, le compactage est l'élément clé de son comportement.

**CHAPITRE 02 :
GENERALITE SUR LES
GRANULATS
RECYCLES**

Chapitre 02

2.1 INTRODUCTION

L'augmentation des déchets provenant de la construction et de la démolition, ainsi que l'extraction étendue des ressources naturelles nécessaires à la production des matériaux de construction. L'idée de recycler les bétons est apparue dans le but principal de préserver l'environnement. En effet, la réutilisation des bétons en tant que granulats dans des nouvelles compositions de béton a permis de réduire les dépenses sur la gestion des déchets déconstructions [30 ?31]. Pour but de : [32].

- ❖ des diminutions importantes d'émissions de gaz (CO₂).
- ❖ la réduction de la consommation énergétique.
- ❖ la protection des ressources naturelles dont l'accès devient de plus en plus rare.
- ❖ la valorisation de ces matériaux pour limiter et éliminer les mises en décharge.

2.2 INTERET DU RECYCLAGE DANS LE GENIE CIVIL

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats [33]. Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes [33]. En 2001, la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de 5 millions de tonnes [34].

Face aux 400 millions de tonnes de granulats naturels produits en 2001 [33], le granulat recyclé de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels.

Selon (**Charlot, 1993**) [35] en France, les déchets de démolition sont issus des friches industrielles (40 %), des logements (35 %) et des travaux publics (25 %). Ces déchets sont composés de 50 % de maçonnerie, 30 % de béton, 5 % de bitume et 15 % de matériaux autres (bois, métal, papier, plastique, etc.).

Le Recyclage des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet:

- ❖ une économie de la ressource naturelle ;
- ❖ une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- ❖ une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- ❖ la réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :

- ❖ pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;
- ❖ le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant [36] ;

- ❖ la récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO2 des cimenteries.

2.3 SOURCES DE DECHETS UTELISES EN GENIE CIVIL

Le terme « déchet » est un : « résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication et d'utilisation ».En génie civil deux principales sources de production de déchets qu'on rencontre généralement par la suite :

2.3.1 Déchets de construction et de démolition

Sont lourds et volumineux, généralement classés parmi les déchets industriels. Produisent dans la construction tel que : béton, briques, pierre de taille, bois...etc., ces tas sont plus ou moins composite suivant la nature et l'âge des ouvrages [37].

2.3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie

L'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles. Parmi les sous-produits utilisés tel que (les laitiers de haut fourneau, cendre volante, terre cuite....etc.) [37].

2.4 CLASSIFICATION DES DECHETS DANS LE GENIE CIVIL

2.4.1 Déchets inertes

Sont les plus stables, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique. Exemple : (brique, tuiles et céramique, granulats non pollués) [37].

2.4.2 Déchets banals

Sont non inertes et non dangereux générés par les activités du commerce, de l'industrie. Comme (cartons, papiers, plastiques, plâtre...etc.) [37].

2.4.3 Déchets dangereux

Sont présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. Exemple : (pots de peinture, tubes de colle, néons...etc.) [37].

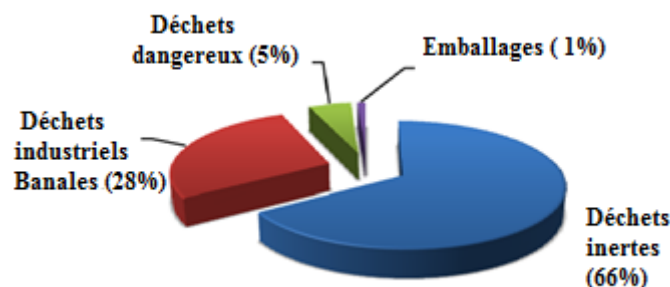


Figure .2.1. Représentation en chiffres des déchets [38].

2.5 DESCRIPTION DU GRANULAT RECYCLE

Un granulats provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Sont formés du granulats d'origine et de mortier attaché à celui-ci (Figure .2). Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système

composé de deux phases distinctes. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [38].

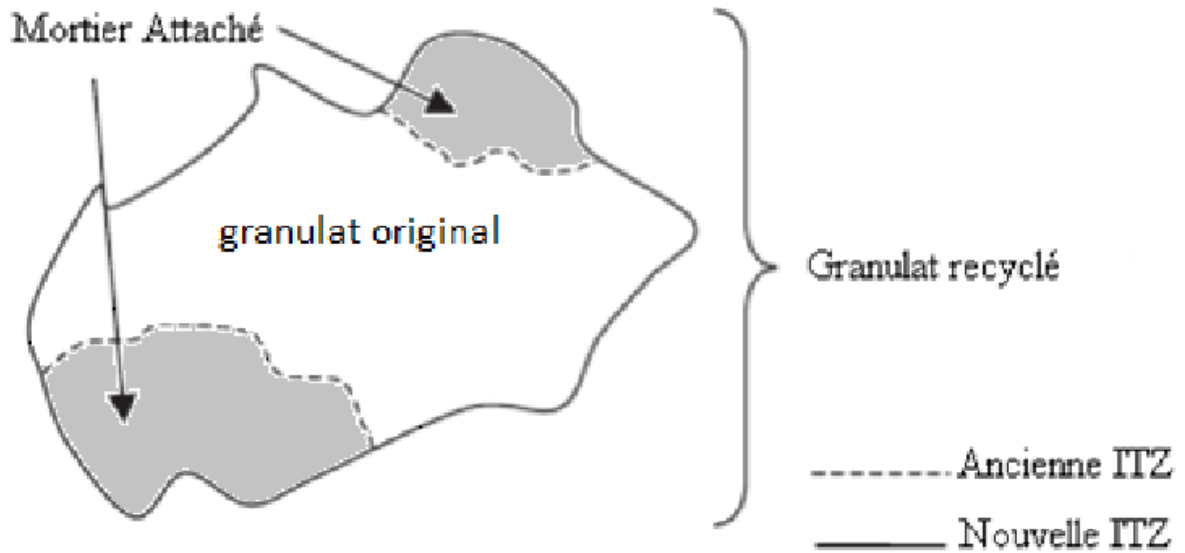


Figure .2.2 . Schématisation d'un granulat recyclé [38].

2.6 LES TYPES DES GRANULATS RECYCLES

En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés (Figure .3) [30].

1. Granulats de débris de béton.
2. Granulats de débris de maçonneries.
3. Granulats de débris hydrocarbonés.
4. Granulats de débris mixtes





Figure .2.3. Différents type des granulats recyclés [30].

2.7.1 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT FRAIS

2.7.1 Ouvrabilité

L'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulat naturel pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, on observe une augmentation de **3,1% à 9,4 %** de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton [38].

2.7.2 La masse volumique et la teneur en air

La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de **2400 kg/m³**, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, **2150 kg/m³**, quel que soit le type de ciment. Et la teneur en air du béton de granulat recyclé est légèrement supérieure (**4% à 5,5%**) par rapport au béton à base des granulats **100%** naturel [37].

2.8 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT DURCI

2.8.1 Perméabilité

Elle est augmentée avec le taux de remplacement du granulat. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés. Cette augmentation n'a cependant pas été observée pour un taux de remplacement de **20%** selon certains travaux. [38].

2.8.2 Porosité

Généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de **14% à 20,1%**. [38].

2.8.3 Résistance à la compression

En général, c'est entre **5% à 30%** de diminution dans la résistance à la compression du béton fait de gros agrégats recyclés, en fonction de la qualité du béton et la composition du mélange.

[Rao, 2005] [39] a trouvé la résistance du béton à base de granulat recyclé et le béton de

référence à comparable avec un remplacement à **100%**, à condition que le rapport E/C est supérieur à **0,55**.

[Poon et al] [40] ont également observé que des granulats recyclés ont une forme plus anguleuse et une texture de surface rugueuse par rapport aux granulats naturels qui peuvent conduire à une meilleure liaison et résistance. [Corinaldesi et Moriconi] [41] ont étudié l'effet des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du **BGR**. Ils ont observé que la force peut être améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des fumées de silice dans le mélange. [38].

2.8.4 Résistance à la traction et à la flexion

La résistance à la traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de **15** à **20%** à un taux de remplacement de **100%** et d'autres une perte de moins de **10%** pour un essai réalisé à 28 jours [38].

2.8.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée. Le module d'élasticité d'un **BGR** fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ **25%** à **40%** de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ **10%** à **33%** de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés [38].

2.9 PROPRIETES LIEES A LA DURABILITE

2.9.1 Retrait et fluage

Le retrait est une mesure du changement volumétrique du béton libre de chargement extérieur. Le béton se dilate avec l'accroissement de la teneur en eau et se contracte avec la perte d'humidité. D'après les études les propriétés de retrait endogène et de séchage du béton Contenant des granulats de béton recyclé, il indique que le taux de retrait est élevé aux jeunes âges, puis ralentit avec le temps. Les facteurs de remplacement des granulats de béton recyclé par des granulats naturel supérieur à **30%** provoquent une augmentation rapide dans les valeurs de retrait de séchage et indiquée une déformation moyenne de **0.007** mm/m par contre un taux de remplacement supérieur à **60%** indique une déformation de l'ordre **0.05** mm/m. [Ravindrarah et Tam] [42] ont montré que le fluage du **BGR** est d'environ **30%** à **60%** plus élevé que celui du béton ordinaire. Donc le fluage du béton est proportionnel à la teneur en pâte ou de mortier dans le béton [38].

2.10 CONCLUSION

Cette partie présente un aperçu détaillé sur les granulats recyclés. Elle expose d'abord leur définition, leurs sources, leurs classifications ainsi que leur développement, ce chapitre fait une mémoire sur la description du béton à base des granulats recyclés, ses propriétés à l'état frais et durci.

**CHAPITRE 03 :
CARACTERISATION
DES MATERIAUX
UTILISES ET
FORMULATION DU
BCR**

Chapitre3

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour élaborer les mélanges de béton compacté ont été rapportés, les étapes et la procédure utilisée pour la formulation de BCR ont été bien expliqués. La méthode de la formulation basée sur le principe de géotechnique a été aussi rapportée dans ce chapitre.

3.2 MATERIAUX UTILISE

Les matériaux prélevés ont été soumis aux essais d'identification au sein du laboratoire de génie Civil de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes européennes. Les essais effectués sur les matériaux sont : analyse granulométrique, équivalent de sable, coefficient d'absorption d'eau, masses volumique (apparente et absolue) et Los Angeles.

3.2.1 CARACTERISTIQUES DU SABLE

Nous avons utilisé dans ce travail un sable de dune d'origine siliceux qui provient de Boussaâda disponible au niveau de la base de vie de groupe industriel de ciment Algérie (GICA) à Boussaâda

3.2.1.1 Analyse granulométrique (NF P 18-560)(1990)

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



Figure. 3.1. Une balance et une tamiseuse vibrante

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de Boussaâda sont regroupés dans le tableau (3.1) ci-dessous :

Tableau 3.1. Analyse granulométrique du sable de dune de BOUSAADA.

Poids initial = 1000g					
Module	Tamis en	Refus	Refus	Refus	Tamisât
Afnor	mm	Partiel(g)	Cumulé(g)	Cumulé(%)	(%)
39	6.3	0	0	0	100
38	5	42.5	42.5	4.25	95.75
35	2.5	126.1	168.6	16.86	83.14
32	1.25	82.7	251.3	25.13	74.87
29	0.63	105.6	356.9	35.69	64.31
26	0.315	165.1	522	52.2	47.80
23	0.16	314.3	836.3	83.63	16.37
20	0.08	148.1	984.4	98.44	1.56
-	fond	0	0	100	0

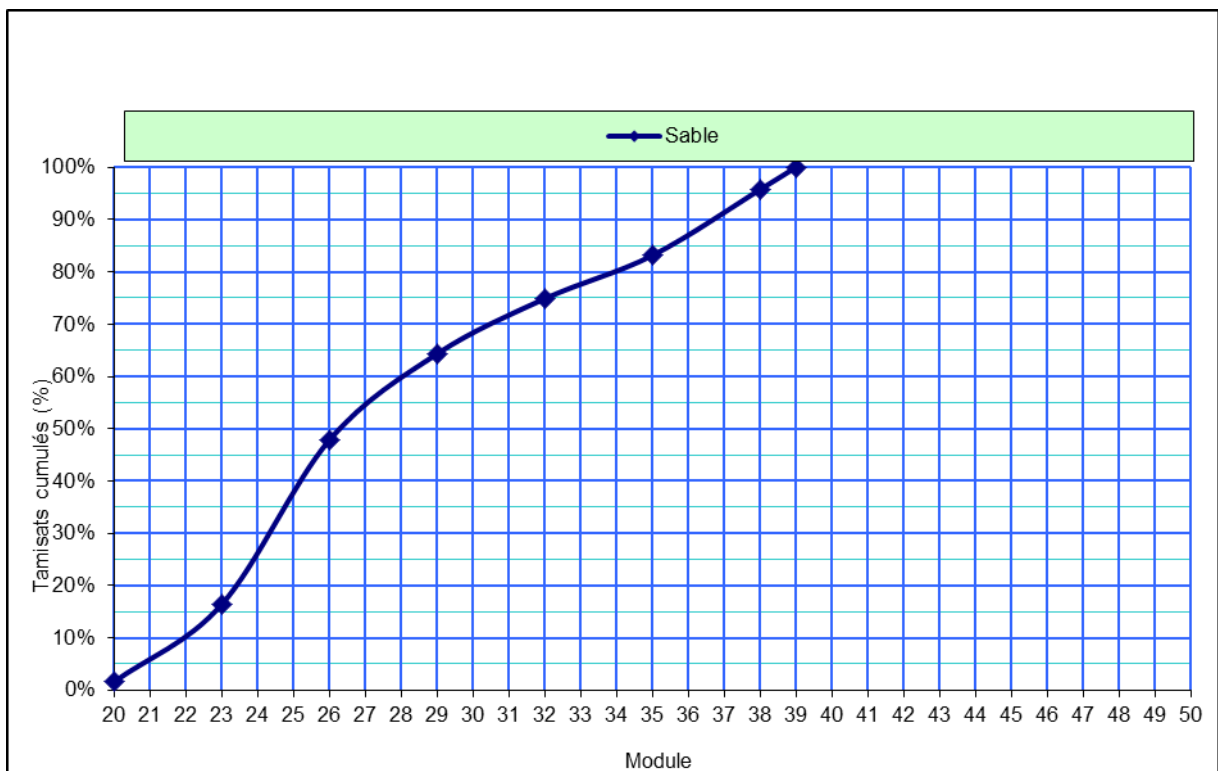


Figure 3.2. L'Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA).

