

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département : GENIE CIVIL

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : GENIE CIVIL

Spécialité : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Par

- **BOUAOUNE WALID**
- **BOUREGHDAD YAAKOUB**

Intitulé

**Etude du comportement d'un béton compacté au rouleau (BCR) à base des agrégats
recyclés traités par la poudre de verre**

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>	<i>.....</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.MAAFI NABIL</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>USTHB-ALGER</i>
<i>M.BENOUADAH ABDELATIF</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.</i>	<i>....</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Il n'est jamais facile de faire des remerciements, toujours peur d'oublier quelques noms ou des proches alors que nous vous prions de bien vouloir nous excuser si les lignes qui vont suivre vous paraissent incomplètes. Les gens qui nous entourent savent bien à quel point on les remercie.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers DIEU de nous avoir guidé dans la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement Mr. MAAFI NABIL pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa totale disponibilité.

Un grand merci également à notre Co-encadreur, BENOUADAH ABDELATIF. Nous tenons à remercier sincèrement de votre confiance, et de votre encouragement permanent tout au long de ce travail.

Nous exprimons mes vifs remerciements au président du jury, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous voudrions remercier l'ensemble de notre jury de mémoire, qui a bien voulu examiner ce travail,

Nous adressons nos remerciements tous qui a nous aidé à réaliser notre travail.

LISTE DES NOTATIONS

BCR : Béton compacté au rouleau.

e : Indice de vide.

C : Compacité.

A : Absorption.

P : Porosité.

V : Vitesse ultrasonique

R_c : Résistance à la compression.

BGN : Béton compacté aux rouleaux à base des granulats naturels (BCR témoin).

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

BGR50T : Béton compacté aux rouleaux à base de 50% des granulats recyclés et traité.

BGR100T : Béton compacté aux rouleaux à base de 100% des granulats recyclés et traité.

Résumé

Résumé :

A l'heure actuelle le béton est le matériau de construction par excellence le plus employé dans le domaine de génie civil et travaux publics, cependant l'utilisation intensive de ce matériau implique l'épuisement des ressources d'agrégats, aussi que dans un souci de protéger l'environnement, la solution reste la valorisation des déchets comme agrégats et la réutilisation des sous-produits de l'industrie comme produit de traitement pour formuler des bétons recyclés de qualité.

En présence du granulats recyclés, les bétons en générale et spécialement le béton compacté au rouleau (BCR) est devenu plus absorbant à l'eau, plus ségrégué, et moins dense. Le principal inconvénient lié à l'incorporation du granulats recyclés dans le BCR est la chute des propriétés mécaniques.

Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier l'effet de traitement des agrégats recyclés par la poudre de verre à l'aide d'adjuvant MEDACURE dans les mélanges de béton compacté au rouleau (BCR). Les particules de granulats recyclés ont été ajoutées aux mélanges en remplacement partiel du volume total de graviers à différents pourcentages (0, 50, et 100%).

Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique de traitement des agrégats recyclés avec la poudre de verre sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons compactés au rouleau (BCR) par modification de la rugosité de surface du granulats recyclés, surtout pour le béton avec 100% de remplacement ; diminution de l'absorption totale, porosité accessible et augmentation de la résistance à la compression et traction par flexion.

Mots clés : béton compactés au rouleau (BCR), agrégats recyclés, poudre de verre, traitement, MEDACURE, résistance à la compression, résistance à la traction par flexion.

Abstract

Abstract:

At present, the concrete is the building material of choice used in most fields of civil engineering and public works, however the intensive use of this material involves the shortage of aggregate resources, so that in order to protect the environment, the solution remains the recovery of waste as aggregates and the reuse of by-products of industry such as treatment product to formulate recycled concrete of quality.

In the presence of recycled aggregate, concretes in general and especially roller compacted concrete (RCC) have become more water absorbent, more segregated, and less dense. The main disadvantage of incorporating recycled aggregate into RCC is the drop in mechanical properties.

This experimental work aims to study the treatment effect of recycled aggregates by glass powder using MEDACURE admixture in roller-compacted concrete (RCC) mixes. Recycled aggregate particles were added to the mixes as a partial replacement for the total gravel volume at different percentages (0, 50, and 100%).

The results obtained show the beneficial effect of treatment of recycled aggregates with glass powder on the physical and mechanical properties of roller-compacted concrete (RCC), by modifying the surface roughness of the recycled aggregate, especially for concrete with 100 % of substitution ; decrease in total absorption, accessible porosity and increase in compressive strength and bending tensile strength.

Keywords: roller compacted concrete (RCC), recycled aggregate, glass powder, treatment, MEDACURE, compressive strength, bending tensile strength.

ملخص

في الوقت الحاضر ، الخرسانة هي مادة البناء بامتياز الأكثر استخدامًا في مجال الهندسة المدنية والأشغال العمومية ، ومع ذلك فإن الاستخدام المكثف لهذه المواد يعني استنفاد الموارد الإجمالية ، وأيضًا أنه من أجل حماية البيئة ، يظل الحل هو استعادة النفايات كمجموعات وإعادة استخدام المنتجات الثانوية للصناعة كمنتج معالجة لصياغة جودة الخرسانة المعاد تدويرها.

في وجود الركام المعاد تدويره ، الخرسانة بشكل عام و الخرسانة المدكوكة (RCC) بشكل خاص تصبح أكثر امتصاصًا للماء وأكثر عزلًا وأقل كثافة. لذلك العيب الرئيسي لدمج الركام المعاد تدويره في (RCC) هو انخفاض الخواص الميكانيكية.

يهدف هذا العمل التجريبي إلى دراسة تأثير معالجة الركام المعاد تدويره بمسحوق الزجاج باستخدام خليط ميداكير (MEDACURE) في خلطات الخرسانة المضغوطة (RCC). حيث تمت إضافة جسيمات الركام المعاد تدويرها إلى الخلطات كبديل جزئي لإجمالي حجم الحصى بنسب مختلفة (0 ، 50 ، و 100٪).

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها التأثير المفيد لمعالجة الركام المعاد تدويره بمسحوق الزجاج على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المضغوطة (RCC) ، من خلال تعديل خشونة السطح للركام المعاد تدويره ، خاصة بنسبة للخرسانة المستبدلة 100٪ ؛ انخفاض في الامتصاص الكلي ، المسامية وزيادة مقاومة الانضغاط والشد عن طريق الانحناء.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المدكوكة، الحبيبات المدورة، مسحوق الزجاج، معالجة، ميداكير (MEDACURE)، مقاومة الانضغاط، مقاومة الشد عن طريق الانحناء.

Table de matières

Table des matières	
Résumé :	I
Abstract:.....	II
ملخص.....	III
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Bibliographie sur le BCR.	4
I.1. Introduction	4
I.2. Présentation générale du BCR :	4
I.3. Applications du BCR :	4
I.4. Avantages et inconvénients du BCR :.....	6
I.5. Différence entre une chaussée en BCR et une chaussée en bitume :	7
I.6. Les constituants du BCR :.....	9
I.6.1. Les liants :	9
I.6.2. Les granulats :	9
I.6.3. Les granulats fins (Sable) :.....	9
I.6.4. Les éléments fins :.....	10
I.6.5. Les additions :	11
I.7. FORMULATION DE BCR :	11
I.7.1. Méthodes empiriques :	12
I.7.1.1. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité :.....	12
I.7.1.2.Méthode de formulation selon des principes de géotechnique :	13
I.7.2. Méthode semi-empirique :	14
I.7.3. Méthode théorique :	15
I.8. Les procédés de réalisations du BCR :.....	16
I.9. Propriétés du BCR :.....	18

Table de matières

I.9.1. À l'état frais :	18
I.9.1.1. La maniabilité :	18
I.9.1.2. La masse volumique :	19
I.9.2. À l'état durci :	19
CHAPITRE II : Déchets et agrégats recyclés.....	22
II.1. Introduction :	22
Partie A : Les déchets (sous-produit)	22
II.2. Définition:	22
II.3. Déchet de verre :	22
II.4. La poudre de verre dans les bétons :	22
II.5. Propriétés à l'état frais :	23
II.6. Propriétés à l'état durci :	23
II.6.1. Propriétés mécaniques :	23
II.7. Durabilité :	24
II.7.1. La réaction alcali-silice :	24
II.7.2. Pénétrabilité des ions chlorures:	25
II.7.3. Retrait de séchage :	25
Partie B : Agrégats recyclés :	25
II.8. Introduction :	25
II.9. Composition des granulats recyclés de béton :	26
II.10. Propriétés physiques des granulats recyclés :	26
II.11. Les propriétés chimiques des granulats recyclés :	27
II.12. Propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci :.....	27
II.12.1. Etat frais :	27
II.12.1.1. La teneur en air :	27

Table de matières

II.12.1.2. Masse volumique:	27
II.12.2. Etat durci :	27
II.12.2.1. Absorption:	27
II.12.2.2. Porosité:	28
II.12.2.3. Perméabilité :	28
II.12.2.4. Résistance à la compression :	28
II.12.2.5. Résistance à la traction par flexion et par fendage :	29
II.12.2.6. Module d'élasticité :	29
II.12.2.7. Fluage et retrait :	29
II.12.3. Durabilité du béton à base de granulat recyclé :	30
II.12.3.1. Carbonatation :	30
CHAPITRE III : Matériaux, matériels et essais.	31
III.1. Introduction :	31
III.2. Matériaux utilisés:	31
III.3. Caractéristiques des matériaux:	31
III.3.1. Caractéristiques du gravier :	31
III.3.1.1. gravier concassé :	31
III.3.1.2. Gravier recyclé :	32
III.3.2. Caractéristiques du sable :	34
III.3.3. Liant :	35
III.3.4. Poudre de verre :	36
III.3.5. L'eau de gâchage :	37
III.3.6. Adjuvant :	37
III.3.7. Préparation des agrégats recyclés :	38
III.4. Formulation du BCR :	40
III.4.1. Fuseau granulométrique :	40

Table de matières

III.4.2. Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment :	41
III.4.3. Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR :	42
III.5. Techniques expérimentales :	43
III.5.1. Compactage :	43
III.5.1. La résistance à la compression :	43
III.5.2. La résistance à la traction par flexion :	43
III.5.3. Auscultation dynamique (Ultrason) :	44
III.5.4. Porosité accessible à l'eau :	44
III.5.5. Absorption d'eau :	44
CHAPITRE IV : Résultats et discussion.....	46
IV.1. Introduction :	46
IV.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations:	46
IV.3. La nomination des bétons :	47
IV.4. Résultats :	47
IV.4.1. La résistance à la compression :	47
IV.4.2. La résistance à la traction par flexion :	48
IV.4.3. Vitesse de propagation d'ultrason:	49
IV.4.4. Absorption totale :	50
IV.4.5. Porosité accessible à l'eau :	52
Conclusion générale :	54
Recommandations et perspectives :	54
Références bibliographiques:	56