3.2.1.2 Module de finesse (NF P18-540)

Le module de finesse est calculé par la somme des refus sur les tamis de module 23, 26, 29, 32, 35, 38, divisée par cent. Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, on trouve que la norme Française donne la classification suivante :

Tableau 3.2. Classification des sables en fonction du module de finesse.

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

On a obtenu pour le sable testé un module de finesse MF=2.18, ce qui nous donne une indication sur La grosseur du sable. MF < 2,5 C'est un sable moyen

3.2.1.3 Propreté « équivalent de sable» (NF P18-598)

Il permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique, plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston selon la norme NF-I8-598 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai [43].

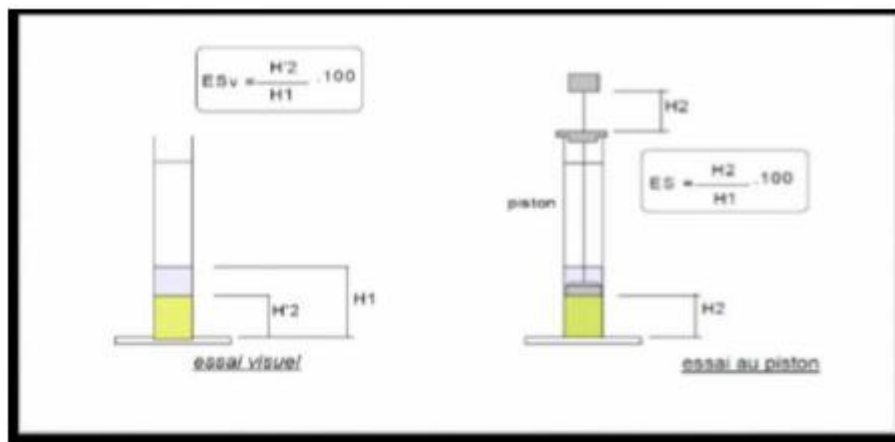


Figure 3.3. Essais d'équivalent de sable

Interprétation des résultats:

Tableau 3.3. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{sv} et E_{sp} .

E_{sv}	E_{sp}	N
$E_s < 65$	$E_s < 60$	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
$65 < E_s < 75$	$65 < E_s < 70$	Sable légèrement argileux : de propriétés admissible convient parfaitement 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 argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
$E_s > 85$	$E_s > 85$	Sable très propre : l'absence totale de fines argileux risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Tableau 3.4. Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune.

N ^o échantillon	1	2	3
H ₁	11.4	11.3	11.5
H ₂	8.6	8.5	8.6
Esv %	75.43	75.22	74.78
Esv _{moy} %		75.14	
H' ₂	8.1	8	8.2
Esp %	71.05	70.79	71.3
Esp _{moy} %		71.04	

Le sable testé donne les résultats suivants :

Esv=75,144 (%)

Esp = 71,04 (%)

Les essais réalisés ont montré que les sables présentent des faibles pourcentages de fines argileuses et par conséquent ils sont conclus convenables pour le BCR.

3.2.1.4 Masse volumique absolue (NF P 18-555)

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend trois (03) échantillons de masse 300g. On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 300ml d'eau préparé préalablement dans deuxième récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable- eau soit (V) ce volume. Sachant que le volume (V1) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul. Volume de sable : $V_1 = V - 300$ (ml)

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule : $\rho_{abc} = M/V_1$

3.2.1.5 Masse volumique apparente (NF P 18-555)

a) Masse volumique à l'état compact

C'est la masse du matériau par unité de volume après remplissage du récipient et compactage par tassement à 30 secousses manuelles, jusqu'au remplissage du récipient, après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M2 la masse de l'ensemble (sable + récipient) M1 la masse du récipient. La masse volumique à l'état compact est donnée par la formule suivante :

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

M1 : Masse du récipient vide.

M2 : Masse du récipient plus le sable.

Vr : Volume du récipient (Vr =1L).

b) Masse volumique à l'état lâche

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé et un récipient de capacité 1L. On remplit l'entonnoir avec du sable sec. On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.

On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M2 ce poids. La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

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

On note ici que les résultats présentés dans le tableau (3.5) ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

Tableau 3.5. Caractéristique physiques du sable de dune (BOUSAADA).

Masse volumique Apparente (kg/dm ³)	Masse volumique Absolue (kg/ dm ³)	Masse volumique A l'état lâche (kg/ dm ³)	Masse volumique L'état compact (kg/ dm ³)
1.40	2.5	1.53	1.58
Compacité (%)		Porosité (%)	Indice des vides (%)
61.25		40.15	65.35

3.2.2. CARACTERISTIQUES DES GRAVIERS

Les granulats sont caractérisés par des spécificités qu'ils doivent satisfaire pour réaliser une bonne utilisation dans différents domaines. Ces spécifications dites caractéristiques des granulats sont bornées par des normes et des exigences. Elles servent à prendre en compte l'utilisation, la fiabilité, l'économie en se basant sur les recherches et les expériences scientifiques. Les fractions utilisées appartiennent à la plage 3-20 mm soit : (3/8), (8/15) et (15/20).

3.2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis,

Emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

La quantité à utiliser doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient

pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée doit répondre au critère suivant:

$$M > 0,2D_{max}$$

D_{max} : diamètre maximal du gros granulat en mm.

M : la masse de l'échantillon en (kg).

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on des place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil ensuite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois [43]

. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux (3.6). Les courbes granulométriques de différentes fractions similaires utilisées sont tracés dans la figure (3.4)

Tableau .3.6. Analyse granulométrique de gravier par tamisage

Module Afnor	Tamis en mm	Tamisât (%)					
		Gravier (3/8)		Gravier (8/15)		Gravier (15/20)	
		naturel	recyclé	naturel	recyclé	naturel	recyclé
46	31.5						
45	25					99.05	78.45
44	20			100		76.60	4.33
43	16			100	92.67	14.38	0.40
42	12.5		98.82	70.83	35.10	2.56	0.25
41	10	100	66.44	37.87	12.17	0.70	0.23
40	8	94.48	37.69	15.62	3.30		
39	6.3	77.11	14.32	1.95	1.10		
38	5	54.62	3.94				
35	2.5	8.13	0.72				
32	1.25	1.22					

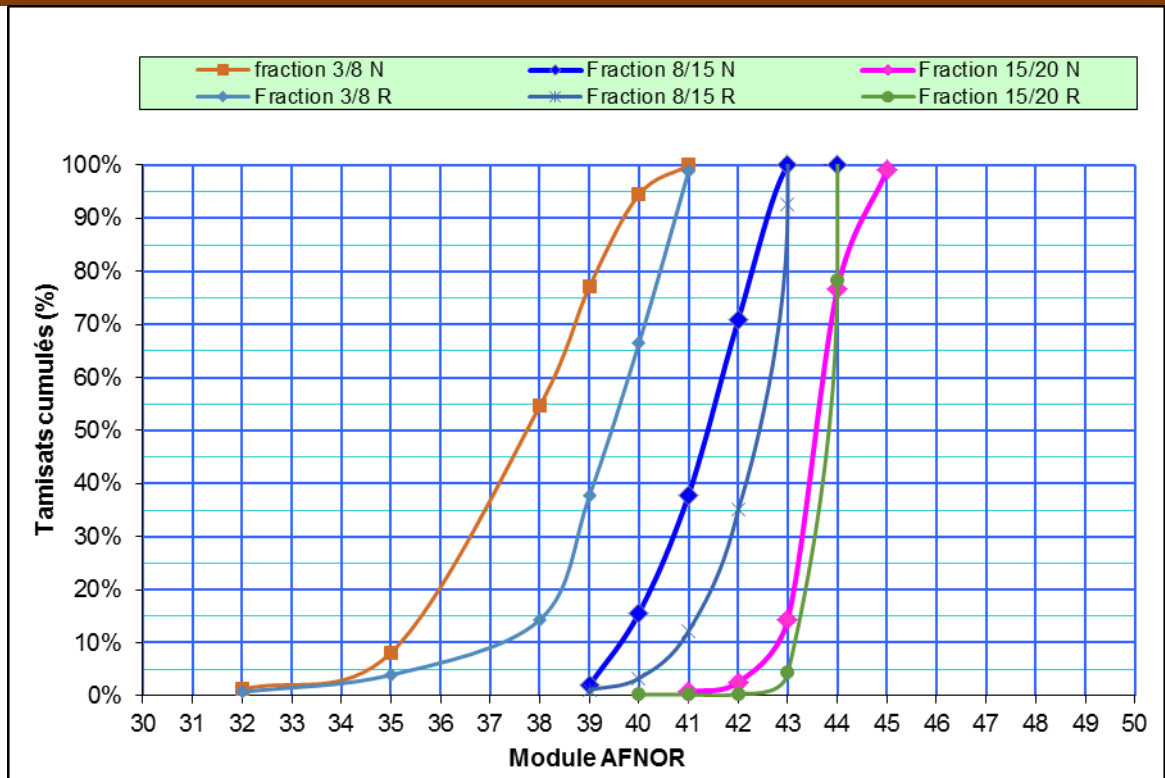


Figure. 3.4. Courbe granulométrique des granulats (3/8), (8/15), (15/20).

3.2.2.2 Masse volumique (NF P 18 -555)

On appelle masse volumique d'un corps, la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue :

- ✓ **Masse volumique apparente à l'état lâche** : Masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.
- ✓ **Masse volumique absolue** : Masse de l'unité de volume d'un corps sans tenir compte des vides qu'elle contient.

Tableau. 3.7. La masse volumique des graviers.

Type de gravier	P _{app} (kg/l)		P _{abs} (kg/l)	
	naturel	recyclé	Naturel	recyclé
(3/8)	1.34	1.31	2.60	2.38
(8/15)	1.37	1.32	2.60	2.49
(15/20)	1.40	1.41	2.60	2.48

Porosité, compacité et indice des vides : NF P 18-554 :

3.2.2.3 La porosité

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente

donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides. La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

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

3.2.2.4 La compacité

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle est exprimée en pourcentage (%) et donnée par la relation suivante :

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

3.2.2.5 L'indice des vides

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e = \frac{P}{100 - P}$$

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

Tableau 3.8. Porosité, compacité et indice des vides du gravier

Fraction de gravier	Porosité (%)		Compacité (%)		L'indice de vide	
	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé	Naturel	Recyclé
(3/8)	48.41	44.66	51.58	55.34	0.93	0.8
(8/15)	48.20	46.93	51.79	55.07	0.93	0.88
(15/20)	47.80	43.14	52.19	56.86	0.91	0.76

3.2.2.6 Degré d'absorption d'eau : NF P 18-554

Elle est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage d'après formule suivante :

$$A = \left(\frac{M2 - M1}{M1} \right) \times 100 [\%]$$

Ou :

M1 : la masse du matériau sec en (g).

M2 : la masse du matériau saturé d'eau superficiellement sec (g).

Tableau .3.9. Degré d'absorption d'eau de gravier.

Type de gravier	Absorption (g)%		
	naturel	recyclé	Recyclé (traité)
(3/8)	2.38	8.65	/
(8/15)	1.52	4.28	/
(15/20)	1.21	2.92	1.97

3.2.2.7 La RESISTANCE A LA FRAGMENTATION PAR CHOCS, ESSAI LOS ANGLOS (NFP18-573)(1990)

L'essai Los Anglos permet de mesurer la résistance des graviers à la fragmentation par choc, dans la machine de Los Anglos. L'essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Le principe d'essais

consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Anglos.

Introduire avec précaution la charge de boules correspondant à les classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50).la charge est fi indications du tableau ci-après.



Figure. 3.5. Appareil de l'essai Los Anglos.

Principe de l'essai :

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

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles LA) : $LA = (m/M).100$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau 3.10. Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Type de gravier	Coef L _A %	
	naturel	recyclé
(3/8)	21 %	38.90 %
(8/15)	19 %	32.18 %
(15/20)	22 %	27.72 %

Classification

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

Tableau. 3.11. Classification des roche en fraction du coefficient L_a

Coefficient L _a	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Commentaire :

- *Assez d Le gravier naturel (3/8) :c'est un gravier dure (LA=21 %) / (LA entre 20 à25),
- *Le gravier naturel (8/15) :c'est un gravier très dure (LA=19 %) / (LA <20),
- *Le gravier naturel (15/20) :c'est un gravier dure (LA=22 %) / (LA entre 20 à25)
- *Le gravier recyclé (3/8) :c'est un gravier mis dure (L_a=38.90)/ (L_a entre 30 à 40).
- *Le gravier recyclé (8/15) :c'est un gravier mis dure (L_a=32.18)/ (L_a entre 30 à 40).
- *Le gravier recyclé (15/20) :c'est un gravier ure (L_a=27.72)/ (L_a entre 25 à 30).

CHAPITRE 03 : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BCR

3.2.3 CARACTERISTIQUES DU CIMENT UTILISE

Le ciment CPJ-CEM 2/A 42,5 est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker 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.

3.2.4 EAU DE GACHAGE

Il s'agit de l'eau du robinet de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

3.2.5 Le laitier

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-hadjar 'Annaba, Algérie', c'est un poudre, et une surface Spécifique Blaine de 8 500 cm²/g. Les principaux composants chimiques de ce type de laitier sont la chaux, la silice, l'alumine et la magnésie qui représentent 95 à 97% de la composition totale du laitier.

3.2.6 Le MEDACURE

Est un produit qui se présente sous la forme d'un liquide blanchâtre destiné à recouvrir les bétons et mortiers frais pour les protéger contre la dessiccation.

Propriété du medacure :

Est un produit de cure qui adhère parfaitement sur les bétons et mortiers et qui possède un bon pouvoir couvrant.

Après pulvérisation sur béton frais, il se polymérise au contact de l'air et forme une fine pellicule qui le protège contre une dessiccation prématurée, empêche l'évaporation rapide de l'eau de gâchage, réduisant

3.3 FORMULATION DU BCR ET PROCEDURES DES ESSAI REALISES

3.3.1 Fuseau granulométrique

Pour choisir les pourcentages de différentes fractions d'agrégats il faut que la courbe combiné soit à l'intérieur du fuseau, les résultats sont représentés dans le tableau 3.12 et la figure 3.6.