Liste des figures

Figure I. 1: Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (Gauthier. P et al., 2000).	5
Figure I. 2: Barrage de Koudiat-Acerdoune dans la wilaya de Bouira en Algérie.:	6
Figure I. 3: Déformations d'un revêtement en Béton Bitumineux (Gauthier. P et al, 2004).	7
Figure I. 4: Orniérage des revêtements en Béton Bitumineux (Gauthier. P et al, 2004).	7
Figure I. 5: Déformations des revêtements rigides et souple - Avenue Mohamed V -Tunisie. ..	8
Figure I. 6: Etat d'une chaussée en BCR après 11 ans de service -USA (Gauthier. P et al, 2000).	8
Figure I. 7: Paramètres optimums d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).	12
Figure I. 8: Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).	14
Figure I. 9: Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).	14
Figure I. 10: Dosage, malaxage et transport du BCR (Gagné. 2000).	16
Figure I. 11: Mode de mise en œuvre et de compactages du BCR (Gagné. 2000).	17
Figure I. 12: Mise en place du BCR par finisseur à haut pour de compactage (Association Canadienne du ciment).	17
Figure I. 13: Transport, mise en place et mûrissement du BCR (American Concrete Pavement Association).	17
Figure I. 14: Application d'un produit de cure après compactage du BCR - aire Industriel - Montréal (Association Canadienne du ciment).	18
Figure I. 15: Résistance à la compression par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).	20
Figure I. 16: Résistance à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).	21
Figure II. 1: Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (Shayan et Xu, 2004).	25
Figure II. 2: Retrait de séchage des bétons avec E/L = 0,49 (Shayan et Xu, 2006).	25
Figure II. 3: Formes des granulats recyclés.	26
Figure II. 4: Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton (Djerbi. A, et al., 2010).	26
Figure III. 1: Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/15).	32

Liste des figures

Figure III. 2: Procédure de préparation des granulats recyclés.	32
Figure III. 3: Concassage, criblage, tamisage et séparation des agrégats recyclés.....	33
Figure III. 4: Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/16).....	34
Figure III. 5: Courbe granulométrique des sables utilisés.	35
Figure III. 6: Courbe granulométrique de la poudre de verre utilisé.	37
Figure III. 7: Les étapes de traitement des granulats recyclés.....	39
Figure III. 8: Fuseau granulaire.	41
Figure III. 9: La densité sèche en fonction de la teneur en eau.	42
Figure IV. 1: Résistance à la compression des différents mélanges de BCR à 7, 14 et 28 jours.	47
Figure IV. 2: Résistance à la traction par flexion des différents mélanges de BCR.	49
Figure IV. 3: Vitesse de propagation d'ultrason (V) des différents mélanges de BCR.	50
Figure IV. 4: Absorption totale des différents mélanges de BCR.	51
Figure IV. 5: Porosité accessible des différents mélanges de BCR.....	52

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).	20
Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers concassés.....	31
Tableau III. 2: Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers recyclés.	33
Tableau III. 3 : Caractéristiques physiques des deux sables utilisé.....	34
Tableau III. 4: Les caractéristiques chimique, physique et minéralogique du ciment.	36
Tableau III. 5: Caractéristiques physiques de la poudre de verre.....	36
Tableau III. 6: Analyse chimique de l'eau utilisée.....	37
Tableau III. 7 :Tamisât de différentes fractions d'agrégats.	40
Tableau III. 8:Pourcentage des granulats.	41
Tableau III. 9 : Essai de Proctor pour 14% de ciment.....	42
Tableau III. 10: Les quantités des matériaux pour un mètre cube.....	43

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation dans pratiquement tous les domaines de génie civil et travaux public (Les routes). Actuellement, il est sans doute le plus utilisé pour ses avantages économiques et techniques.

Dans les dernières années, l'Algérie a entamé un grand programme de réhabilitation du réseau routier et en même temps a lancé de grands projets autoroutiers (projets de siècle); autoroutes Est-Ouest, autoroutes des hauts plateaux, etc. Ses projets, nécessitent un volume important de ressources naturelles en matière de produits hydrocarbures et d'agrégats naturels. En effet, La recherche d'autres techniques constitue une préoccupation majeure pour les chercheurs afin de préserver les ressources naturelles et en même temps de répondre aux besoins croissants en agrégats.

Parmi les types de béton connus, on citera le béton compacté au rouleau (BCR). La composition des BCR est la même que celle des bétons conventionnels (ciment, granulats, eau et éventuellement des adjuvants). Il se distingue par sa faible quantité d'eau, de liant et d'un affaissement proche de 0 cm.

Cette utilisation de ce matériau (béton), implique une grande consommation de ces constituants et notamment les agrégats qui représentent environ 70% du volume total du mélange et participent d'une grande partie à la résistance mécanique. L'utilisation intense de ces matériaux de construction provoque l'épuisement des sources naturelles de ces substances en particulier les gisements de granulats.

Au cours des dernières années, le secteur de construction a connu une grande dynamique de démolition et de construction suite à des causes accidentelles par exemple les séismes ou bien en raison d'exploitation et vieillissement des structures. Cette opération a comme conséquence directe, des milliers des tonnes des déchets de démolition de construction, (le verre, le bois, l'acier, la brique et le béton... etc.).

La gestion de ces déchets va provoquer des problèmes au niveau environnemental, qui se manifeste dans la diminution des espaces d'urbanisme ou d'agriculture occupés par les déchets de démolition. Les décharges et dépôts aléatoires des déchets de démolition de construction conduit à un impact négatif sur l'environnement d'un côté, en plus d'une opération économique couteuse.

Introduction générale

A présent, les chercheurs en génie civil sont appelés à proposer de nouvelles solutions afin de trouver des substitutions des sources naturelles tel que, les agrégats recyclés comme alternative à des granulats naturels.

La substitution partielle ou total de granulats pour la formulation d'un béton répondant aux exigences de qualité et de durabilité ; constitue actuellement un sujet de grand intérêt des spécialistes de construction.

Cette étude utilise les agrégats recyclés provenant d'ancien béton de chantier pour la confection d'un béton de performance (résistance et durabilité) semblable à un béton conventionnel. Le comportement du béton recyclé incorporant un pourcentage allant de 0 jusqu'à 100 % de granulats récupérés fera l'objet de ce projet de recherche.

La substitution totale à 100% peut générer une chute de résistance mécanique, cependant un remplacement partiel des agrégats naturels par seuls recyclés avec un pourcentage bien défini pourrait être une solution pour la confection d'un béton à usage courant avec une performance adéquate. Cette étude vise à une formulation de BCR à base des granulats recyclé en procédant par des taux de substitution en granulats recyclés allant de 0% jusqu'à 100%, (0, 50 et 100 %).

L'emploi des adjuvants tels MEDACURE qu'utilise pour le traitement des granulats recyclé peut améliorer quelques propriétés de béton compacté au rouleau. Ceci, pour constater l'effet traitement sur les propriétés physiques et mécaniques de BCR.

L'objectif de notre recherche est d'étudier l'effet du taux de substitution d'agrégats recyclé traité sur les propriétés physiques et mécaniques (compression, traction par flexion, porosité et absorption) d'un BCR pour une utilisation future dans le domaine de génie civil et les travaux publics.

Cette étude comprend quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par une étude bibliographique sur les BCR. 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.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur les déchets de démolition utilisée (poudre de verre et granulats recyclé) et son influence sur les bétons à l'état frais, durcissant et la durabilité.

Le troisième chapitre est consacré aux études expérimentales détaillées de tous les matériaux utilisés et de la caractérisation classique des mélanges retenus et les différents essais effectués

Le quatrième chapitre est consacré aux analyses des résultats, s'intéresse à l'étude du comportement physico-mécanique des BCR en présence des granulats recyclés.

Enfin, une conclusion générale clôtura notre travail avec quelques recommandations.

CHAPITRE I : Bibliographie sur le BCR.

I.1. Introduction

Ce chapitre présente une revue de la documentation sur la technologie du béton compacté au rouleau (BCR). Il parcourt en premier lieu la notion du BCR. Par la suite, les techniques d'utilisation du BCR en corps de barrage et en routes sont couvertes. Les performances et les caractéristiques du BCR sont aussi traitées.

Une description est consacrée aux différents composants du BCR ainsi que ses différents procédés et techniques de mise en place. Enfin, les travaux de recherches sur le BCR, tel que les méthodes et les formulations, sont présentés.

I.2. Présentation générale du BCR :

Le béton compacté au rouleau (BCR) est une technologie récente pour la réalisation des routes et des barrages poids. Il a connu un grand succès grâce à ses avantages ; la rapidité d'exécution et le faible coût. Le BCR est un béton qui est constitué de mêmes ingrédients qu'un béton ordinaire, il s'agit de ciment d'agrégats d'eau et éventuellement des adjuvants pour l'amélioration de certaines caractéristiques physico-mécaniques du mélange, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Le BCR est mis en place et compacté à l'aide des engins de travaux publics comme les finisseurs et les engins à haut pouvoir de compactage comme les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les plaques vibrantes, les bulldozers... etc.

I.3. Applications du BCR :

Le BCR est utilisé généralement soit pour les pavages (les routes), ou bien pour la réalisation des barrages(les ouvrages massifs).

Malgré que l'utilisation du BCR revienne aux années 1930 et que plusieurs projets ont été réalisés en utilisant ce matériau en pavage aux USA, en Espagne, en Australie et dans d'autres pays, le BCR reste jusqu'à maintenant, en Algérie et en Afrique, une nouvelle technique. En effet, cette technologie ne s'est développée que pour la construction des barrages tels que les Koudiat Acerdoune et Beni Haroun. Par contre, l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée dans ces pays.

Les techniques de mise en œuvre utilisent, pour l'épandage, le même matériel utilisé pour les revêtements en béton bitumineux (BB) à haute densité. Le mélange employé est raide et ferme

CHAPITRE I

et il faut le compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques. De plus, une fois durci, La résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPa. L'utilisation du BCR pour les pavages varie d'une épaisseur de 10 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts. Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulat est limitée à 20 mm (Gauthier. P et al., 2000).



Figure I. 1: Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (Gauthier. P et al., 2000).

Pour faire des économies et résoudre le problème d'utilisation des grandes quantités de terre dans les digues de retenue, le BCR en tant que matériau est utilisé dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces. L'avantage de cette technique est que ce matériau permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval. L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du barrage. Ce matériau, caractérisé par un affaissement nul, est produit dans des centrales de malaxage implantées à proximité du site puis il est transporté à pied d'œuvre par des convoyeurs ou des camions. Le liant utilisé est généralement le ciment alors que le dosage est nettement plus faible comparé à celui d'un BC. La dimension maximale du granulat varie de 60 à 150 mm.

Pour ces ouvrages, les résistances à la compression varient de 7 à 20 MPa. Pratiquement et après être déversé, le mélange de BCR est étalé au moyen de niveleuses ou de bulldozers mécaniques puis il est compacté au moyen de rouleaux compacteurs vibrants (Gauthier. P et al, 2004). Pour la réalisation d'ouvrages de masse comme les barrages, il est recommandé d'utiliser des ajouts minéraux tels que les cendres volantes puisque la quantité de ciment

CHAPITRE I

utilisée est faible. Cette substitution de ciment permet de réduire le dégagement de chaleur d'hydratation lors du coulage et de durcissement (Gauthier. P et al, 2004).



Figure I. 2: Barrage de Koudiat-Acerdoune dans la wilaya de Bouira en Algérie.:

I.4. Avantages et inconvénients du BCR :

Le BCR présente des bonnes performances et présente des avantages potentiels telles que ;

- Résistance aux lourdes charges, propriétés mécaniques (compression, flexion et cisaillement) élevées ;
- Faible teneur en eau qui réduit le phénomène de retrait ;
- Faible cout de réalisation ;
- Durabilité de la chaussée pour plusieurs années ;
- Excellente performance à l'analyse du cycle de vie ;
- Haute densité et faible absorption ;
- Bonne résistance à l'érosion et à l'abrasion ;
- L'imperméabilité aux liquides (eau, huile, essence, etc.);
- Facilité de réalisation et mise en place ;
- Résistance au gel/dégel à cause de sa compacité ;
- Faible déformabilité ;
- Surface claire et rigide ;
- Moins de travaux d'entretien ;
- Absence de ferrailage ;
- Entretien simple

Le BCR présente plusieurs avantages mais aussi comme tous les matériaux il a des inconvénients. L'inconvénient majeur de cette technique est ; la qualité et l'uni de surface des

CHAPITRE I

revêtements, malgré l'effort puissant de compactage appliqué ce qui conduit à une texture plus ou moins ouverte, par rapport au cas des routes en béton bitumineux (BB).

I.5. Différence entre une chaussée en BCR et une chaussée en bitume :

Les couches de roulement des chaussées souples en Béton Bitumineux (BB), présentent l'inconvénient de leur souplesse sous l'effet d'un fort trafic. Le trafic lent et les véhicules de fort tonnage provoquent la formation des ornières ainsi que des remontées en forme de bourrelets (Figure I.3) sous l'action des forces centrifuges surtout aux droits des virages, aux intersections et dans les tournants. D'autre part la poussée exercée sur le revêtement par les véhicules, tels que les camions et les autobus, en position d'arrêt ou en phase de démarrage, engendrent des déformations plissant donnant la forme des tôles ondulées nuisant conséquemment au confort dynamique des usagers (Figure I.4).

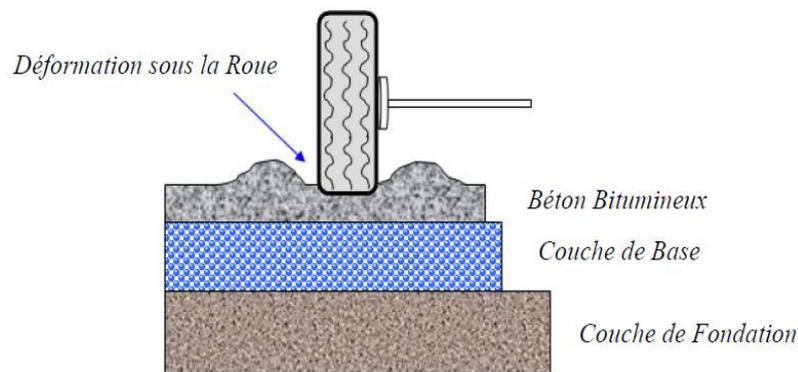


Figure I. 3: Déformations d'un revêtement en Béton Bitumineux (Gauthier.P et al, 2004).



Figure I. 4: Orniéragé des revêtements en Béton Bitumineux (Gauthier. P et al, 2004).

CHAPITRE I

Une chaussée comportant un revêtement en béton compacté au rouleau (BCR) est considérée comme une chaussée rigide. La rigidité du BCR, utilisée comme solution, contribue à la prévention des déformations en évitant la formation des ornières, des ondulations et des bourrelets. En effet, l'utilisation de ce matériau en revêtement ou aussi en couche de base est une alternative pour la résolution des problèmes de fortes déformations et dégradations enregistrées sur les rues, les intersections et les routes fortement sollicitées ainsi que pour les stations portuaires, les aéroports, les parcs et les aires de stationnement (Figures I.5 et I.6).

De point de vue énergie, les études montrent que la chaussée souple fléchit davantage par rapport à la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce phénomène mène à conclure, d'après ces études, qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple et que la rigidité de la chaussée en BCR réduit la déflexion et peut diminuer ainsi la consommation de carburant jusqu'à 20 % (Gauthier. P et al, 2004).



Figure I. 5: Déformations des revêtements rigides et souple - Avenue Mohamed V - Tunisie.



Figure I. 6: Etat d'une chaussée en BCR après 11 ans de service - USA (Gauthier. P et al, 2000).

I.6. Les constituants du BCR :

I.6.1. Les liants :

Pour la construction de revêtements de chaussées en BCR, généralement les liants hydraulique utilisent dans la formulation de BCR sont des liants hydraulique à faible chaleur d'hydratation, un temps de prise assez long, le pourcentage C3A doit être limité pour garantir une bonne durabilité et éviter la dégradation et une bonne résistance aux sulfates car l'eau peut contenir des agents agressifs. Les mélanges sont généralement formulés avec des dosages en ciment variant entre 250 et 350 kg/m³, représentant une proportion totale en liant comprise entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs (**Gauthier. P et al, 2000**). Les forts dosages en liants ne sont pas très rentables car une teneur en ciment trop élevée peut gonfler les coûts de production sans augmenter significativement les résistances mécaniques ou prolonger la durée de vie du revêtement.

I.6.2. Les granulats :

Les granulats représentent un constituant essentiel et un élément permanent des mélanges de BCR qui conditionne à la fois ces caractéristiques et son coût. Ils constituent aussi le squelette de ce matériau et représentent les 4/5 du poids du mélange (**Baron et al., 1997**). Ils sont peu déformables et ils améliorent les résistances du mélange en s'opposant à la propagation des microfissures provoquées par le retrait (**Projet National BaCaRa 1996**).

Ces granulats interviennent généralement pour les bétons conventionnels avec un pourcentage de 70% du volume total du mélange solide. Par contre, pour le BCR les granulats représentent une proportion comprise entre 75 et 85% du volume total du mélange solide. Leurs influences sur le BCR à court et à long terme sont remarquables (**Gauthier. P et al, 2000**).

1.6.3. Les granulats fins (Sable) :

La fraction granulaire (0-5) joue un rôle important dans le remplissage de l'espace inter-granulaire.

La présence de cette fraction peut atteindre 40% dont elle améliore le compactage et par conséquent la compacité du mélange. Des granulats de cette classe sont issus soit directement des gîtes (sable de dune) et des carrières, ou obtenus par concassage et broyage d'une roche

CHAPITRE I

(sable concassé). La compactabilité et la portance du matériau frais dépendent de la quantité de pâte et de mortier lorsqu'elle remplit juste les vides entre les grains de graviers (granulométrie "creuse") et particulièrement si les granulats sont concassés.

Par analogie au béton conventionnel, un excédent de pâte et de mortier peut conduire à certains avantages tels que la limitation de la ségrégation et l'amélioration de l'étanchéité du matériau. Par contre, il est très difficile d'aboutir à une compacité maximale sur toute l'épaisseur de la couche mais on obtient un matelassage (**Projet National BaCaRa 1996 ; Belaïd M., 2004**).

I.6.4. Les éléments fins :

Pour les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 0.08 mm, leur pourcentage varie entre 7 et 15 %. Cette fraction granulaire améliore considérablement le compactage.

Avec une teneur en éléments fins totale, y compris liant, variant entre 8 et 15 %, on obtient un bon comportement du BCR au compactage (**Projet National BaCaRa 1996**). Cette proportion peut contenir des fines artificielles ou naturelles provenant des granulats. Certains éléments fins peuvent avoir des propriétés pouzzolaniques permettant des économies par la réduction de la teneur en ciment. Ces fines peuvent agir négativement pour réduire sensiblement les résistances en traction directe et au cisaillement lorsqu'elles sont dosées en excès, du fait des décollements pâte/granulats et de l'enrobage des éléments fins par le liant (**Gauthier. P et al, 2000**).

Gauthier et Marchand (2000) ont précisé que les résultats d'une étude de laboratoire, réalisée sur le comportement mécanique et la durabilité au gel de mélanges de BCR, ont montré que l'ajout d'environ 7% de filler calcaire (particules minérales inférieures à 80 µm) par rapport à la masse totale des matériaux secs dans des mélanges de BCR peut généralement contribuer à améliorer les propriétés du béton.

L'introduction d'éléments fins, surtout s'ils sont pouzzolaniques, permet, dans la plupart des cas, une diminution de la teneur en liant, et par conséquent, provoque une réduction de la chaleur d'hydratation, un retard de la prise, une diminution du coût du liant et une augmentation du volume de pâte dans l'espace inter-granulaire (**Projet National BaCaRa 1996**).

I.6.5. Les additions :

Les additions sont définies par les chercheurs comme des matériaux minéraux finement broyés et qui peuvent être ajoutés au BCR pour lui confier des propriétés particulières ou pour améliorer certaines de ses caractéristiques (**Baron et al., 1997**). Pour obtenir une bonne cohésion et maniabilité du BCR à l'état frais et une bonne compacité et durabilité à l'état durci, une quantité d'éléments fins est nécessaire. On a recours à des additions dans le cas d'une insuffisance de fines dans la composition des éléments. Alors que l'excès d'éléments fins n'est pas favorable car ceux-ci demandent une importante quantité d'eau ce qui peut entraîner des pertes de résistance mécanique (**Jeuffroy G. et al, 1989**). D'après (**Gagné 2004**), les études ont montré aussi que la majorité des revêtements en BCR construits ces dernières années ont été fabriqués avec des ciments hydrauliques composés avec des additions soit de fumées de silice, de laitiers ou de cendres volantes.

I.7. FORMULATION DE BCR :

La formulation de béton est une science qui définit les différents constituants d'un béton en se basant sur des propriétés souhaitées. La méthode de formulation d'un béton diffère quand ces propriétés se changent. Dans notre étude, on va confectionner un BCR à partir des matériaux locaux avec une formulation qui diffère de celle de béton ordinaire. Des méthodes de formulation de mélanges de BCR sont présentées dans le document American Concrete Institute (ACI) Committee **325.10R-95 (ACI-325.10R-95 1995)**. Elles ont été développées en utilisant différentes approches et ont été employées avec succès. Elles sont, pour la plupart, basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques qui requièrent la réalisation d'un grand nombre de gâchées d'essais afin d'obtenir le mélange aux proportions optimales. Par ailleurs, ces dernières années, une méthode de formulation a été développée au Laboratoire Central des Ponts et chaussées en France (LCPC) pour être par la suite adaptée par le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval à la formulation de mélanges de BCR. Cette méthode repose sur une meilleure compréhension des paramètres affectant les propriétés à l'état frais et durci du BCR. Dans la grande majorité des cas, une seule gâchée d'essai est requise pour déterminer les caractéristiques du mélange optimum.

CHAPITRE I

I.7.1. Méthodes empiriques :

Au début de la conception du BCR, des méthodes de formulation empiriques ont été mises en place. Ces méthodes reposent sur la réalisation de plusieurs gâchées en laboratoires afin d'obtenir le mélange adéquat pour un tel projet. Ces techniques prennent beaucoup de temps et d'énergie, car dans certains cas plus de 25 mélanges sont nécessaires pour atteindre les caractéristiques voulues du BCR. En plus, des gâchés de réajustement sur chantier sont nécessaires pour obtenir un béton de bonne qualité (**J. Marchand 1997**).