Tableau. 3.12. Tamisât de différentes fractions d'agrégats

Tamis (mm)	sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Gravier (15/20)	combine
20	100	100	100	76.60	97.66
16	100	100	100	14.38	91.44
12.5	100	100	70.83	2.56	84.42
10	100	100	37.87	0.70	77.64
8	100	94.48	15.62		71.54
6.3	100	77.11	1.95		63.59
5	95.75	54.62			55.15
2.5	83.14	8.13			36.16
1.25	74.87				30.77
0.63	64.31				26.55
0.315	47.80				19.95
0.16	16.37				7.37
0.08	1.56				1.45
fond	0				0

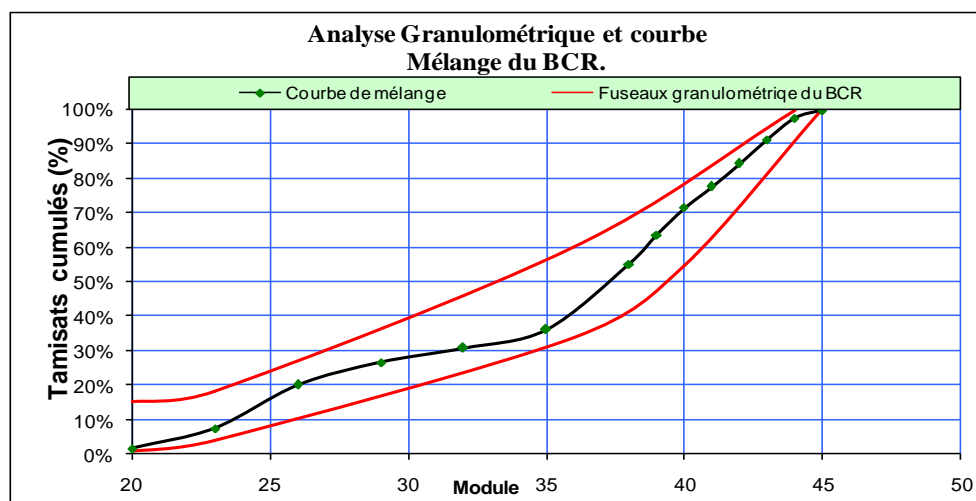


Figure 3.6. Fuseau granulaire.

3.3.2 Pourcentage des granulats

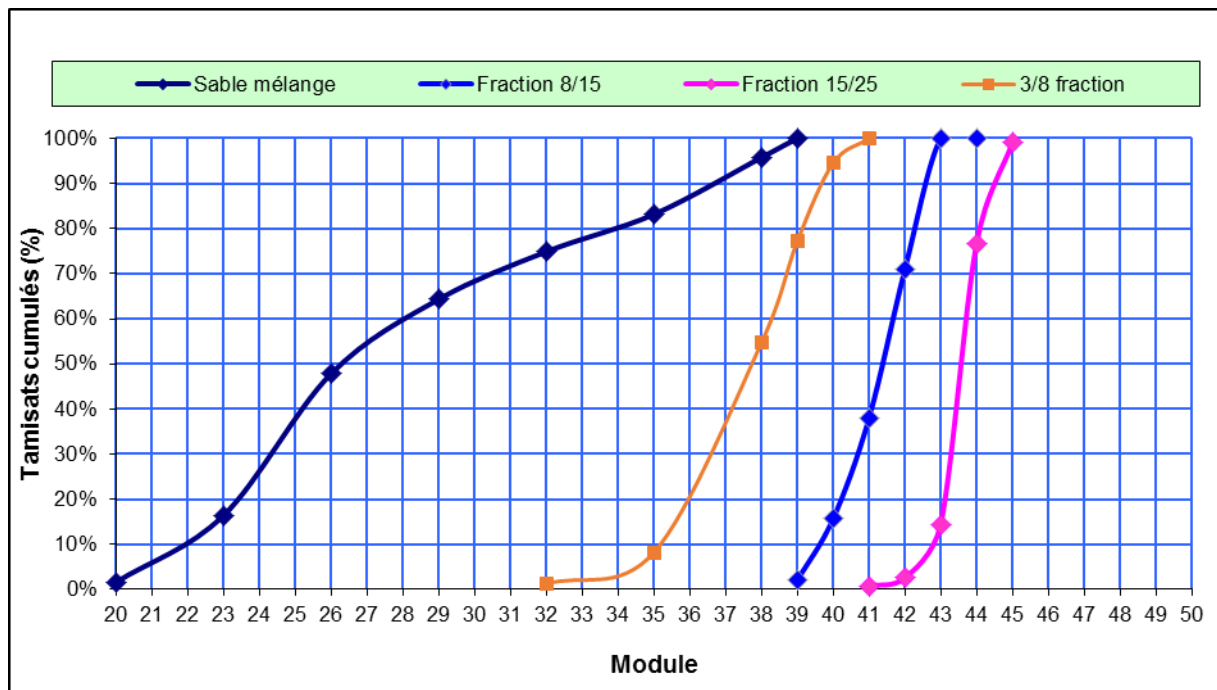


Figure 3.7. Détermination les pourcentages des différentes fractions des granulats.

D’après le fuseau granulaire correspondant au mélange, nous avons obtenu les pourcentages des différentes fractions des granulats tels que montrés dans la figure.3.7

Tableau 3.13.Poucentage des granulats.

Sable de dune	40%
Gravier 3/8	30%
Gravier 8/15	20%
Gravier 15/20	10%

3.3.3. Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment :

La quantité d’eau optimale est déterminée à l’aide de l’essai de marteau piqueur Hilti. Cette méthode permet de sélectionner la teneur en eau qui correspond à la masse volumique sèche maximale.

Conduite de l’essai :

- ✓ Premièrement, la proportion des granulats fins par rapport aux granulats grossiers est déterminée par les fuseaux granulométriques donnés à la figure 3.6.
- ✓ Une série de mélanges de béton à différentes teneurs en liant avec trois teneurs en eau (4, 5, 6%) sont réalisés. La quantité de liant varie entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3.13.
- ✓ Le moule à un volume de 0,00157 m³, la masse des granulats utilisée pour chaque gâchis est de 4.790 Kg après séchage à l’étuve pendant 24 heures afin de déterminer une teneur en eau précisée.

Tableau.3.14. Les quantités des granulats, ciment et d'eau pour les mélanges de BCR.

12% Ciment						
mode	Eau (%)	Ciment(kg)	Sable(kg)	G3/8 (kg)	G8/15(kg)	G15/20(kg)
1	4	0.574	1.978	1.100	1.028	0.688
2	5					
3	6					
13% Ciment						
mode	Eau (%)	Ciment(kg)	Sable(kg)	G3/8 (kg)	G8/15(kg)	G15/20(kg)
1	4	0.623	1.978	1.100	1.028	0.688
2	5					
3	6					
14% Ciment						
mode	Eau (%)	Ciment(kg)	Sable(kg)	G3/8 (kg)	G8/15(kg)	G15/20(kg)
1	4	0.670	1.978	1.100	1.028	0.688
2	5					
3	6					

Tableau 3.15. Résultats de la formulation aux différents dosages en ciment et teneurs en eau.

12% ciment			
Teneur en eau (%)	4	5	6
Volume de moule	0,00157	0,00157	0,00157
Masse volumique frais	2310,15	2356,35	2328,35
Masse volumique sec	2253,35	2271,65	2252,16
Résistance à la compression en Mpa (07 jours)	14,15	18,23	15,45
13% ciment			
Teneur en eau (%)	4	5	6
Volume de moule	0,00157	0,00157	0,00157
Masse volumique frais	2348,05	2378,53	2331,14
Masse volumique sec	2264,12	2278,13	2258,05
Résistance à la compression en Mpa (07 jours)	15,82	20,78	16,22
14% ciment			
Teneur en eau (%)	4	5	6
Volume de moule	0,00157	0,00157	0,00157
Masse volumique frais	2334,12	2363,38	2362,23
Masse volumique sec	2258,42	2268,56	2255,52
Résistance à la compression en Mpa (07 jours)	15,54	19,56	18,82

La relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau à chaque pourcentage du ciment est mise en graphique, comme montré à la Figure III.10, la valeur maximale sur la courbe correspond ; en abscisse : à la teneur en eau optimale permettant d’obtenir le mélange à masse volumique sèche la plus grande.

densité tonne/ m³

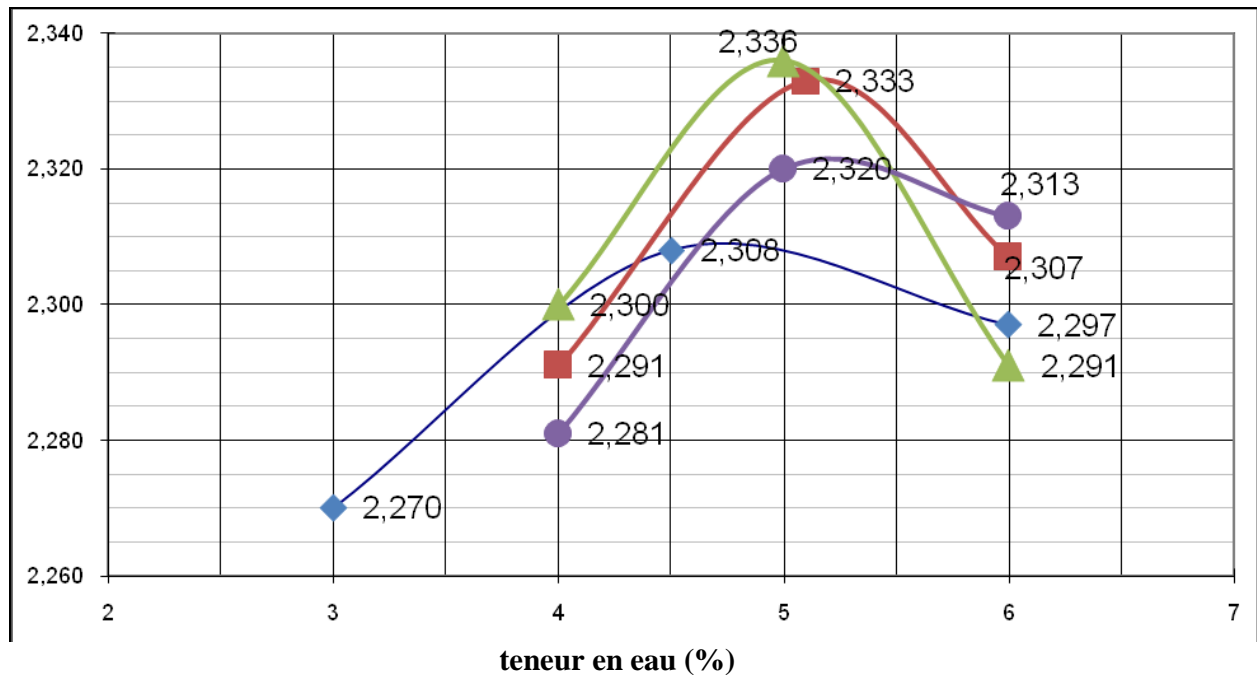


Figure3.8 : la densité sèche en fonction de la teneur en eau et le dosage de ciment.

Commentaire et discussion des résultats :

A partir des résultats représentés ci-dessus nous tirons les observations suivantes :

- ✓ Pour la teneur en eau ; les résultats obtenus aux dosages en ciment 12 et 14 % montrent que l’optimum est compris entre 5 et 6 %,
- ✓ En ce qui concerne la densité, les résultats obtenus montrent une densité du BCR plus élevée avec 13 et surtout 14 % en ciment.
- ✓ En ce qui concerne les dosages en ciment, la valeur ayant conduit aux résultats les plus satisfaisants et requise pour notre béton est : 13% : tant pour la résistance (20,78MPa) que pour la masse volumique 2378,53kg/m³

Sur la base que ce qui a précédé nous avons opté pour :

- Une teneur en eau optimal égale à 5 % de la masse total des agrégats secs.
- Un dosage en ciment égale à 13% de la masse total des agrégats sec.

3.3.4. Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR :

Après la détermination de la teneur en eau 5% et le dosage du ciment 13% les pourcentages des constituants de formulations du BCR dans un mètre cube (1m³) deviennent comme suit :

CHAPITRE 03 : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION DU BCR

Tableau 3.16 : Pourcentage des constituants de BCR dans un (m³).

Sable de	33.9%
Gravier3/8	27%
Gravier8/1	14.8%
Gravier15/	11.3%
Ciment	13%
Eau	5%

Tableau 3.17 : Les quantités des constituants de BCR dans un (m³).

Matériaux	Sable	Gravier3/8	Gravier8/15	Gravier15/20	Ciment	Eau
Quantité en kg/m ³	732	586	322	246	291	109

**CHAPITRE 04 :
RESULTATS ET
DISCUSSION**

Chapitre 04

4-1-Introduction :

Afin d'évaluer l'effet des granulats recyclés sur la performance du BCR, quatre mélanges ont été préparés avec différentes teneurs en granulats recyclés: 25, 50, 75 et 100%. Ces mélanges ont été comparés au mélange sans granulats recyclés 100% granulats naturels (témoin). Les granulats recyclés utilisés ont été ajoutés au BCR en remplacement d'une partie du volume total des graviers naturels. Le compactage a été effectué en utilisant d'un marteau de compactage vibrant conforme à la norme NF EN 12697-32+A1 [44] figure (4.1), tous les éprouvettes étudiés ont été démoulés après 24h de leur préparation, et conservés dans des conditions de laboratoire (20 ° C et 60-70% HR) jusqu'à la date du test.



Figure (4.1): Marteau Vibrant

Après avoir connu l'effet des granulats recyclés sur le BCR et pour améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du BCR à base des granulats recyclés, un traitement à été fait sur les agrégats recyclés, ce traitement se fait en deux étapes :

Dans la première étape, nous avons lavés les granulats recyclés et les incorporés directement dans le BCR.

La deuxième étape : après avoir lavé les granulats recyclés nous avons les pulvérisés au Medacure et puis au laitier. Les granulats recyclés traités ont été incorporés dans le BCR en remplacement d'une partie du volume total des graviers naturels.

La figure (4.2) montre les étapes de traitement des granulats recyclés :

La résistance à la compression à été évaluée à des âges de 7, 14 et 28 jours selon les normes ASTM C39/C39M-11a [45], ASTM C496 [46]. Le retrait a été mesuré selon la norme ASTM C 157 / C 157M - 03 [42] et l'absorption d'eau totale et capillaire ont été évaluées.

Des éprouvettes cubiques (100x100x100 mm), ont été utilisées pour la mesure de la résistance à la compression qui à mesurée a l'aide d'une presse à béton figure (4.3). Des éprouvettes prismatiques (70x70x280 mm) ont été utilisées pour le retrait, l'équipement utilisé dans la mesure du retrait est montré dans la figure (4.4), tandis que pour l'absorption d'eau, des spécimens de cylindres (100x200 mm) ont été utilisés.

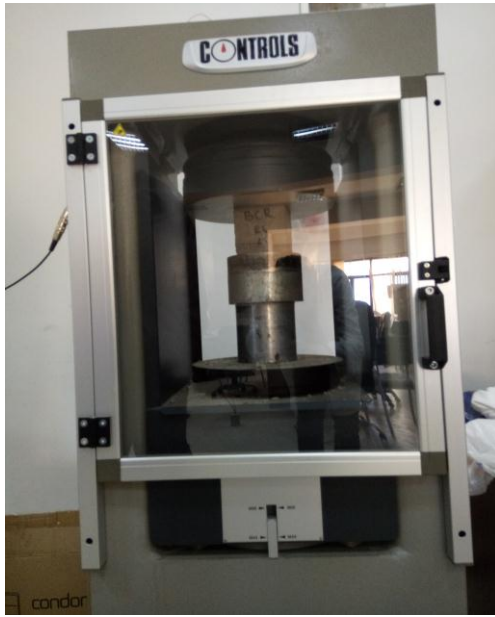


Figure (4.2): Presse à béton



Figure (4.3) : équipement pour le retrait

- Pour tous les tests, la moyenne arithmétique de trois valeurs a été prise.

Abréviation :

BCRGN : Béton compacté aux rouleaux à base des granulats naturels (BCR témoin ou BCR de référence).

BCR25%GR : Béton compacté aux rouleaux à base de 25% des granulats recyclés.

BCR50%GR : Béton compacté aux rouleaux à base de 50% des granulats recyclés.

BCR75%GR : Béton compacté aux rouleaux à base de 75% des granulats recyclés.

BCRGR : Béton compacté aux rouleaux à base de 100% des granulats recyclés (BCR recyclé).

BCRGRL : Béton compacté aux rouleaux à base de 100% des granulats recyclés lavés.

BCRGRLT : Béton compacté aux rouleaux à base de 100% des granulats recyclés lavés et traité.

L'ensemble des résultats sont regroupés dans les tableaux suivant :

Tableaux (4.1) : Résultats d'essais à la compression Rc (MPa)

Taux des GR (%)	0%	25%	50%	75%	100%		
Age (jours)	BCRGR	BCR25%GR	BCR50%GR	BCR75%GR	BCRGR	BCRGRL	BCRGRLT
7	22,9	27,1	31,0	28,9	21,9	/	/
14	34,3	33,1	33,1	30,7	28,1	/	/
28	45,5	35,4	33,3	22,0	26,1	34,4	47,9

Tableaux (4.2) : Résultats d'essais de retrait (%)

Taux des GR (%)	0%	25%	50%	75%	100%		
Age (Jours)	BCRGR	BCR25%GR	BCR50%GR	BCR75%GR	BCRGR	BCRGRL	BCRGRLT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	/	/
2	0,0270	0,0569	0,1247	0,2430	0,2643	/	/
3	0,0486	0,1721	0,2970	0,3445	0,3590	/	/
7	0,1890	0,2782	0,3683	0,4374	0,4611	/	/
10	0,2468	0,3213	0,3861	0,4587	0,5015	/	/
14	0,2905	0,3597	0,3894	0,4647	0,5092	/	/
17	0,2916	0,3672	0,3980	0,4678	0,5046	/	/
20	0,3078	0,3729	0,4039	0,4617	0,5179	/	/
24	0,3132	0,3557	0,3980	0,4617	0,5099	/	/
28	0,3186	0,3597	0,4063	0,4556	0,5103	0,4189	0,3298

Tableaux (4.3) : Résultats d'essais d'absorption d'eau capillaire (%)

Age (Jours)	1	2	3	6	7	8
Taux des GR (%)						
BCRGR	2,27	2,28	2,30	2,32	2,34	2,36
BCR25%GR	2,71	2,74	2,74	2,78	2,79	2,78
BCR50%GR	2,96	3,15	3,22	3,23	3,26	3,21
BCR75%GR	3,24	3,25	3,28	3,32	3,34	3,37
BCRGR	3,25	3,29	3,29	3,34	3,35	3,39
Age (Jours)	9	10	13	14	15	16
Taux des GR (%)						
BCRGR	2,38	2,42	2,45	2,48	2,51	2,53
BCR25%GR	2,81	2,82	2,87	2,87	2,88	2,89
BCR50%GR	3,32	3,33	3,34	3,40	3,42	3,45
BCR75%GR	3,40	3,46	3,50	3,54	3,58	3,62
BCRGR	3,43	3,47	3,53	3,59	3,60	3,67
Age (Jours)	20	21	22	23	24	27
Taux des GR (%)						
BCRGR	2,58	2,61	2,64	2,65	2,66	2,66
BCR25%GR	2,95	2,94	2,93	2,97	2,97	3,01
BCR50%GR	3,51	3,50	3,53	3,54	3,56	3,59
BCR75%GR	3,68	3,72	3,78	3,79	3,80	3,80
BCRGR	3,75	3,73	3,81	3,86	3,86	3,91
BCRGRL	/	/	/	/	/	3.15
BCRGRLT	/	/	/	/	/	2.65

Tableaux (4.4) : Résultats d’essais d’absorption d’eau totale (%)

Age (Jours)	1	2	5	6	7	8
Taux des GR (%)						
BCRGR	3,96	4,17	4,29	4,31	4,37	4,39
BCR25%GR	4,12	4,39	4,52	4,54	4,60	4,62
BCR50%GR	4,39	4,68	4,88	4,89	4,92	4,96
BCR75%GR	5,01	5,09	5,22	5,25	5,30	5,32
BCRGR	5,09	5,26	5,43	5,45	5,52	5,53
BCRGRL	/	/	/	/	/	4.92
BCRGRLT	/	/	/	/	/	4.32

4-2- Béton frais

Lors de la confection des éprouvettes, nous avons remarqué que les bétons recyclés étaient peu denses et présentaient une forte ségrégation par rapport au béton témoin (à base de 100% de granulats naturels). A l’état frais, le béton recyclé présente des densités plus faibles en comparaison à celle du béton de référence.



Figure (4.4) : apparition d'une ségrégation claire dans le BCR à base des GR

4-3- Béton durci

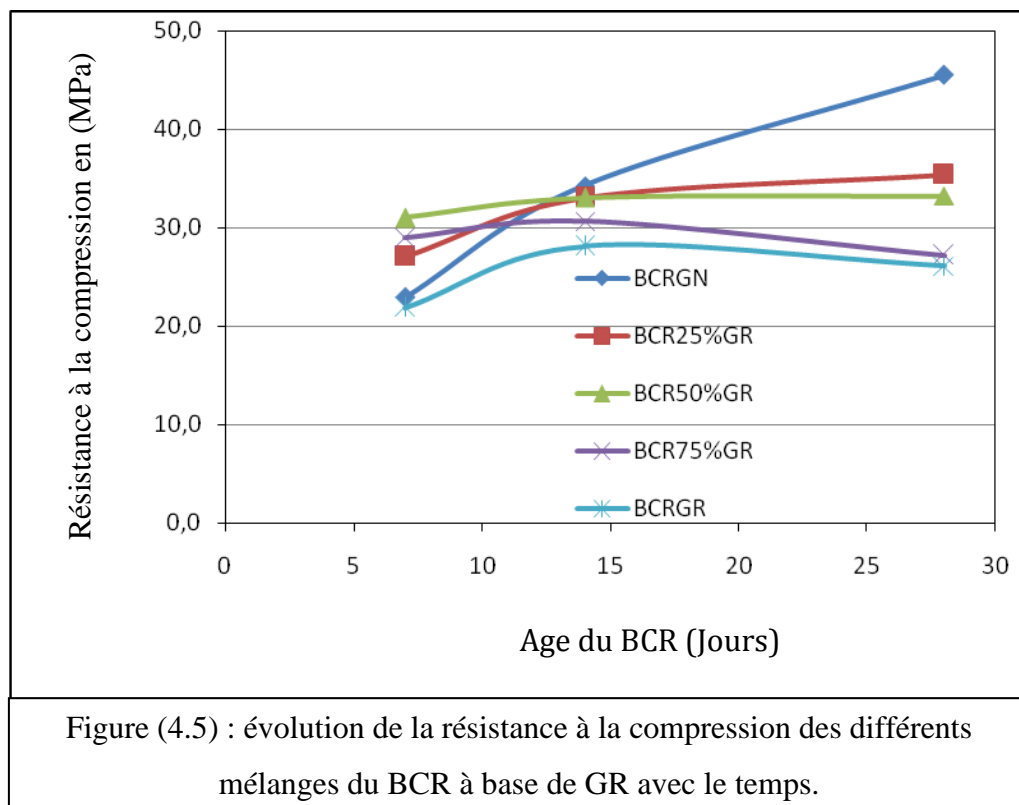
4-3-1- Effet de granulats recyclés sur les propriétés du BCR

4-3-1-1- Analyse des propriétés mécaniques (Résistance à la compression):

Généralement la résistance à la compression du BCR recyclés évolue au cours du temps d’une façon similaire que le BCR témoin figure (4.5); cependant, elle chute en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés figures (4.6) et (4-7). A 28 jours, pour le BCR à base de granulats d’ancien béton concassé, la chute de résistance est de l’ordre de 20% pour le BCR de 25% de GR, 25% pour le BCR de 50% de GR, et jusqu’à 40% pour le BCR de 75% de GR, et 43% pour le BCRGR. Katz [47], a trouvé une chute de résistance à la compression de 24% pour un béton à base gros et fins granulats d’ancien béton. Ces résultats sont comparables à une moyenne de 15 à 30% trouvée par d’autres chercheurs [48, 49, 50].

Cette chute de la résistance à la compression est due principalement à la présence de poussière de concassage dans les granulats recyclés augmente la quantité d’eau efficace pour maintenir la consistance et par suite diminue la résistance. Il ne faut pas non plus oublier l’effet du mortier provenant de l’ancien béton qui reste attaché aux granulats recyclés et qui gêne le bon déroulement de l’hydratation du ciment.

La perte de la résistance à la compression est 0.3127% par chaque 1% de remplacement de granulats recyclés Figure (4.7).



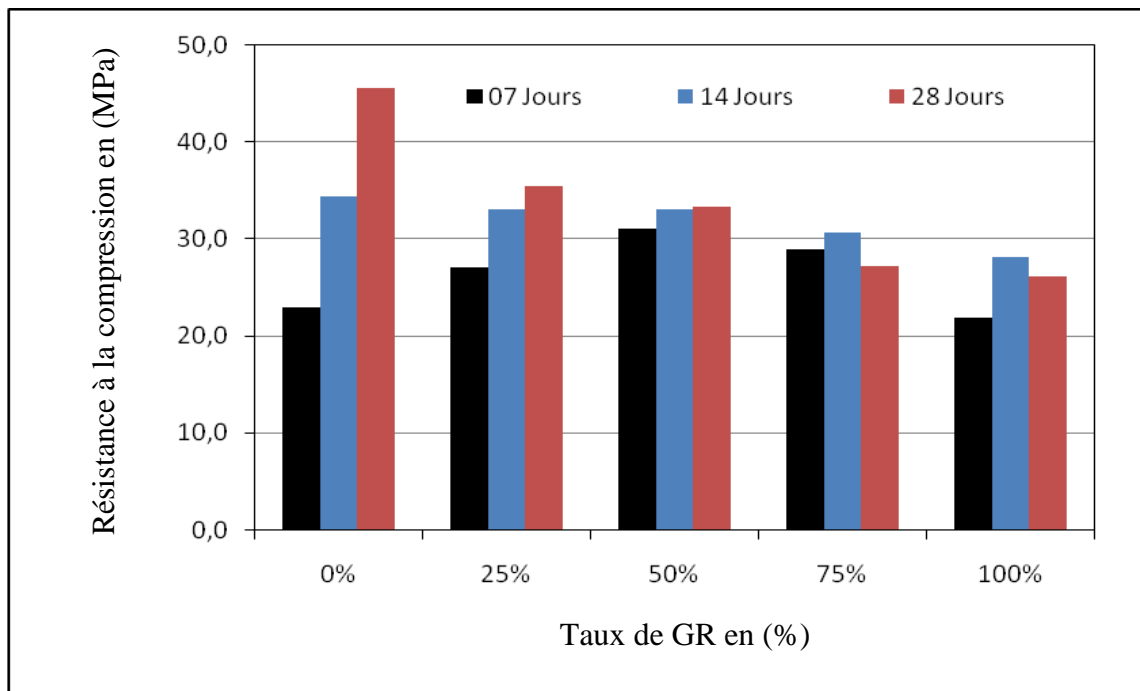


Figure (4.6) : effet de granulats recyclés sur la résistance à la compression du BCR.