Les deux méthodes les plus utilisées et les plus efficaces ont été décrites par le comité 325.10R-95 de l'American Concrete Institute (ACI) (**ACI-325.10R-95 1995**) :

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

I.7.1.1. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité :

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

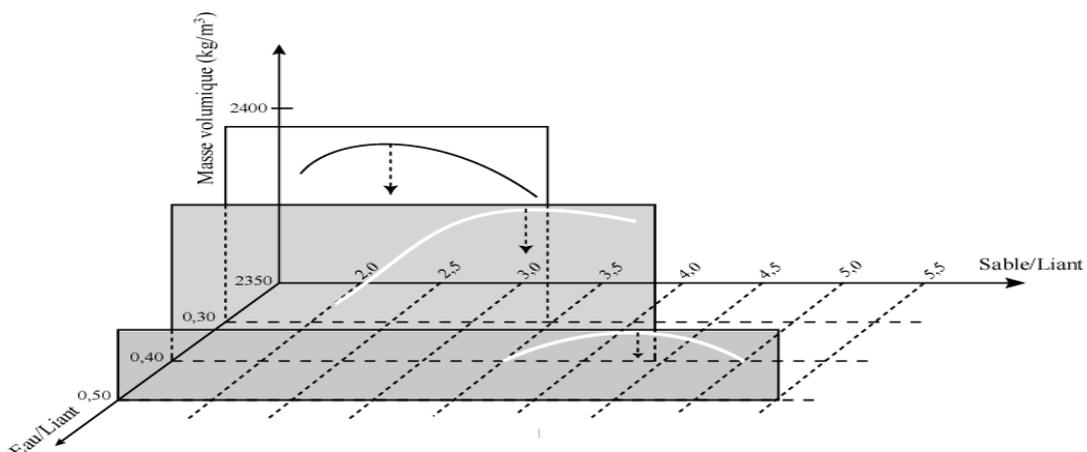


Figure I. 7: Paramètres optimaux d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).

La première étape comporte la réalisation de plusieurs gâchées d'essais de mélanges de mortier avec différents rapports eau/ciment et différents rapports sable/ciment pour déterminer le volume de pâte minimum. La masse volumique est mesurée pour chaque mélange. La figure I.7 montre le rapport eau/ciment donné correspondant au rapport sable/ciment qui mène à une masse volumique optimale. La seconde étape consiste à choisir un rapport eau/liant

CHAPITRE I

adéquat aux exigences des propriétés mécaniques voulues. Finalement, une phase d'ajustement des proportions de granulats fins et grossiers est effectuée pour obtenir la maniabilité désirée une fois les rapports eau/liant et sable/liant fixé (**J. Marchand 1997**).

I.7.1.2.Méthode de formulation selon des principes de géotechnique :

Le Comité **325.10R-95** de l'American Concrete Institute (ACI) a aussi proposé cette méthode de formulation qui se base sur les principes de la géotechnique (compactage des sols). Cette méthode suit la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau du BCR. L'utilisation de cette méthode est plus adéquate dans les cas des granulats de petites dimensions et d'une grande quantité de liant (**J. Marchand 1997**).

La première étape consiste à déterminer la proportion de granulats fin par rapport au granulats grossier à l'aide d'un fuseau granulaire présenté dans la figure I.8. En deuxième lieu, plusieurs gâchés de béton avec différents teneurs en liant sont réalisés. La teneur en liant pour ces gâchés varie entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. L'étape suivante consiste à réaliser, pour chaque teneur en liant, des mélanges avec différentes teneurs en eau. Par la suite et à l'aide de la méthode citée par la norme **ASTM C1557 – Méthode D. (ASTM-D1557-07 2007)**, on peut déterminer la teneur en eau optimale.

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

D'après la figure I.9, on peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau qui permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale. La masse volumique sèche varie considérablement dans l'intervalle de la teneur en eau optimale. Par contre, la masse volumique humide reste insensible dans cette partie de la courbe. La phase finale de cette méthode consiste à déterminer la quantité de liant nécessaire pour avoir un béton avec des performances données. Cela s'effectue en réalisant différents mélanges avec différentes teneurs en liant et avec une teneur en eau fixée (teneur en eau optimale). Le mélange disposant de la teneur en liant la plus faible et les performances mécaniques requises est choisi (**J. Marchand 1997**).

CHAPITRE I

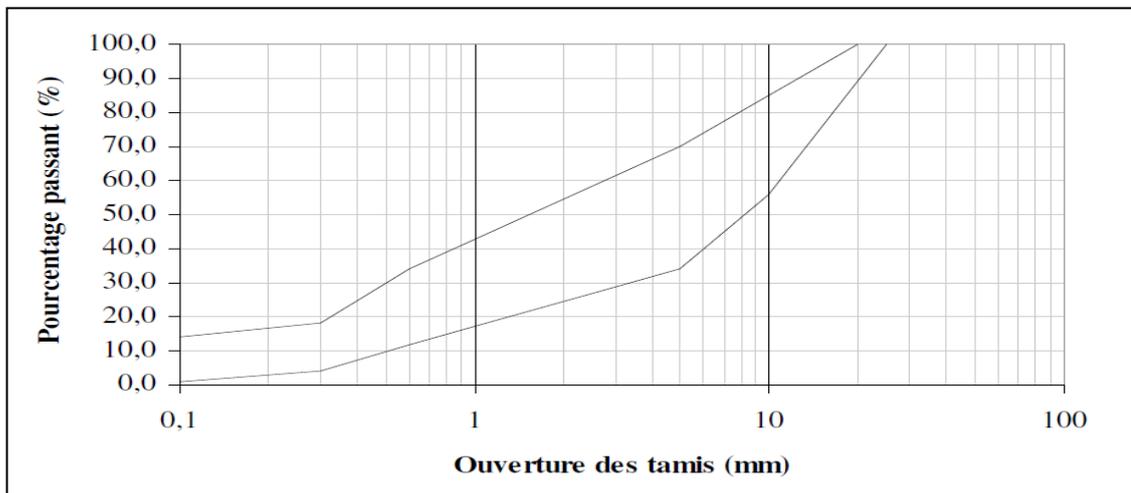


Figure I. 8: Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).

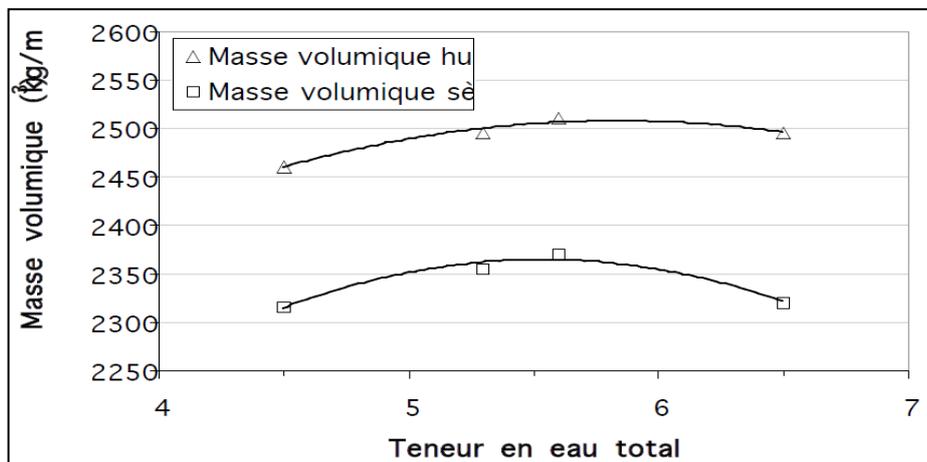


Figure I. 9: Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).

I.7.2. Méthode semi-empirique :

Cette méthode de formulation exige une approche expérimentale d'une part, et quelques formules empiriques d'autre part. La formulation par volume de pâte optimal est l'une des méthodes semi-empiriques utilisées pour la confection du BCR. Le principe de cette méthode consiste à calculer le volume de pâte par rapport à un volume de vides. Comme il a été mentionné en haut, cette méthode nécessite des mélanges d'essais en laboratoires (J. Marchand 1997).

La principale hypothèse sur laquelle se base cette méthode est que le BCR nécessiterait d'avoir un volume de pâte pour combler les espaces inter-granulaires restant après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale.

CHAPITRE I

Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des performances mécaniques.

Suivant cette hypothèse, une faible dépense de pâte causera la présence de vides intergranulaires qui vont par la suite réduire les performances mécaniques et augmenter sensiblement la perméabilité. D'autre part, une dépense excessive de pâte amplifiera la chaleur d'hydratation et le coût, sans accroître significativement les propriétés physiques ou la diminution de la perméabilité (GAGNÉ 2000).

La formulation du BCR par cette méthode exige de suivre trois étapes. Premièrement, les proportions des granulats sont déterminées d'une façon à obtenir un mélange granulaire le plus compacte possible. Après le compactage, le volume de vides des granulats est calculé en mètre cube. Deuxièmement, le dosage de la pâte doit être ajusté de manière à avoir une maniabilité donnée. Finalement, le rapport entre l'eau et le liant doit être fixé afin d'obtenir une pâte qui puisse satisfaire les exigences mécaniques. Cette méthode de formulation permet d'obtenir des mélanges de BCR sans une énorme débauche d'énergie par rapport aux méthodes empiriques. Cependant, l'utilisation de cette méthode est impossible dans le cas d'utilisation d'un entraîneur d'air. En effet, la présence de cet adjuvant rend très complexe la prédiction des vides dans le béton (GAGNÉ 2000).

I.7.3. Méthode théorique :

La méthode théorique est très différente des précédentes méthodes de formulation. En effet, elle se distingue par l'absence de gâchés d'essais en laboratoires (expérimentale). Le principe de cette méthode est de minimiser la porosité intergranulaire du béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) a développé une méthode théorique appelée le modèle d'empilement compressible pour la confection de différents mélanges tels que le béton ordinaire et le béton à haute performance. Par la suite, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval a développé cette méthode de façon à confectionner le BCR.

CHAPITRE I

Plusieurs travaux ont été effectués à l'aide de cette méthode, les résultats obtenus montrent que cette technique donne amplement satisfaction (**J. Marchand 1997**).

I.8. Les procédés de réalisations du BCR :

Les techniques de mise en œuvre des pavages en BCR, d'après (**Gauthier et al.2000 ; 2004**), sont semblables à celles du BB puisqu'elles sont effectuées à l'aide des mêmes équipements employés pour la construction des revêtements en BB. Ces équipements sont, pour la plupart, conçus et adaptés à la mise en place du BCR.

La mise en œuvre de revêtements en BCR, pour la majorité des cas de chantiers, est effectuée suivant les mêmes procédés utilisés pour la construction de pavage en BB. Les équipements employés sont identiques mais des finisseurs à haut pouvoir de compactage sont parfois nécessaires pour des épaisseurs supérieures à 150 mm (Figures I.10, I.11, I.12 et 1.13). Pour le cas des épaisseurs de pavage supérieures à 250 mm, le BCR est placé par couche de 20 cm afin que l'équipement utilisé puisse compacter adéquatement l'épaisseur totale conçue.