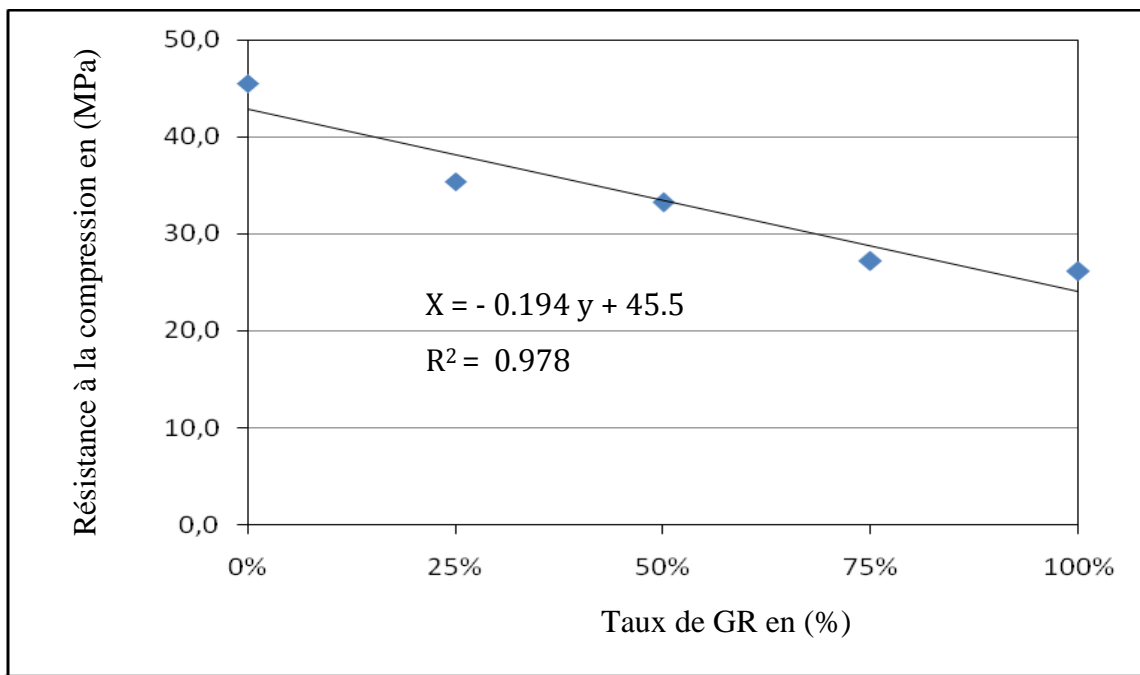


Figure (4.7) : Perte de résistance de compression en fonction de taux de GR du BCR à 28 Jours.

4-3-1-2- Analyse des propriétés Physiques :**A-Retrait :**

Dans le cas des bétons recyclés, les problèmes de retrait sont encore plus à craindre, compte tenu de la demande en eau supplémentaire pendant la fabrication.

La figure (4.8) représente l'évolution du retrait du BCR recyclé en fonction de temps, en générale cette figure montre que le retrait du BCR recyclé est évolué d'une façon similaire que celui du BCR témoin.

D'après les Figures (4.9) et (4.10), on remarque en général que le retrait à l'air libre des BCR recyclés est nettement plus important que celui du BCR d'agrégats naturels.

La Figure (4.8) montre que le retrait du BCR à base de 100% des granulats d'ancien béton concassé est plus grand de 43% que celui du béton témoin à 7 jours; au-delà, il accélère pour arriver à une augmentation de 60% à 28 jours. Des résultats similaires ont été trouvés par De Pauw et al. [54] Pour ce groupe de béton, le retrait élevé est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier de l'ancien béton qui recouvre ces granulats.

Pour les Quatre types du BCR réalisés (BCR25%GR, BCR50%GR, BCR75%GR et BCRGR) on remarque en général un retrait élevé à jeune âge (7 jours) figure (4.8), c'est à dire à un âge où le risque de fissuration est élevé car la résistance à la compression du BCR est faible; pour cela, il est probablement préférable de limiter le pourcentage de substitution en granulats recyclés et en particulier les granulats fins.

D'après les Figures (4.9) le retrait augmente (en générale de 13%, 28%, 43% et 60%) quand le pourcentage de substitution en granulats recyclés augmente (25%, 50%, 75% et 100%) successivement.

L'augmentation de retrait du BCR à base des granulats recyclés est 0.0019% par chaque 1% de remplacement de granulats recyclés Figure (4.10).

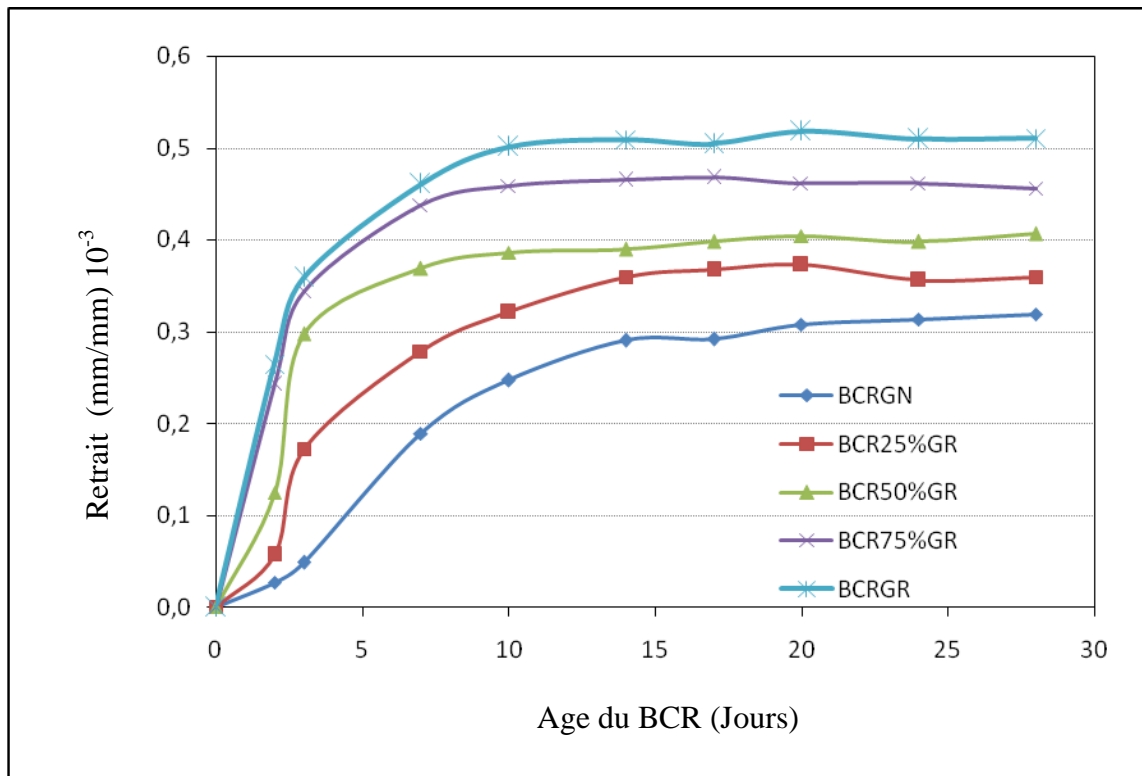


Figure (4.8) : évolution du retrait des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.

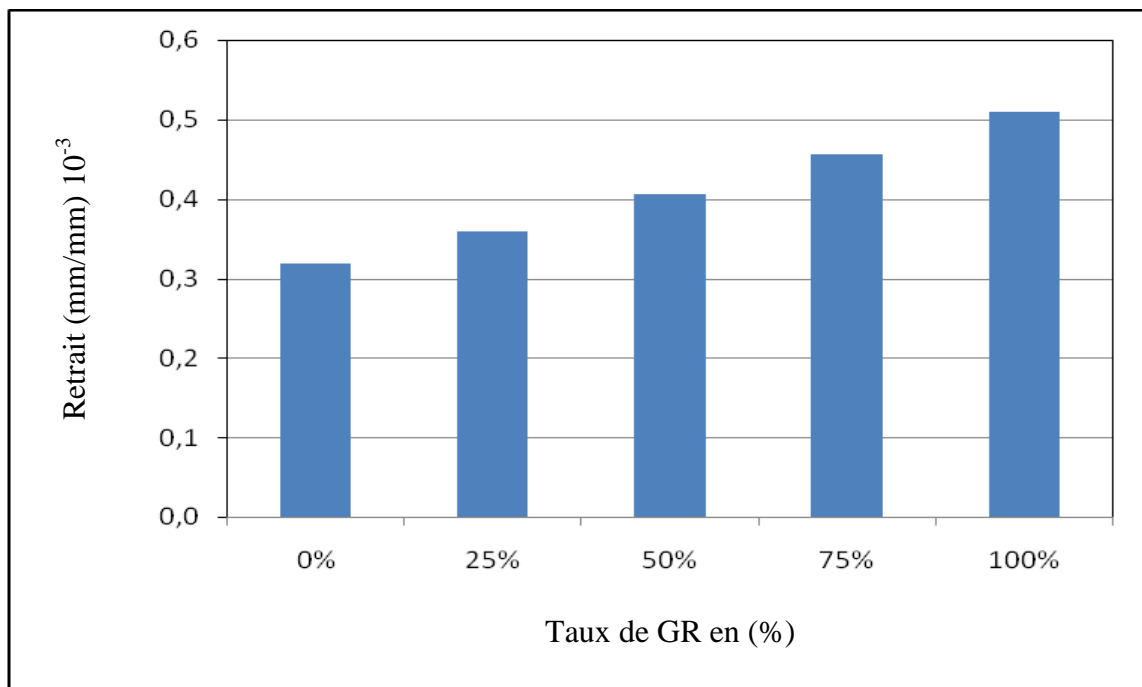
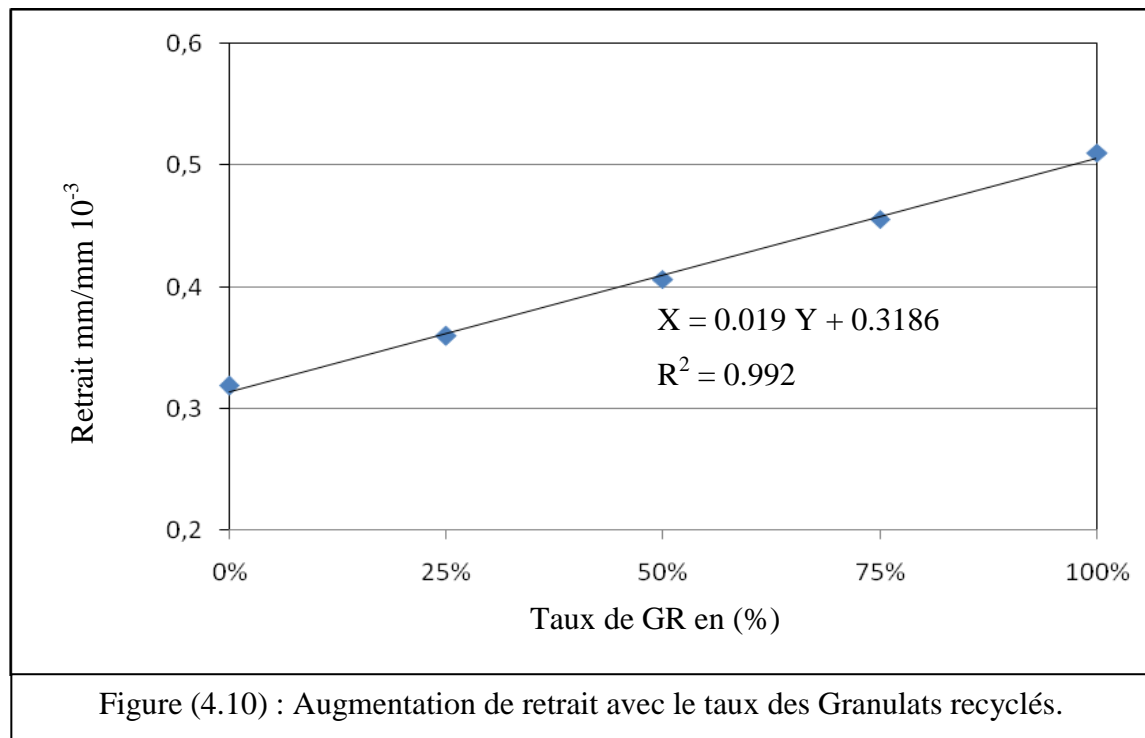


Figure (4.9) : effet de granulats recyclés sur le retrait du BCR à 28 Jours.



B-Absorption d'eau capillaire:

La figure (4.11) représente l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction de temps, d'après cette figure on remarque que l'absorption d'eau par capillarité du BCR recyclés est similaire que le BCR témoin.

Les Figures (4.12) et (4.13) montrent l'absorption d'eau par capillarité en fonction du taux des granulats recyclés. L'absorption d'eau par capillarité du BCR recyclé augmente en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés. Le BCR à base de 100% granulats recyclés est plus absorbant que les autres bétons recyclés et présente une absorption d'eau qui peut atteindre de 150% de celle du BCR de référence. L'absorption d'eau par capillarité des bétons recyclés est fort influencée par la nature et le pourcentage des granulats recyclés.

L'augmentation de l'absorption d'eau par capillarité du BCR est 0.013% par chaque 1% de remplacement de granulats recyclés Figure (4.13).

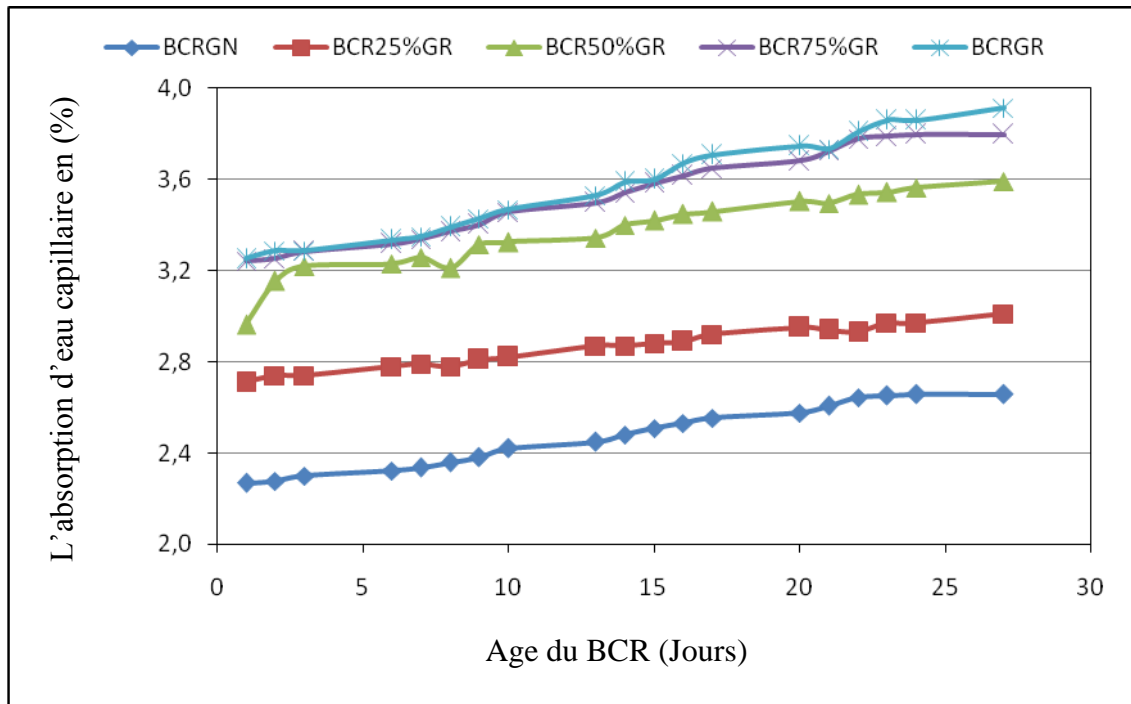


Figure (4.11) : évolution de l'absorption d'eau capillaire des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.

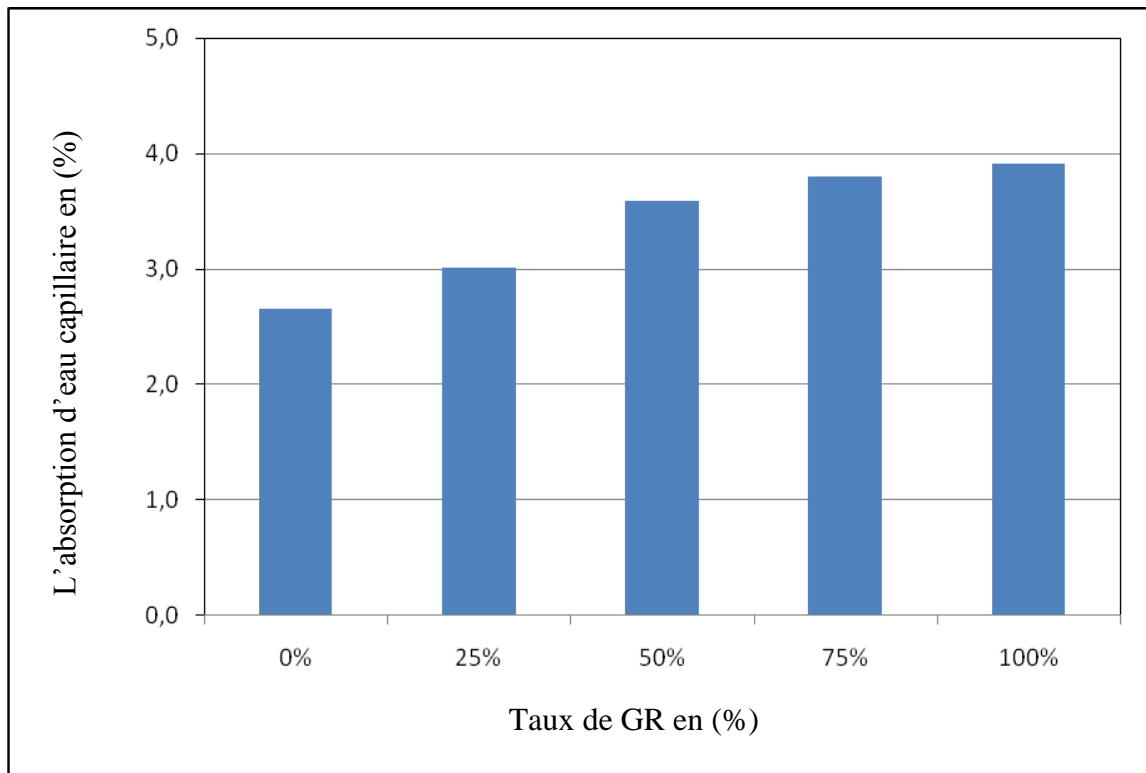
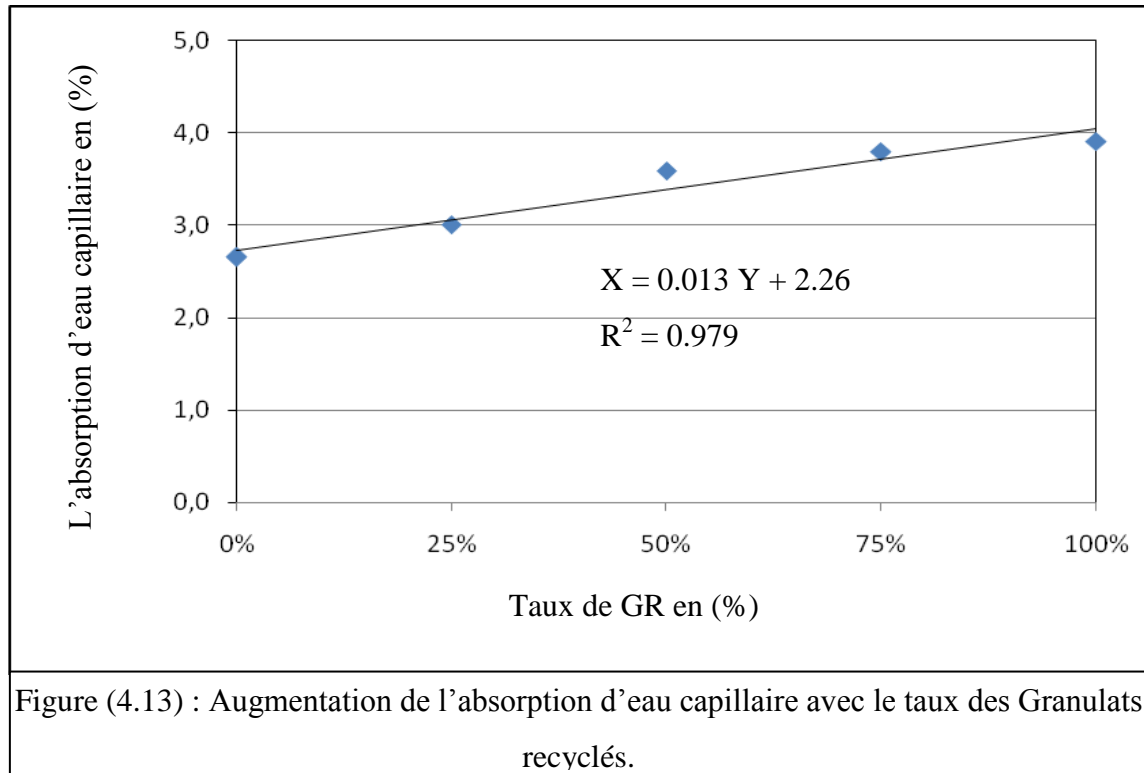


Figure (4.12) : Effet de granulats recyclés sur L'absorption d'eau capillaire du BCR.



C-Absorption d'eau totale :

L'évolution de l'absorption d'eau totale du BCR à base des agrégats recyclés en fonction de temps est similaire que le BCR de référence figure (4.14).

D'après les figures (4.15) et (4.16), l'absorption d'eau pour les quatre groupes (BCR25%GR, BCR50%GR, BCR75%GR, BCR100%GR) des BCR recyclés est plus élevée que celle du béton témoin.

Le pourcentage d'absorption d'eau augmente (en générale de 05%, 13%, 21% et 26%) quand le pourcentage de substitution en granulats recyclés augmente (25%, 50%, 75% et 100%) successivement. Une augmentation comparable à celle trouvée par Katz (2 fois) [47]. Ce comportement est attendu à cause des gros et fins granulats de bétons concassés, qui présentent un pourcentage d'absorption d'eau plus élevé 4 à 5 fois pour les gros que celui des granulats naturels. La variation observée est similaire à celle observée par Wirquin et al. [51, 52, 53].

Les valeurs élevées d'absorption d'eau du BCR à base de granulats recyclés, sont une indication propre de la porosité et de la perméabilité élevées de ce type de béton et, par conséquent, de l'effet négatif de l'emploi des ces granulats sur la durabilité des bétons.

L'augmentation de l'absorption d'eau totale du BCR est 0.011% par chaque 1% de remplacement de granulats recyclés Figure (4.16).

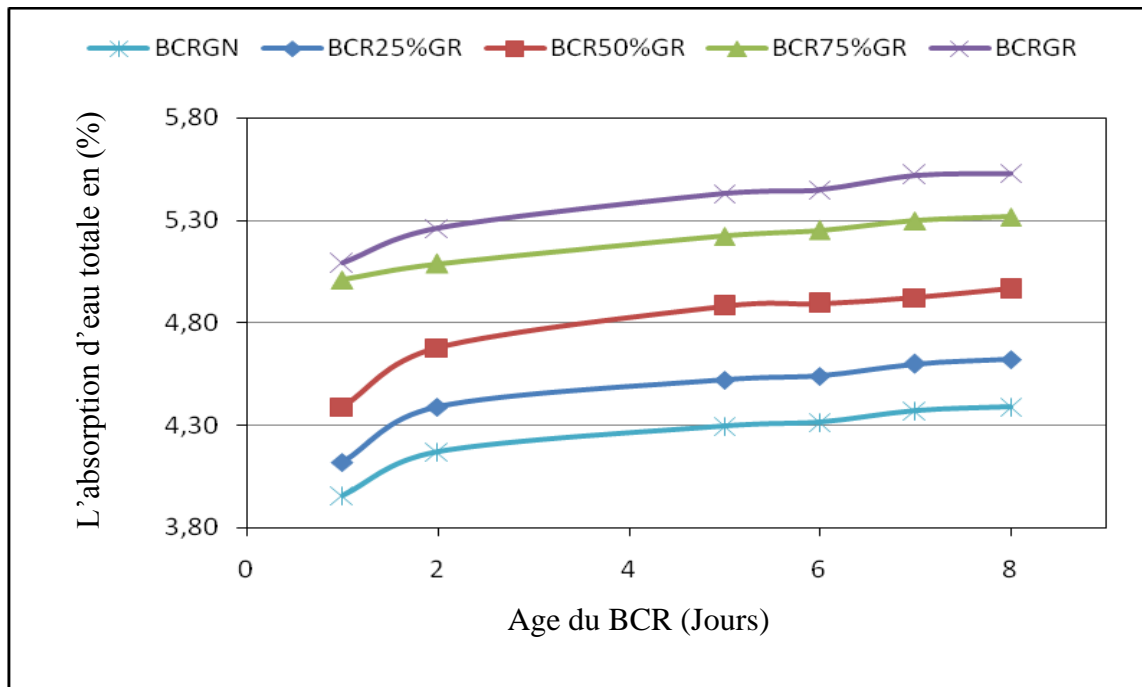


Figure (4.14) : évolution de l'absorption d'eau totale des différents mélanges du BCR à base de GR avec le temps.

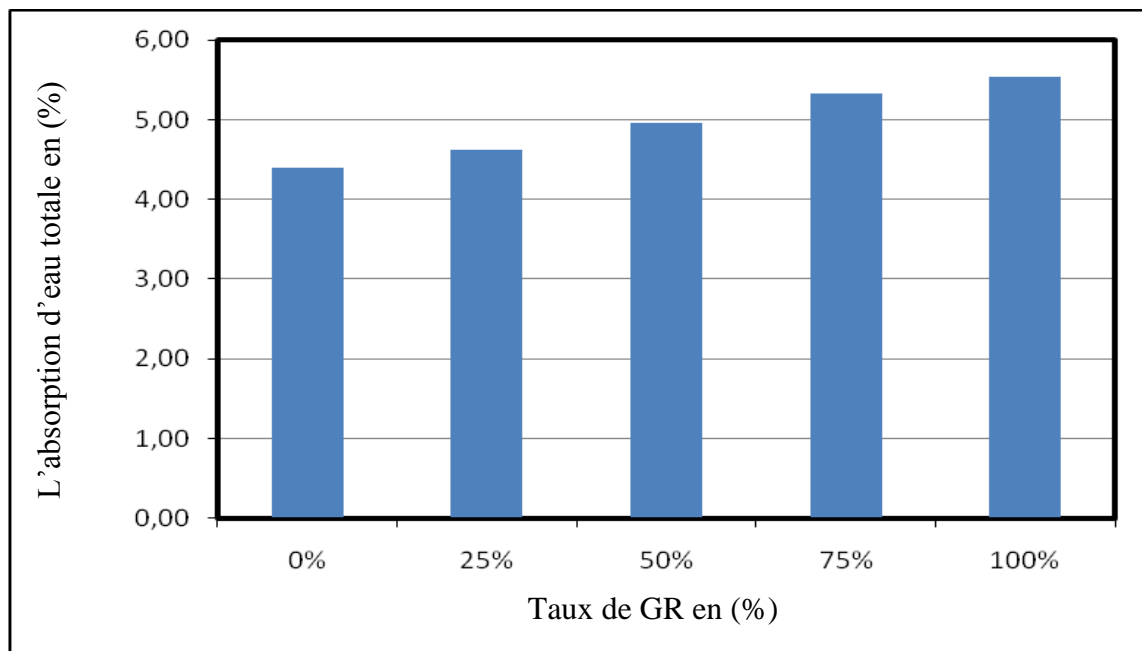
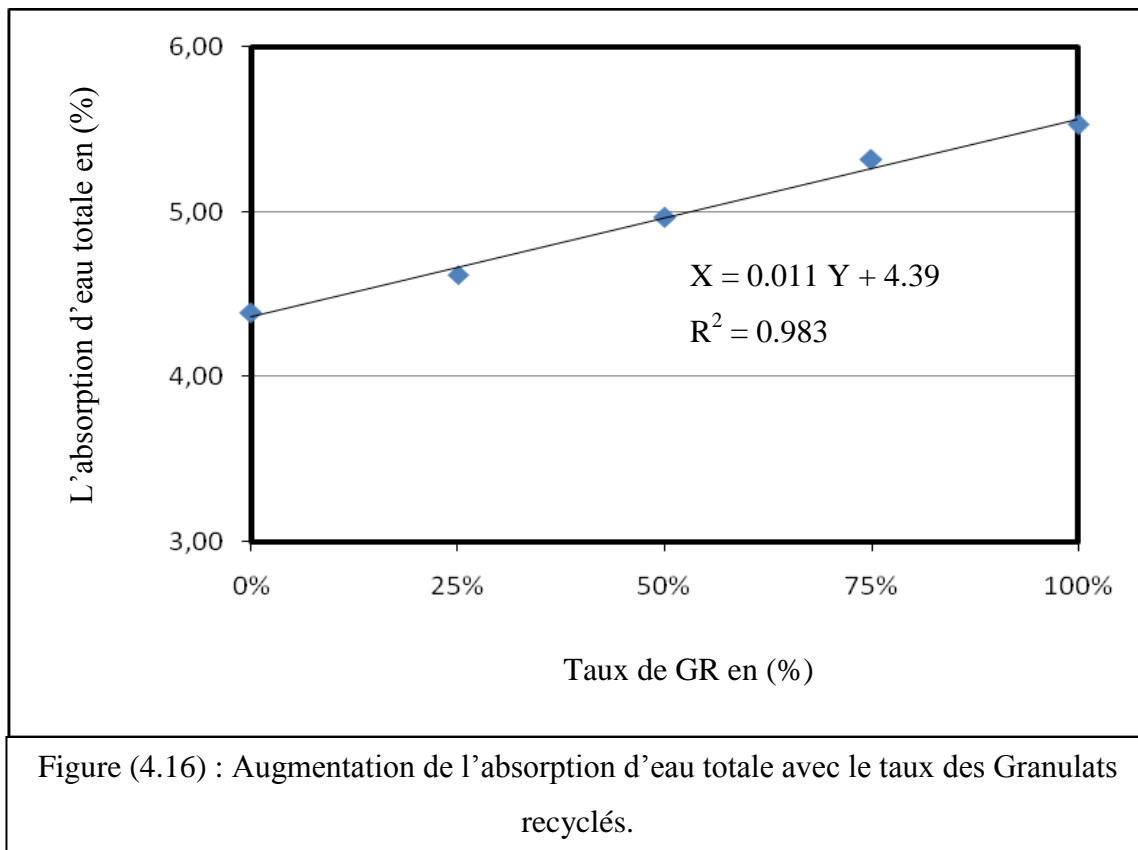


Figure (4.15) : Effet de granulats recyclés sur L'absorption d'eau totale du BCR.