D'une façon générale, pour la construction d'un revêtement en BCR, la mise en œuvre comprend généralement les étapes suivantes: préparation du sol support et de la fondation, composition et malaxage du BCR, transport, mise en place et compactage, réalisation des joints et mûrissement. On doit prendre des précautions spéciales afin de réduire la ségrégation du matériau et la perte d'humidité par évaporation et ceci dès la production du BCR jusqu'au sa mise en place (**Gauthier et al., 2004**)

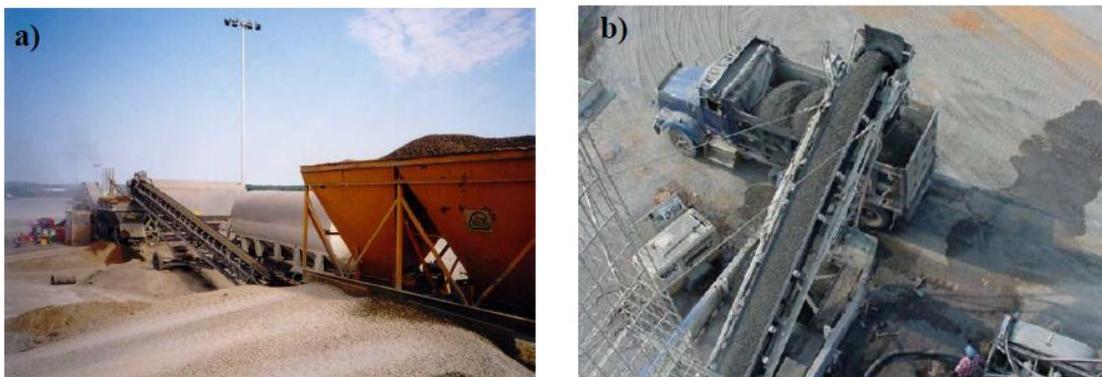


Figure I. 10: Dosage, malaxage et transport du BCR (Gagné. 2000).

CHAPITRE I



Figure I. 11: Mode de mise en œuvre et de compactages du BCR (Gagné. 2000).



Figure I. 12: Mise en place du BCR par finisseur à haut pour de compactage (Association Canadienne du ciment).



Figure I. 13: Transport, mise en place et mûrissement du BCR (American Concrete Pavement Association).

CHAPITRE I

Pour éviter l'évaporation de l'eau de gâchage et réduire les retraits, on a recours à l'épandage d'un produit de cure constituant une membrane de protection superficielle, pulvérisée en une ou deux couches avec un dosage de 0,2 l/m² (Figure I.14). En outre le BCR frais devra être protégé contre les fortes pluies par des toitures roulantes ou des membranes de matière plastique (Smith T et al., 2001).



Figure I. 14: Application d'un produit de cure après compactage du BCR - aire Industriel - Montréal (Association Canadienne du ciment).

I.9. Propriétés du BCR :

I.9.1. À l'état frais :

La maniabilité du béton est un paramètre très important dans la fabrication de ce dernier. En effet, la valeur de la maniabilité peut éclairer sur la méthode de mise en place du béton. Le BCR, comme il a été mentionné plus haut, est un béton sec avec un affaissement quasi nul. Cette valeur paraît plus importante dans le cas d'un BCR, car elle a un effet direct sur la mise en place et le compactage du béton.

I.9.1.1. La maniabilité :

La maniabilité du BCR est mesurée à l'aide de l'essai VEBE (ASTM-C1170/C1170M-08 2008). Le principe de cet essai est de mesurer le temps nécessaire au béton pour se consolider sous l'effet d'une charge et d'une vibration spécifique. Le temps VEBE est calculé du début de la vibration jusqu'à l'apparition d'une couche de mortier sur le bord de la plaque contenant la surcharge. La maniabilité du BCR doit être généralement comprise entre 40 et 90 secondes

CHAPITRE I

(temps VEBE) au moment de la mise en place (**Gauthier. P et al, 2004 ; Benouadah. A, 2019**).

I.9.1.2. La masse volumique :

La seconde caractéristique qu'on doit tenir en compte à l'état frais est la masse volumique. En effet, cette valeur est très significative sur la compacité et les performances mécaniques du béton. Plusieurs recherches ont conclu que la densité a un rapport direct sur la résistance à la compression. La mesure de la masse volumique humide s'effectue suivant trois procédés : Proctor (**ASTM-D1557-07 2007**), vibro-compaction (**ASTM-C1176/C1176M-08 2008**) et marteau vibrant (**ASTM-C-1435-99 1999**).

Selon (**Pittman 1989**), la masse volumique humide est affectée par plusieurs facteurs tels que le type de la paveuse employée, le nombre de passages effectué par le rouleau compacteur, le temps mis jusqu'au premier compactage et l'épaisseur de la couche. La masse volumique humide peut aussi servir pour valider la compacité sur chantier. En effet, la mesurer de cette valeur par le nucléo densimètre sur chantier peut nous permettre de la comparer avec la valeur obtenue en laboratoire.

(**Karimpour 2010**) a étudié l'effet de l'intervalle de temps entre le malaxage et le compactage de deux types de béton, un béton conventionnel et un BCR contenant du laitier à haut fourneau granulé et broyé. Les résultats montrent que plus le laps de temps augmente, plus une chute des performances mécaniques et de perméabilité est remarquée pour les deux bétons. Par contre, en présence du laitier à haut fourneau, l'effet du temps est moins remarqué sur les performances mécaniques et de perméabilité.

I.9.2. À l'état durci :

À l'état durci, les performances mécaniques représentent le facteur le plus important pour estimer un béton. Un rapport servant à comparer un BCR avec un béton conventionnel a été entrepris par le service d'expertise en matériaux canadien (**CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005**), les résultats obtenus ont montré que le BCR est plus performant que le béton conventionnel en termes de résistance mécanique et de perméabilité. Le tableau I.1 représente les différentes caractéristiques étudiées par les auteurs (**CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005**).

CHAPITRE I

Tableau I. 1: Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN-ASSOCIATION-OF-CEMENT 2005).

Essais	BCR	Béton conventionnel
Résistance à la compression (MPa)	66	44.8
Résistance à la flexion (MPa)	8.3	5.5
Absorption (%)	2.4	5.1
Porosité (%)	6.0	11.2
Perméabilité à l'eau (m/s)		
Essai 1	5×10^{-13}	14×10^{-13}
Essai 2	0.1×10^{-13}	9×10^{-13}

(Norbert Delatte 2003) à étudier l'effet du compactage par giration sur les performances mécaniques du BCR. Différents compactages ont été effectués sur plusieurs éprouvettes de BCR avec la même composition, les résistances à la compression et à la flexion ont été évaluées en fonction du nombre de girations. Les résultats montrent clairement que plus le compactage est dense, plus la résistance à la compression et à la flexion augmente. Les figures I.15 et I.16 montrent respectivement la relation entre la résistance à la compression et à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).

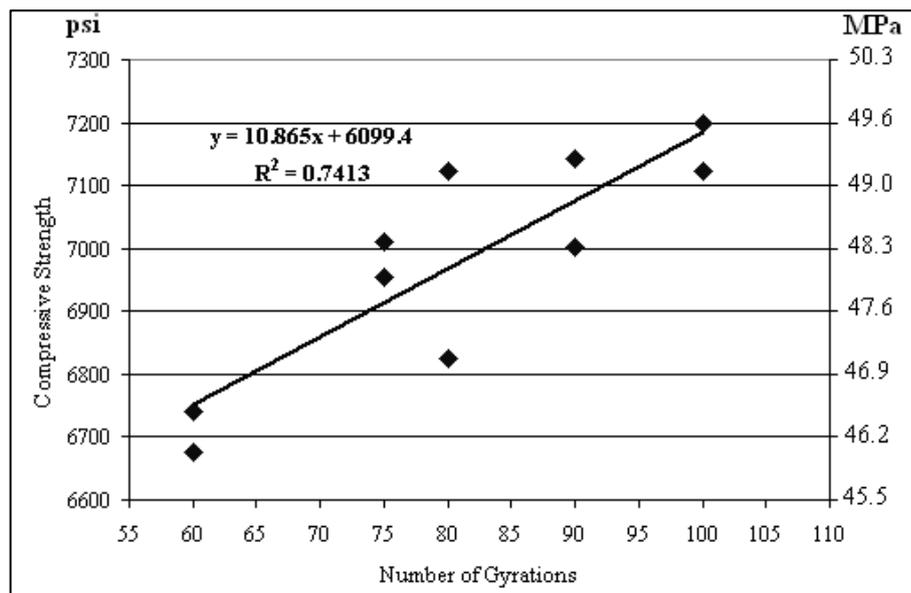


Figure I. 15: Résistance à la compression par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).

CHAPITRE I

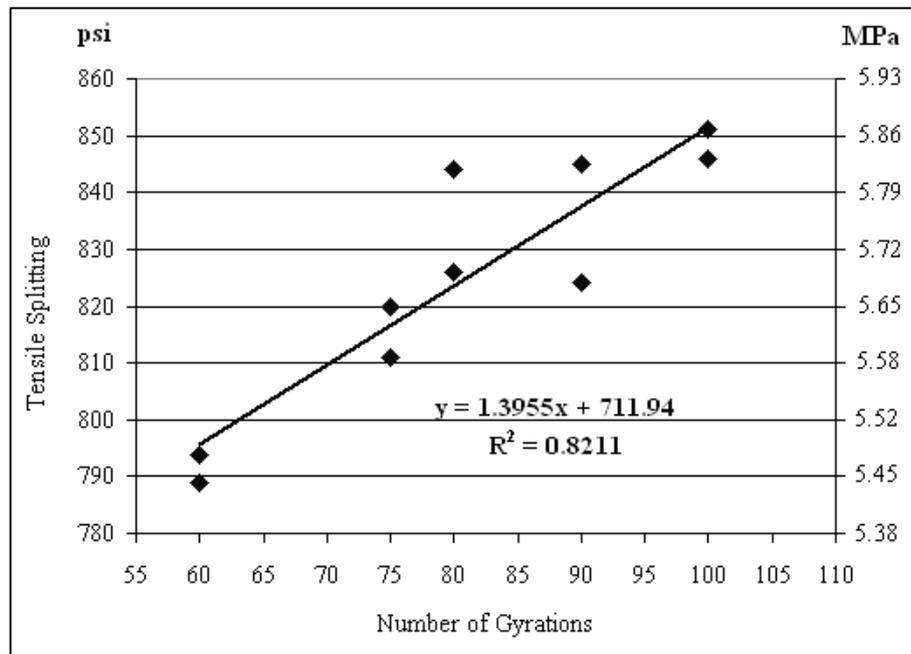


Figure I. 16: Résistance à la flexion par rapport au nombre de girations (Norbert Delatte 2003).

CHAPITRE II

CHAPITRE II : Déchets et agrégats recyclés

II.1. Introduction :

De nos jours, le recyclage et l'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays. L'industrie du béton est intéressée à cette nouvelle orientation ; en utilisant certains de ces produits au cours du processus de fabrication du béton. Toutefois, cette utilisation est régie par certaines caractéristiques recommandées afin de ne pas nuire aux résistances et à la durabilité des bétons.