4-3-2- Amélioration des propriétés du BCR recyclés par le traitement de la surface des Granulats recyclés :

4-3-2-1- Procédure expérimentale suivie :

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

Les granulats recyclés ont été lavés avec de l'eau pour enlever les impuretés adhérentes. Par la suite, elles ont été séchées à l'air pendant 48 h à température ambiante et utilisés directement dans les mélanges du BCR et Tout cela afin de connaître l'effet de la poussière de concassage sur les caractéristiques du BCR.

Les granulats recyclés ont été lavés avec de l'eau pour enlever les impuretés adhérentes. Par la suite, elles ont été séchées à l'air pendant 48 h à température ambiante. Après le séchage, un adjuvant (MEDACURE, produit par la société Granitex_ Alger) a été pulvérisé régulièrement sur les granulats à faibles quantités. Le laitier a été ajouté au mélange, puis l'ensemble a été malaxé pendant 30 secondes.

Les granulats recyclés ont été laissés pendant 48 heures à une température ambiante, pour assurer le bon durcissement de laitier. On a alors procédé au tamisage de l'ensemble pour éliminer le laitier non liés. La Figure (4.17) illustre l'aspect des GR après le traitement.

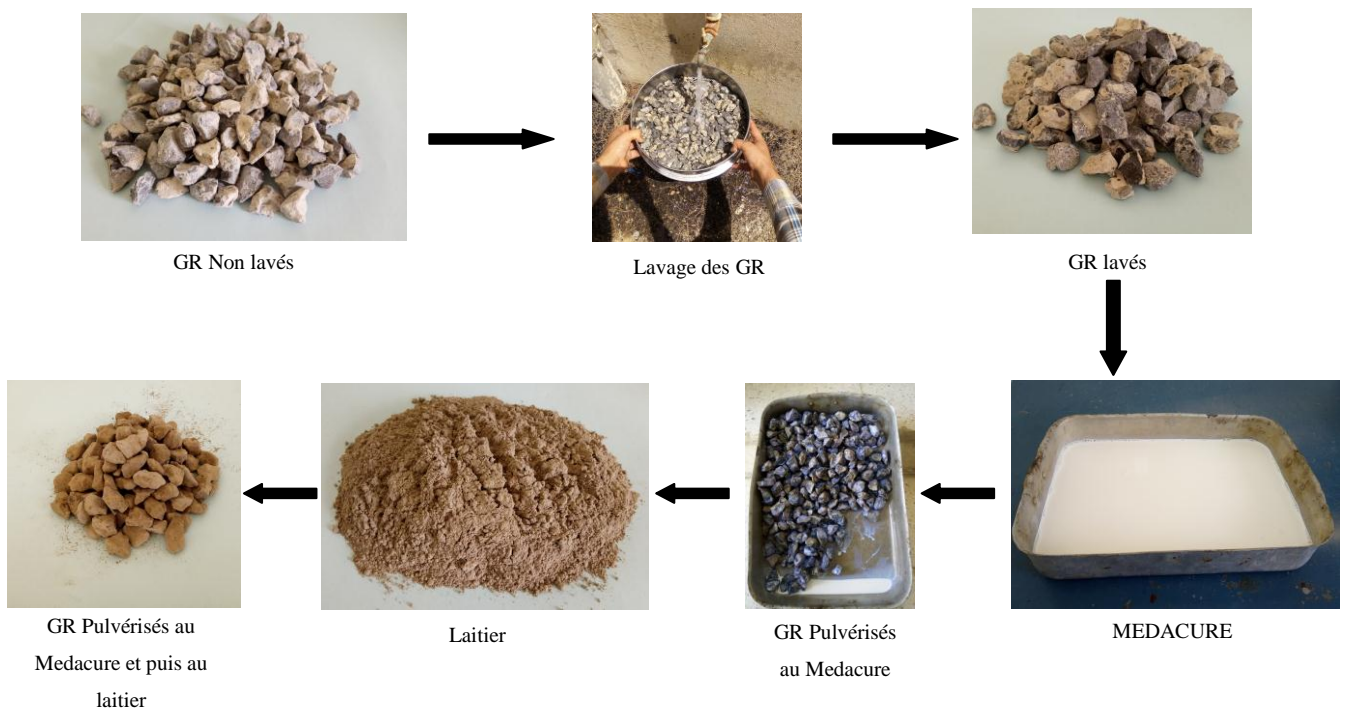


Figure (4.17): les étapes de traitement des granulats recyclés

4-3-2-1- Résultats et interprétations

Les Figures (4.18), (4.19), (4.20) et (4.21) illustrent les résultats obtenus en faisant varier l'état de la rugosité de la surface de granulats recyclés par l'enlèvement des impuretés liées au surface des agrégats et collage de la poudre de laitier par l'intermédiaire de produit adhésif (MEDACURE). On peut constater comment le traitement de la surface de granulats recyclés améliore clairement les propriétés du BCR.

Les Figures (4.18), montre l'effet de traitement de la surface des Granulats recyclés sur la résistance en compression à 28 jours. D'après cette figure le gain de résistance dépasse 30%, pour les granulats lavés ceci explique l'effet négatif de la poussière de concassage, et peut atteindre 60% pour les granulats recyclés traité par le laitier par rapport au mélange contenant la même quantité des granulats recyclés brut.

L'effet du traitement des granulats recyclés sur le retrait, est illustré dans la figure (4.19). On peut remarquer que la modification de la rugosité de la surface diminue de façon significative le retrait. Le retrait d'un BCR à base des granulats recyclés est amélioré de 35% par rapport au mélange contenant la même quantité des granulats recyclés brut.

L'effet du traitement des granulats recyclés sur l'absorption d'eau capillaire et totale est illustré dans les figures (4.20) et (4.21) respectivement. Dans ces figures, on peut remarquer une grande influence de traitement de GR sur l'absorption d'eau ceci explique par grande absorption des granulats recyclés à l'eau.

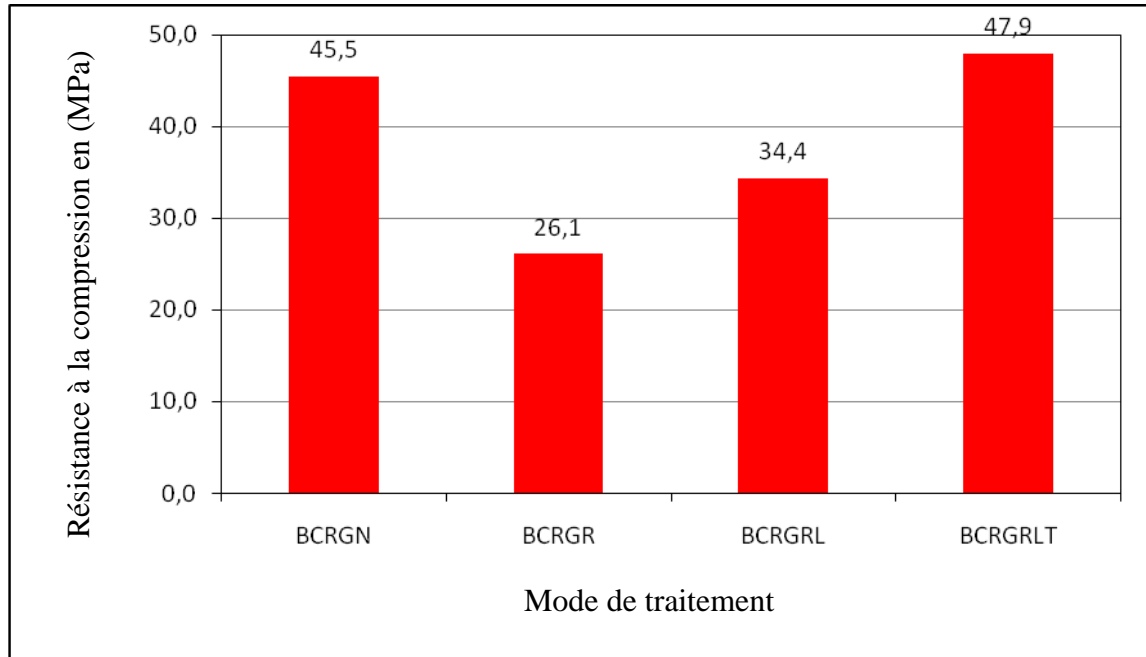


Figure (4.18) : Variation de la résistance à la compression en fonction du mode de traitement des GR.

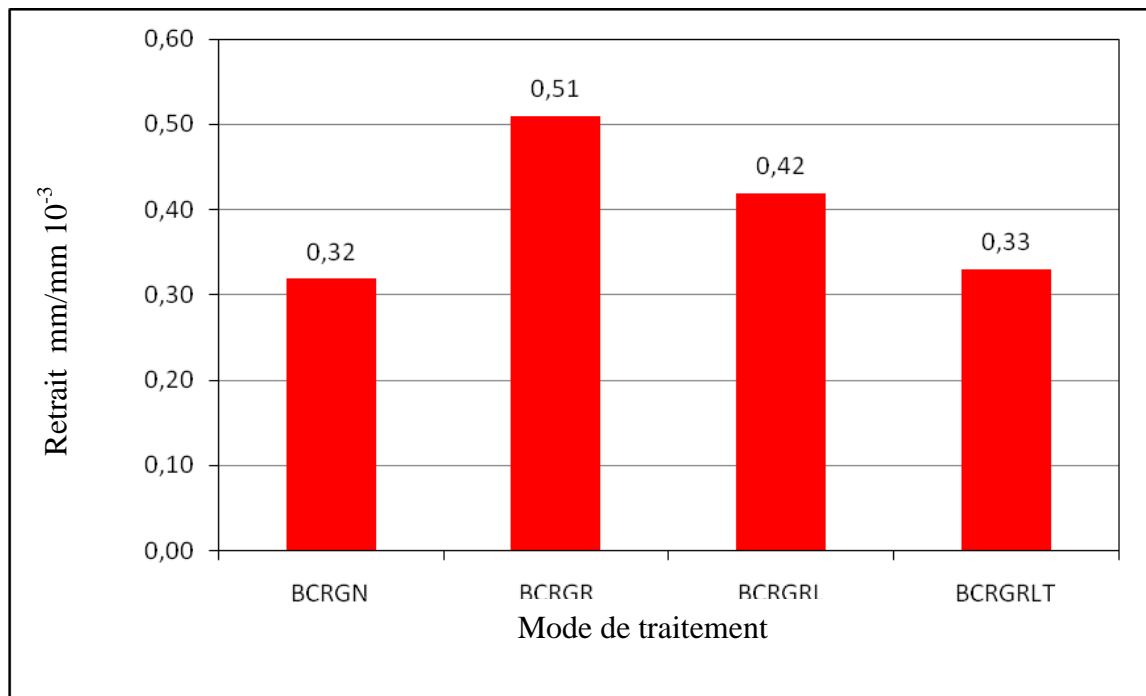


Figure (4.19) : Variation du retrait en fonction du mode de traitement des GR.

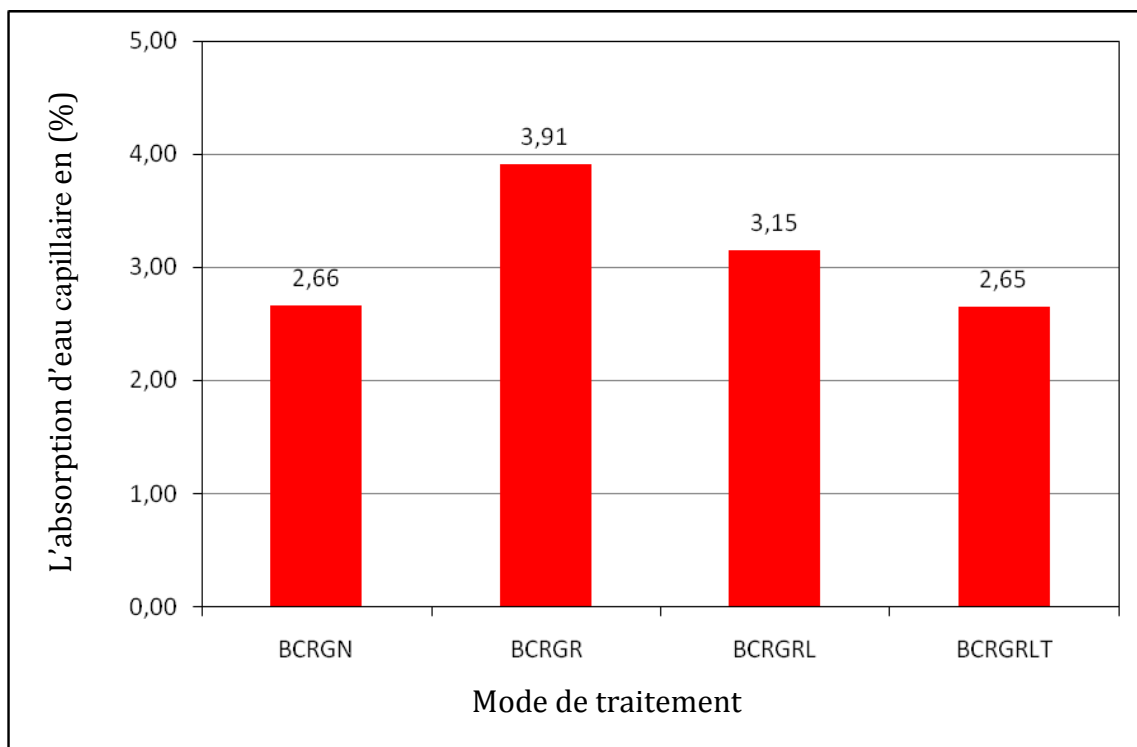


Figure (4.20) : Variation de l'absorption d'eau capillaire en fonction du mode de traitement des GR.