La section suivante traitera l'effet de l'incorporation de certains ajouts minéraux dans les bétons. On fera le point sur l'effet des déchets et ces sous-produits sur les caractéristiques rhéologiques, mécaniques et physiques des bétons.

Partie A : Les déchets (sous-produit)

II.2. Définition:

Usuellement, un déchet désigne : la quantité perdue dans l'usage d'un produit, ce qui reste après l'utilisation.

II.3. Déchet de verre :

La quantité de déchets de verre produite a augmenté au cours des dernières années en raison des exigences croissantes des produits en verre. Lorsque le déchet de verre sera réutilisé dans l'industrie du béton, le coût du béton sera réduit (**Topcu et al., 2004**). Le recyclage de déchets de verre en le transformant en granulats fins et de poudre conduit à économiser les sites d'enfouissement et réduit la demande d'extraction de matières premières naturelles pour le secteur de la construction (**M.Rakshvir et al., 2006**).

II.4. La poudre de verre dans les bétons :

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe

SiO₂

CHAPITRE II

lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec le chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années (Idir et al., 2011; Schwarz et al., 2008). Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

II.5. Propriétés à l'état frais :

L'effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs, notamment, de sa finesse de mouture. (Zidol 2009) a étudié l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et auto-plaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un BAP ayant un rapport E/C = 0,4, l'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la viscosité plastique de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en super-plastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre (Zidol 2009). L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de super-plastifiant requis pour un étalement donné.

II.6. Propriétés à l'état durci :

II.6.1. Propriétés mécaniques :

Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps (Schwarz et al., 2008; Shayanet Xu, 2004; Zidol, 2009).

La poudre de verre n'a pas d'influence sur les résistances à jeune âge. Les résistances à la compression à 28 jours sont plus faibles par rapport à un béton de ciment Portland. Au-delà de 56 jours et jusqu'à 91 jours les résistances des bétons avec poudre de verre augmentent et sont équivalentes, voire supérieures au béton témoin (Zidol 2009). En effet, des bétons à hautes performances ont été formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m^3 et un rapport E/L de 0,40, l'incorporation de 20 et 30 % de poudre de verre confèrent au béton un taux de développement des résistances à la compression respectivement de 12 % et 18 %, alors que pour le béton témoin, ce même taux est de 9 %.

II.7. Durabilité :

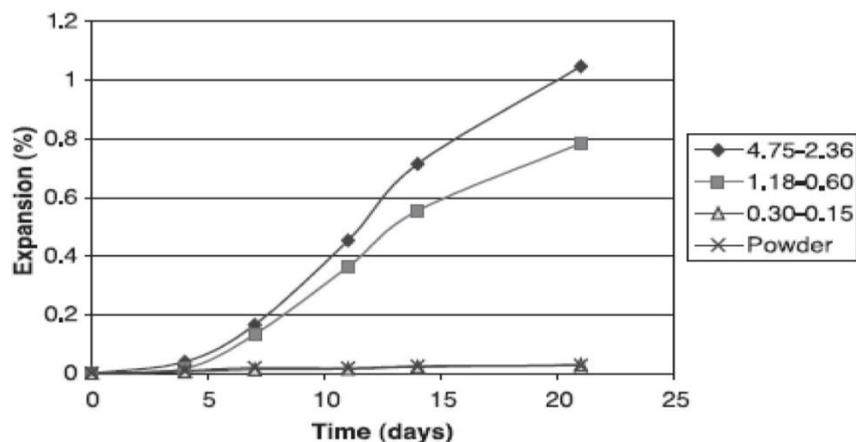
II.7.1. La réaction alcali-silice :

La réaction alcali-silice désigne la réaction chimique qui se produit entre les minéraux silicatés de certains granulats et les alcalis contenus dans la solution interstitielle du béton. Un gel expansif se produit et augmente de volume avec l'absorption de l'eau. Ce qui génère

des désordres dans les bétons : fissuration, expansion et baisse des performances mécaniques.

L'incorporation du verre finement broyé aide à limiter les dégâts causés par la réaction alcali-silice par ces propriétés pouzzoloniques. (Idir 2009) a étudié l'action des fines et des granulats de verre sur la réaction pouzzolonique et la réaction alcali-silice. Il trouve que plus la finesse du verre augmente plus la chaux est consommée. Ce qui résulte en une grande production de gel C-S-H contribuant ainsi à la densification de la matrice cimentaire et à la réduction de sa perméabilité. Néanmoins, il faut faire attention quant à l'utilisation des fines de verre pour lutter contre la réaction alcali-silice. En effet, ces fines peuvent apporter à la solution interstitielle une certaine quantité en alcalins entraînant le dépassement du seuil limite au-delà duquel les granulats peuvent réagir de manière néfaste (Idir 2009 ; 2011).

De même, dans une étude antérieure, (Shayan et Xu 2004) ont montré que l'utilisation des granulats de verre peut provoquer la réaction alcali-silice, alors que l'utilisation du verre sous forme de poudre contribue à contrôler l'expansion des granulats.



CHAPITRE II

Figure II. 1: Expansion due à la RAS des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (Shayan et Xu, 2004).

II.7.2. Pénétrabilité des ions chlorures :

Zidol (2014) ont montré que la poudre de verre améliore la perméabilité du béton aux ions chlorures quel que soit le rapport E/L utilisé.

II.7.3. Retrait des séchage :

L'étude de (Shayan et Xu 2004) montre que le retrait des séchage diminue avec la teneur en poudre de verre (Figure II.2). Les mélanges de béton incorporant 10 % (mix 2), 20 % (mix 3) et 30 % (mix 4) de poudre de verre ont un retrait en dessous de la limite fixée par la norme australienne de 0,075 % à l'âge de 70 jours.

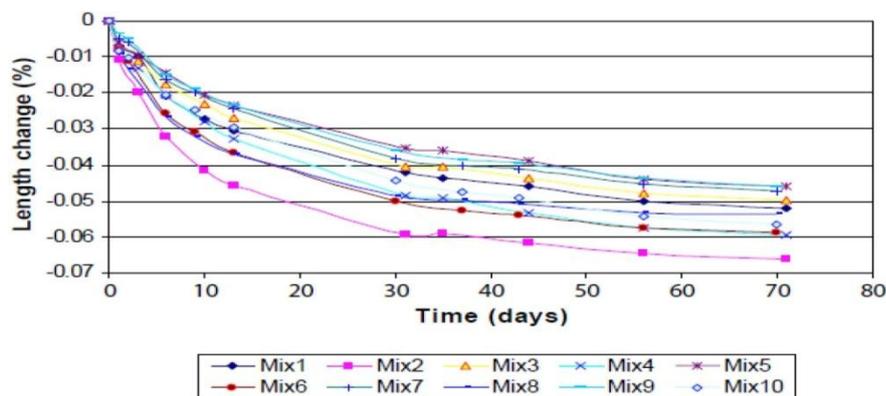


Figure II. 2: Retrait de séchage des bétons avec E/L = 0,49 (Shayan et Xu, 2006).

Partie B : Agrégats recyclés :

II.8. Introduction :

Les granulats sont considérés comme des constituants essentiels dans la composition du béton ordinaire ou des bétons spéciaux. L'utilisation des granulats recyclés a une grande importance du point de vue environnement car d'un côté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis. De l'autre côté ; leurs réutilisations permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats ordinaires.

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans de nombreux pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants

CHAPITRE II

de nouveau béton (béton recyclés). En effet, la thématique des bétons recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie bibliographique ne présente que les éléments essentiels à l'étude du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et la caractérisation de ses propriétés physiques et mécaniques à l'état durci.

II.9. Composition des granulats recyclés de béton :

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition.

En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont :

- Des granulats naturels concassés partiellement.
- De la pâte de ciment hydratée concassée, enrobant les granulats naturels (**De Juan M.S. and Gutiérrez P.A, 2009 ; Douara T.H, 2009**).

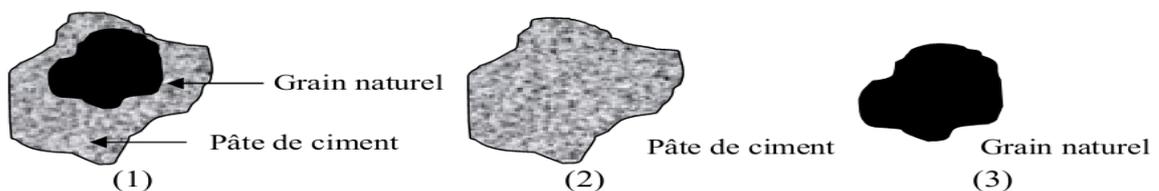


Figure II. 3: Formes des granulats recyclés.

II.10. Propriétés physiques des granulats recyclés :

De nombreuses études montrent que les propriétés physiques des granulats recyclés sont différentes de celles des granulats naturels (**Djerbi. A,et al., 2010**). Ils ont le plus souvent une densité plus faible et une absorption d'eau plus élevée liée à une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influe également sur la porosité des granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment.

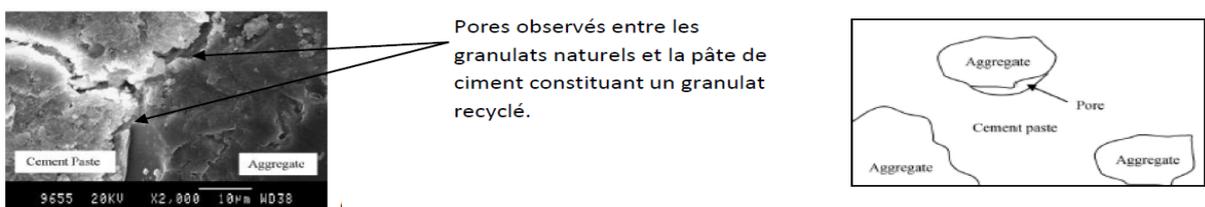


Figure II. 4: Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton (Djerbi. A,et al., 2010).

CHAPITRE II

II.11. Les propriétés chimiques des granulats recyclés :

La présence de mortier dans les granulats recyclés modifie les caractéristiques chimiques des granulats recyclés par rapport à celles des granulats naturels.

Des équipes de chercheurs ont montré la différence de solubilité des chlorures dans l'eau et dans l'acide pour différents teneurs en mortier (**Mahmoud. S, 2005**).

II.12. Propriétés du béton à base de granulats recyclés à l'état frais et à l'état durci :

Par rapport à des bétons de granulats naturels, les bétons de recyclés présentent des particularités de formulation :

II.12.1. Etat frais :

II.12.1.1. La teneur en air :

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. 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 (**Katz. A, 2003 ; Maafi. N et al., 2013**).

II.12.1.2. Masse volumique:

Elle est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité de mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 Kg/m³ (**Topcu et Guncan, 1995 ; Katz. A, 2003; Maafi. N et al., 2013**).

II.12.2. Etat durci :

II.12.2.1. Absorption:

L'absorption d'eau est importante pour les bétons de granulat recyclé. En effet, l'ensemble des études montre que les bétons de granulat recyclé sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau. De plus, il semble que la partie plus fine des granulats recyclés absorbe une quantité d'eau plus élevée que les éléments plus grossiers.