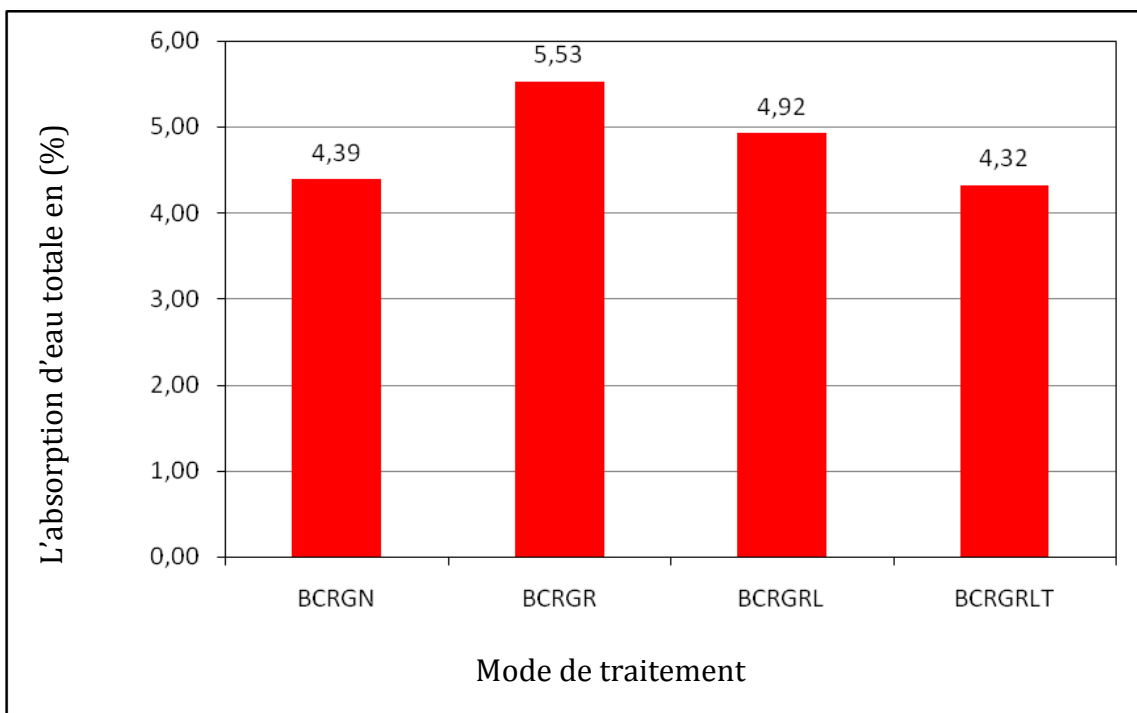


Figure (4.21) : Variation de l'absorption d'eau totale en fonction du mode de traitement des GR.

4-4-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudiés l'effet du remplacement du volume total de granulats naturels d'un mélange de BCR par des granulats recyclés. Les résultats obtenus montrent que les propriétés du BCR ont été affectées suite à l'introduction des granulats recyclés, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence des granulats recyclés, le BCR est devenu moins dense, plus ouvrable, plus fragile, plus absorbant. En contre part, l'incorporation des granulats recyclés affecte négativement les propriétés mécaniques du BCR. La chute de résistance serait due à une faible adhérence entre les granulats recyclés et la pâte de ciment.

Pour remédier au problème de l'insuffisance d'adhérence entre les granulats recyclés et la pâte de ciment nous avons procéder au traitement des granulats recyclés par lavage et aussi par collage de la poudre de laitier en utilisant un adhésif (MEDACURE).

Ce traitement a donné des résultats encourageants. La résistance a été améliorée de 60% et le retrait a été diminué à 35%, en comparaison au cas de l'utilisation du caoutchouc brut.

Conclusions générale et perspectives

Conclusions générale et perspectives

D'une manière générale, cette étude a mis en évidence que la substitution des granulats naturels par des granulats de béton ancien concassés engendrait des différences importantes dans les propriétés du BCR, avec toutes ses conséquences en termes de durabilité. Les résultats de cette étude montrent que :

- L'augmentation du rapport (mortier résiduel/granat naturel d'origine) a un effet négatif sur la résistance des bétons aux GR. Ce rapport augmente avec le taux des granulats recyclés dans le BCR et aussi le diamètre maximal des gros granulats recyclés.
- L'absorption d'eau des BCR recyclés réalisés (BCR25%GR, BCR50%GR, BCR75%GR, et BCR100%GR) est plus élevée que celle d'un BCR témoin à base de 100% de granulats naturels.
- La continuité entre les pores augmente l'absorption d'eau par capillarité du BCR. Le nombre des liens entre les pores (l'ensemble des chemins de migration de l'eau) est proportionnel au taux des GR dans le béton.
- L'étude de l'influence des granulats recyclés sur le retrait a mis en évidence le retrait élevé à jeune âge lorsque la résistance à la traction est faible et le risque de fissuration est important. Ainsi, cette fissuration peut faciliter d'autant la circulation des agents agressifs dans le BCR recyclé. En pratique, dans un climat chaud comme celui de m'sila, ce type d'augmentation du retrait de BCR peut être préjudiciable à son utilisation dans les routes.
- L'utilisation des granulats recyclés lavés dans le BCR a donné des résultats mieux qu'à BCR à base des GR non lavés.
- Le traitement des granulats recyclés par le laitier et avec l'intermédiaire de medacure a donné des résultats très encourageants.

Cette étude ouvre également d'autres perspectives de recherche pour évaluer le BCR aux GR provenant de différentes sources de récupération et exposés aux différentes conditions atmosphériques pendant une durée de temps variable. Ces recherches amèneront, par la suite, à l'étape de validation des bétons aux granulats recyclés dans l'industrie de construction et travaux publics. Les perspectives suivantes

Conclusions générale et perspectives

sont à considérer pour pouvoir assurer une utilisation optimale des GR dans le béton, notamment :

1. Améliorer les propriétés mécaniques et physiques du BCR recyclé en ajoutant des ajouts tels que le laitier, fumé de silice, pouzzolane...
2. Étudier les performances mécaniques de BCR proportionné avec des GR traités en utilisant des adjuvants ou des produits qui améliorent la surface des agrégats
3. Étudier les performances mécaniques de BCR proportionné avec des GR qui ont subi un broyage dans un appareil similaire à Los Angeles avec un nombre de tours variable afin d'évaluer l'influence du mortier résiduel sur la maniabilité et les résistances mécaniques du béton.

Références

- [1] Planetoscope, Statistiques mondiales en temps réel, www.planetoscope.com
- [2] M. Martin-Morales, M.Zamorano, A. Ruiz_MoyanoI. Valverde-Espinosa, Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2) (2011) 742-748
- [3] M.S. De Juan, P.A. Gutiérrez, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2) (2011) 872-877.
- [4] R. Sri Ravindrarajah, C.T. Tam, Recycling concrete as fine aggregate in concrete, *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.* 9 (4) (1987) 235-241.
- [5] L. Evangelista, J.De Brito, Concrete with fine recycled aggregates : a review, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 8(2) (2014) 129-172.
- [6] ACI 116, 1967. Cement and Concrete Terminology, ACI 116. ACI Special Publication, 19.
- [7] Tremblay, S., 1997. Méthodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraîneur D'air Sur La Maniabilité. Université de Laval.
- [8] BaCaRa, 1996. Le Béton Compacté au Rouleau : les Barrages en BCR : Projet National BaCaRa 1988-1995, Paris: Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [9] Choi, Y.-K. & Hansen, K.D., 2005. RCC/Soil-Cement: What's the Difference? *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), pp.371–378.
- [10] ACI Committee 325, 2001. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001). *ACI Materials Journal*, (Reapproved)
- [11] Vahedifard, F., Nili, M. & Meehan, C.L., 2010. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), pp.2528–2535.
- [12] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGQTQ). Association canadienne du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p..
- [13] Harrington, D. et al., 2010. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report, National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University
-

-
- [14] Serne, R.A., 1997. Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada. In International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA.
- [15] ACI committee 207, 1999. Roller-Compacted Mass Concrete. ACI 207.5R-99. ACI Materials Journal, 85(5).
- [16] Hansen, K. & Reinhardt, W., 1991. Roller-Compacted Concrete Dams, McGraw Hill, Inc. New York, USA
- [17] USACE, 2000. Engineering and Design, Roller Compacted Concrete. Engineer Manual No 1110-2-2006,
- [18] Neville, A., 2000. Propriétés des bétons, Edition Eyrolles.
- [19] Marchand, J. et al., 1997. Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete. A Review, Concrete Technology Special Publication, 171.
- [20] Tayabji, S.D. & Okamoto, P.A., 1987. Engineering Properties of Roller-Compacted Concrete. Transportation Research Record, Journal of transportation research Board of the National Academies, Washington, DC., N°. 1136, p. 33-45.
- [21] Ouellet, É., 1998. Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau. Université de Laval.
- [22] Pittman, D.W., 1989. The effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements.,
- [23] Berga, L., Buil, J. Jofre, C., Chongand, S., 2003. Roller Compacted Concrete Dams. In Proceedings of the fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) dams, November 2003.
- [24] Shihata, S.A., 2000. Strength and Density of Laboratory-Prepared RCC Specimens: Effect of Compaction Procedure. Cement, Concrete and Aggregates, 22(1).
- [25] Meddah, A., Beddar, M. & Bali, A., 2014a. Experimental study of compaction quality for roller compacted concrete pavement containing rubber tire wastes. In Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management. CRC Press, pp. 273–278.
- [26] Association Béton Québec (ABQ), “Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec”.
- [27] Canadian Portland Cement Association, “Thickness design for concrete highway and Streets pavements”, Canadian Edition/metric, Engineering Bulletin.
- [28] ASTM D1557, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³(2,700 kN-m/m³)), D1557-07. , pp.1– 13.
-

-
- [29] Pouliot, N., 2001. Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. Bulletin de LPC, Réf. 4370, pp.23–36.
- [30] Hannequart & E. Schamp, « l'utilisation de granulats issus du recyclage », Matriciel 4^{ème} édition, Bruxelles, Décembre 2010.
- [31] Pierre Matar, « caractéristiques du béton à base de granulats recyclés », thèse doctorat, université Libanaise, Septembre 2012. ouvrages en béton », mémoire magister, université Ouargla, Novembre 2006.
- [32] Benamrane Toufik Amine, « caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED) d'un béton recyclé adjuvanté à base des matériaux locaux », mémoire master, Juin 2015.
- [33] (GDCBFNB, 1994) Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de l'habitat et de la Construction, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie-septembre 1994. Cité dans (Raphaël, 2003).
- [34] UNPG, (2001). Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats. Cité dans (Raphaël, 2003).
- [35] Charlot-Valdieu C. (1993). Les déchets de démolition ou de chantier, état des lieux Observatoire Technique de l'Europe du Bâtiment-CSTB. Cité dans (Raphaël, 2003).
- [36] Thai-Hoa V (2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse. Pp.24-25.
- [37] Barkat Abderezzak, « valorisation des déchets de briques ».
- [38] Ait Mohamed Amer Adam, « valorisation des matériaux de démolition dans la construction », thèse doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chalef, février 2017.
- [39] Rao A., « Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates and concrete ». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of technology Kanpur; 2005.
- [40] Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC., « Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete », Cement and Concrete Research, vol. 34, n°1, 2004, p. 31-36.
- [41] Corinaldesi V, Moriconi G, Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials,2009; 23(8):2869-2876.
- [42] Ravindrarajah RS, Tam TC, Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of concrete research,1985; 37(130):29-38.
- [43] Canadian Portland Cement Association, "Thickness design for concrete highway and Streets pavements", Canadian Edition/metric, Engineering Bulletin.
-

- [44] NF EN 12697-32+A1 (2007) Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 32 : compactage en laboratoire de mélanges bitumineux par compacteur vibratoire.
- [45] American Society for Testing and Materials (ASTM) C39/C39M-11a, 2011. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In: Annual Book of ASTM Standards (West Conshohocken, Pennsylvania, USA).
- [46] American Society for Testing and Materials (ASTM) C496-96, 1996. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In: Annual Book of ASTM Standards (Pennsylvania, USA).
- [47] Katz A (2003) Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem Concr Res* 33:703–711.
- [48] Hansen TC (1992) Recycling of demolished concrete and masonry. In: RILEM 06. E & FN SPOON, London.
- [49] Devenny A, Khalaf FM (1999) The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. *Mason Int* 12(3):81–84.
- [50] Kheder GF, Al-Windawi SA (2005) Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregates concrete as related to the strength of their binding mortar. *Mater Struct* 38:701–709
- [51] Wirquin E, Hadjieva-Zaharieva R, Buyle-Bodin F (2000) Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité – application aux bétons de granulats recyclés. *Mater Struct* 33:403–408.
- [52] Levy SM, Helene P (2004) Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cem Concr Res* 34(18):1975–1980.
- [53] Kibriya T, Speare PRS (1996) The use of crushed brick coarse aggregate in concrete. In: *Concrete for environment enhancement and protection. Proceedings of an international conference.* E&FN Spon, London, pp 495–503.
-

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