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions du béton de granulat recyclé nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de

CHAPITRE II

granulats naturels. En effet, les bétons de granulats recyclés requièrent approximativement 15% d'eau supplémentaire pour un même affaissement qu'un béton classique (**Evangelista et al., 2010 ; De Brito et al., 2010; Maafi. N et al., 2013**).

II.12.2.2. Porosité:

Des essais de porosité par injection de mercure montrent tout d'abord un volume important des gros pores dans les bétons de granulats recyclés.

La porosité des bétons de granulats recyclés est généralement corrélée à leur capacité d'absorption. La forte capacité d'absorption des bétons de granulats recyclés est liée à une forte porosité de ce matériau. Le taux de ciment dans le béton parent influence également sur la porosité des bétons de granulats recyclés. Celle-ci augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment (**Katz. A, 2003; Maafi. N et al., 2013**).

II.12.2.3. Perméabilité :

Selon Rasheeduzzafar (1984), lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,55, la présence de granulats de recyclage ne modifie pas cette propriété. Par contre pour des faibles valeurs du rapport E/C, la perméabilité des bétons recyclés est supérieure à celles des bétons conventionnels.

II.12.2.4. Résistance à la compression :

Toutes les études montrent que la résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés peut être de 5 à 40 % plus faible que celle d'un béton formulé avec des granulats naturels.

De façon générale, les études menées ont montré que la résistance à la compression dépend :

- Du taux de substitution pour un rapport E/C constant. La diminution de la résistance à la compression est peu significative lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% (**Chakradhara. R.M, et al., 2011; Gonzalez-Fonteboa. B, et al., 2008; Maafi. N et al., 2013**). Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés et une mauvaise interface granulats/ liant.
- de la nature des ajouts d'origine minérale.
- de la nature du ciment.

CHAPITRE II

(Katz 2003) a constaté que dans un rapport E/C (entre 0,6 et 0,75), la résistance du béton à base de granulats recyclés est comparable à celui du béton de référence, même à un niveau de remplacement de 75%.

(Rao 2005) a trouvé que la résistance du béton à base de granulats recyclés et le béton de référence sont comparables avec un remplacement à 100%, à condition que le rapport eau-ciment soit supérieur à 0,55.

Selon (Quebaud 1996), la comparaison des performances du béton à base de granulats recyclés par rapport à un béton de même composition formulé avec des granulats naturels donne les indications suivantes résistances à la compression inférieures d'environ **10 à 30 %**.

II.12.2.5. Résistance à la traction par flexion et par fendage :

Les résultats issus des essais de traction uni axiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés de 15 à 20% par rapport à béton référence à 100% de remplacement (Rao, 2005 ; Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2002; Maafi. N et al., 2013).

II.12.2.6. Module d'élasticité :

Plusieurs études ont signalé la faible rigidité des bétons à granulats recyclés. Pour un béton ordinaire, le module élastique augmente en fonction de l'âge du béton tandis que celui des bétons de granulats recyclés ne semble pas dépendent de l'âge de l'éprouvette de béton (Oikonomou N.D 2005; Maafi. N et al., 2013).

II.12.2.7. Fluage et retrait :

La forte absorption due à la présence d'ancien mortier à la surface des granulats et de la porosité élevé, influant sur les déformations de fluage et de retrait, elles sont nettement supérieures à celles des bétons à granulats naturels.

Certaines études montrent que, pour le béton à base de granulats recyclés à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ de 0,55 à 0,8 mm/m, alors que la valeur pour un béton à base de granulats naturels est seulement d'environ 0,30 mm/m (Katz, 2003).

Cependant, les résultats des tests pour le fluage en conditions normales de laboratoire ne sont pas si évident, si certaines études ont montré la tendance à s'inverser, c'est-à-dire le fluage après 1 an est d'environ 20% inférieur à celle du béton à base de granulats naturels.

CHAPITRE II

II.12.3. Durabilité du béton à base de granulats recyclés :

Les études de durabilité ont été réalisées pour mieux comprendre l'effet de l'utilisation de différentes qualités des agrégats recyclés sur les propriétés du béton à base de granulats recyclés. Cependant, certaines études ont montré que le béton à base de granulats recyclés est beaucoup plus perméable que le béton à base de granulats naturels, donc est un béton moins résistant à un degré satisfaisant aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration.

II.12.3.1. Carbonatation :

La carbonatation est particulièrement affectée par l'incorporation de granulats recyclés. Sur la base du test de carbonatation fait après 6 mois de séchage, la profondeur de la carbonatation du béton recyclé a été jugée (1,3-2,5) fois supérieure à celle du béton à base de granulats naturels (Crentsil et al, 2001; Levy Salomon et Paulo 2004). On voit que pour le même ratio liant de l'eau, la profondeur de carbonatation du béton à base de granulats recyclés est légèrement plus élevée que celle du béton à base de granulats naturels (Otsuki et al. 2003). Cette augmentation de la profondeur de carbonatation peut être attribuée à une augmentation de la perméabilité du béton à base de granulats recyclés.

CHAPITRE III

CHAPITRE III : Matériaux, matériels et essais.

III.1. Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes et les modes opératoires en vigueur.

III.2. Matériaux utilisés:

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux, nous avons effectué des études expérimentale qui concerne leurs caractéristiques au saine du laboratoire de génie civil à l'université EL BACHIR EL IBRAHIMI Bordj Bou Arreridj.

III.3. Caractéristiques des matériaux:

III.3.1. Caractéristiques du gravier :

Le gravier est un élément très essentiel pour la confection des bétons, cependant pour les BCR, ce constituant doit être sans reproche afin d'obtenir un béton performant sur tous les niveaux. Pour la confection des BCR dans cette étude, deux fractions de gravier (3/8 et 8/15) ont été utilisées.

III.3.1.1. gravier concassé :

Les graviers concassé proviennent de la carrière d'EL EUCH, leurs caractéristiques et leurs fuseaux granulaires sont présentés dans le tableau III.1 et la figure III.1.

Tableau III. 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers concassés

Propriétés	Symboles	3/8	8/15
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.202	1.331
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.55	2.609
Compacité	C (%)	47	51

CHAPITRE III

L'indice de vide	e	1.128	0.961
Porosité	P(%)	53	49
Los Angeles	LA	29.08	26.94

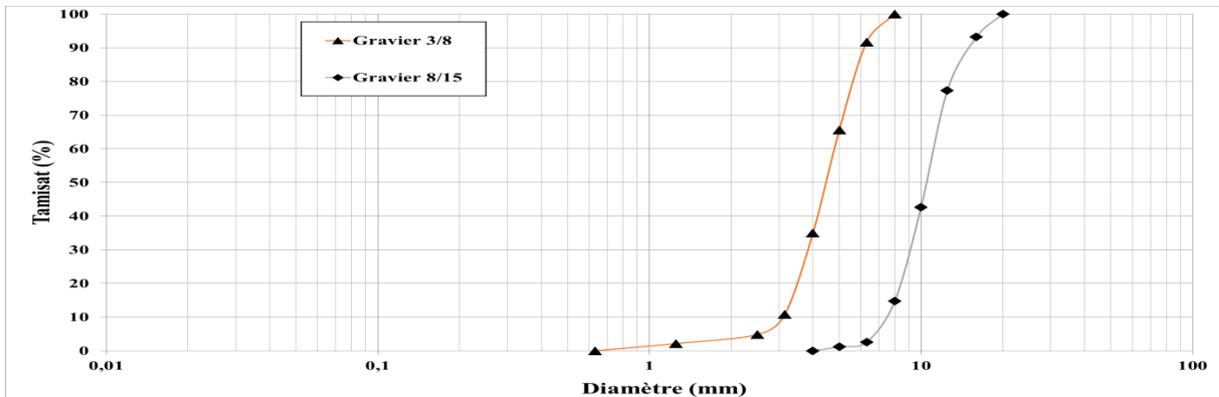


Figure III. 1: Courbe granulométrique de graviers concassés (3/8), (8/15).

III.3.1.2. Gravier recyclé :

Le gravier recyclé est obtenu à partir du concassage, tamisage et séparation des éprouvettes cylindriques, qui ont été ramenés depuis le Bureau d'études et suivi technique à Bordj Bou Arreridj. Les éprouvettes ont été confectionnées à partir d'un béton local fabriqué dans un chantier.

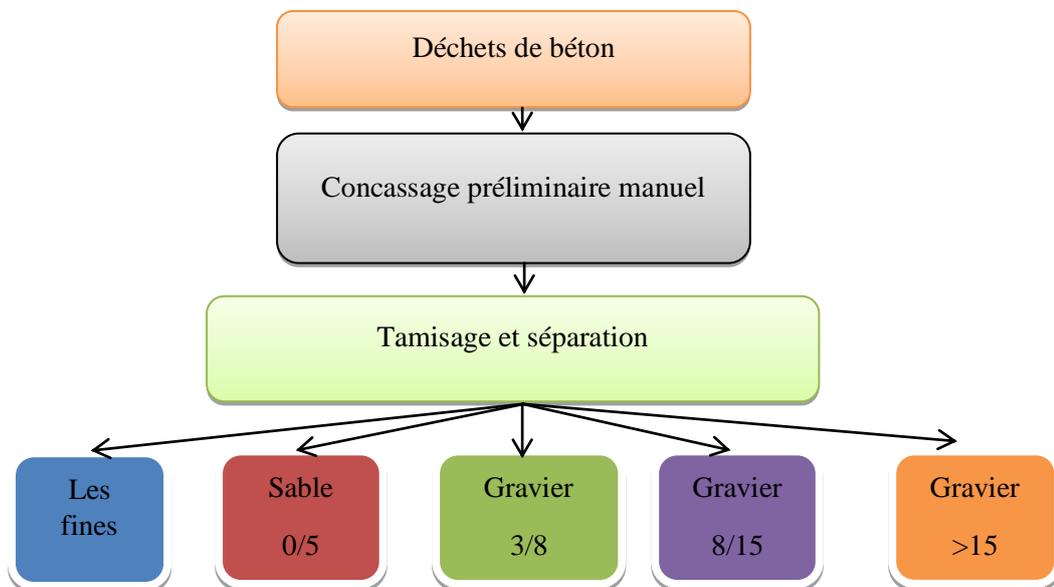


Figure III. 2: Procédure de préparation des granulats recyclés.

CHAPITRE III



Figure III. 3: Concassage, criblage, tamisage et séparation des agrégats recyclés.

Les caractéristiques et les fuseaux granulaires des graviers recyclés sont présentés dans le tableau III.2 et la figure III.4.

Tableau III. 2: Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers recyclés.

Propriétés	Symboles	3/8	8/15
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.158	1.325
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.362	2.493
Compacité	C (%)	49	53
L'indice de vide	e	1.041	0.887
Porosité	P(%)	51	47
Los Angeles	LA	37.94	34.18

CHAPITRE III

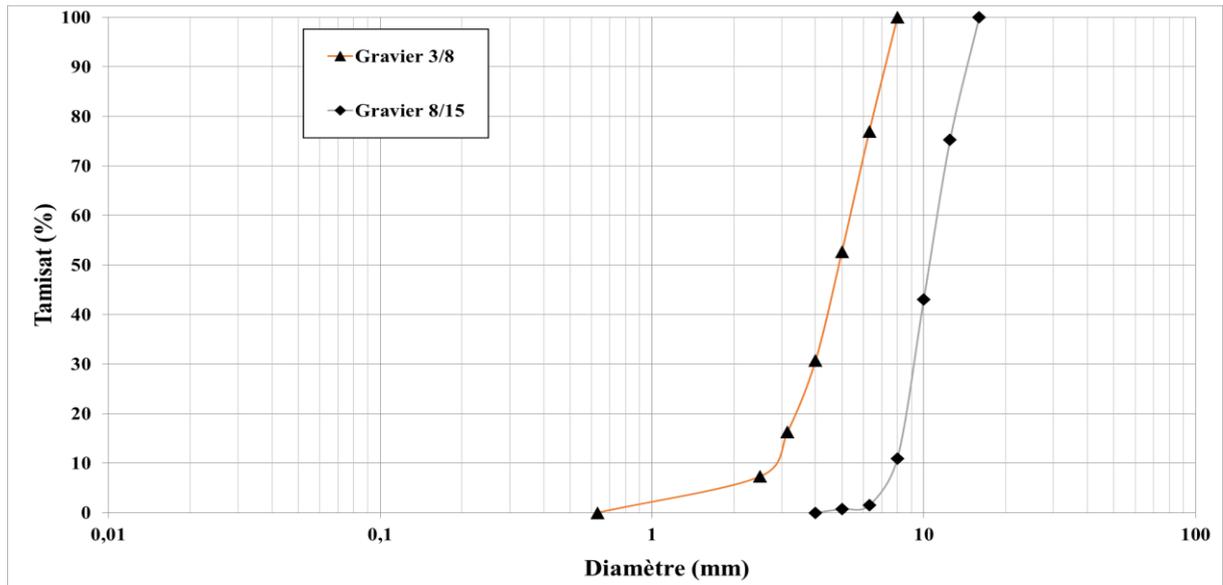


Figure III. 4: Courbe granulométrique des granulats recyclés (3/8), (8/16).

III.3.2. Caractéristiques du sable :

Le BCR est un béton très sensible au fuseau granulaire de ces agrégats. Il tient sa performance et sa durabilité de sa compacité qui est certes procurée par le compactage, mais aussi par la continuité de son squelette granulaire. Le sable de dune provient de la région d'OUED SOUF alors que le sable concassé provient de la carrière d'EL EUCH. L'utilisation de deux types de sables, comme dans le cas de cette étude, procure au squelette granulaire du béton une compacité maximale. En effet, le premier sable (sable de dune) possède un faible module de finesse (2.06) par rapport au second sable (sable concassé=3.24), le cumulé des deux modules de finesse donne un mélange adéquat pour la confection du BCR. Les caractéristiques des deux sables sont présentées dans le tableau III.3 et la figure III.5 :

Tableau III. 3 : Caractéristiques physiques des deux sables utilisés.

Propriétés	Symboles	Sable de dune	Sable concassé
Masse volumique apparente	ρ (g/cm ³)	1.70	1.53
Masse volumique absolue	ρ_{abs} (g/cm ³)	2.67	2.53
Équivalent de sable	$E_{s.Pmoy}$ (%)	80.36	94.08
Modules de finesse	MF	2.06	3.24
Compacité	C (%)	63.67	60.47

CHAPITRE III

L'indice de vide	e	0.41	0.65
Porosité	P(%)	26.33	39.53

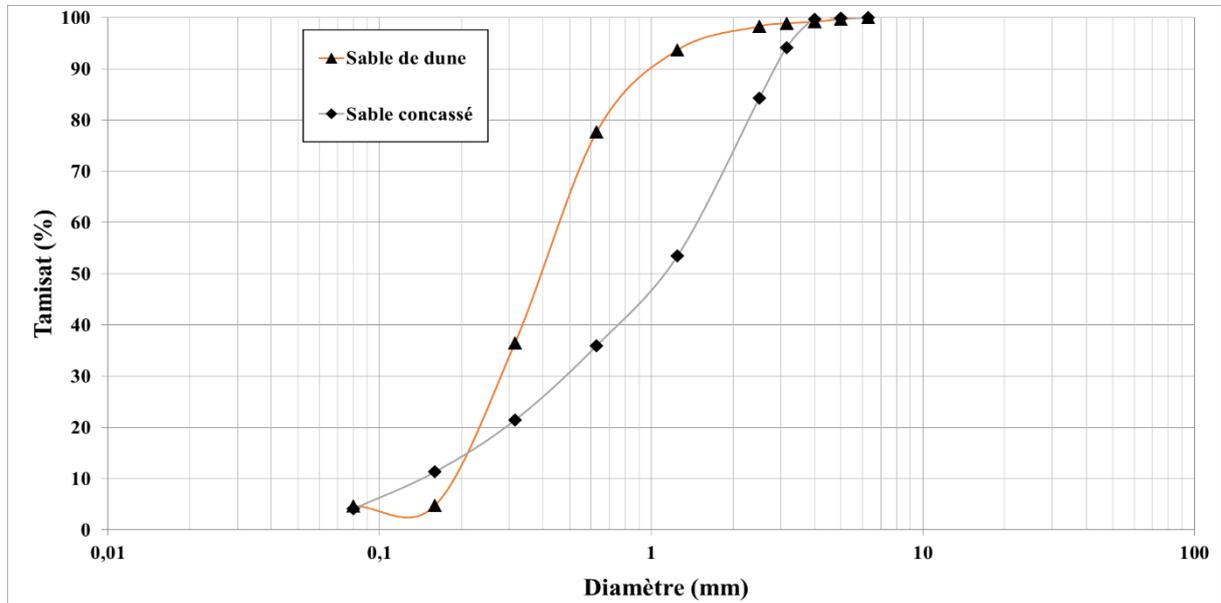


Figure III. 5: Courbe granulométrique des sables utilisés.

III.3.3. Liant :

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

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland de classe CEM 1 42.5R, pour les bétons hauts performances et a une résistance rapide à court terme. Le ciment provenant de la cimenterie de BISKRA (Algérie). Les caractéristiques chimique et minéralogique du ciment sont présentées dans le tableau III.4.

CHAPITRE III

Tableau III. 4: Les caractéristiques chimique, physique et minéralogique du ciment.

Analyses chimiques (%)	Valeur
Perte au feu	2.5-3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2-2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	17-28
Teneur en Chlorures (C)	0.03 -0.07
Composition potentielle de la valeur Clinker (%)	Valeur
C ₃ S	56-66
C ₃ A	5.1-7.2
Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale (%)	25.8-26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25-1.0
Temps de prise (min)	Valeur
Début de prise	150-190
Fin de prise	220-250
Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	20-29
28 jours(MPa)	42.5-52.5

III.3.4. Poudre de verre :

La poudre de verre est obtenue à partir du concassage, tamisage et broyage des déchets de verre.

Les caractéristiques et les fuseaux granulaires du poudre de verre sont présentés dans le tableau III.5 et la figure III.6.

Tableau III. 5: Caractéristiques physiques de la poudre de verre.

	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)
Poudre de verre	1.517	2.5	2280

CHAPITRE III

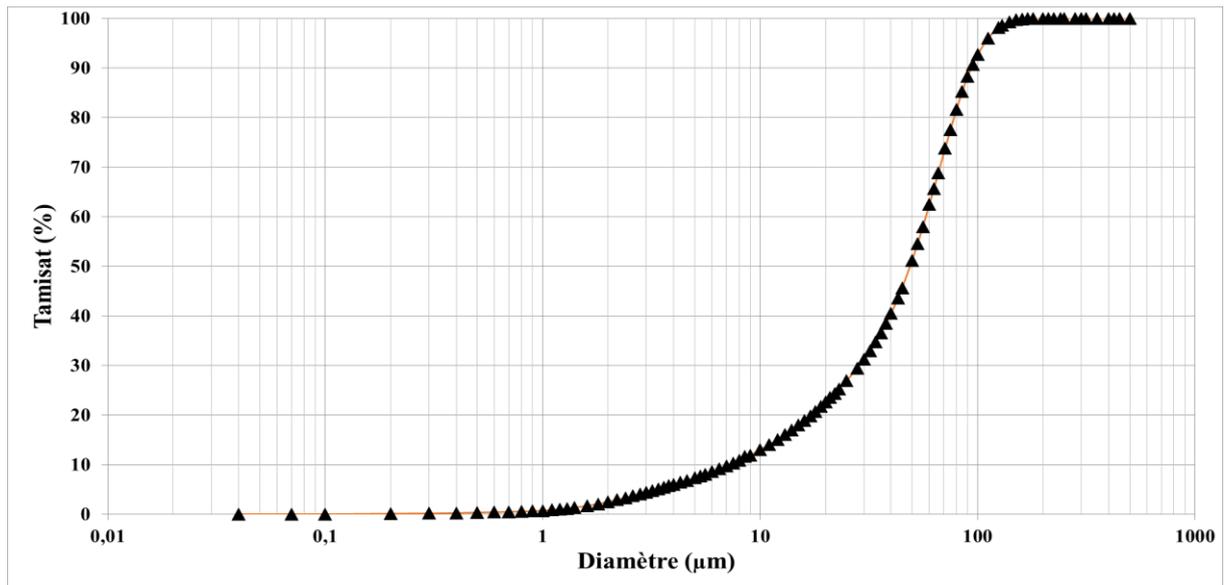


Figure III. 6: Courbe granulométrique de la poudre de verre utilisé.

III.3.5. L'eau de gâchage :

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

Tableau III. 6: Analyse chimique de l'eau utilisée.

Paramètre	Quantité	Commentaire
pH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 $\mu\text{s}/\text{cm}$	
Taux de (Cl ⁻)	0.24mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO ₂ ⁻)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO ₃ ⁻)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Turbidité	1,44 NTU	
Dureté total	6,72 °F	15-50
Résidu sec	100 mg/l	

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université d'Elbachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

Les résultats obtenus ont montré que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

III.3.6. Adjuvant :

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.

CHAPITRE III

Le 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 ainsi le risque de fissuration.

MEDACURE permet au ciment de s'hydrater correctement et au béton d'avoir une vitesse de prise normale par temps chaud, vent fort ou hygrométrie faible. Cette protection sera maintenue jusqu'à maturité du béton (3 à 4 semaines).

Le MEDACURE utilise dans plusieurs domaines tel que :

- Protection de tous les bétons avec une grande surface exposée au soleil.
- Protection des chapes en mortier.
- Protection des bétons dans les climats chauds.
- Routes et pistes d'aérodrome en béton
- Dallages et dalles en béton
- Enduit au mortier de ciment
- Réservoirs, terrasses.

III.3.7. Préparation des agrégats recyclés :

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 une technique 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. Après le séchage, un adjuvant (MEDACURE) a été pulvérisé régulièrement sur les granulats à faibles quantités. La poudre de verre a été ajoutée 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 la poudre de verre. La Figure III.7 illustre l'aspect des granulats après le traitement.

CHAPITRE III



1- Granulats lavés



2-MEDACURE



4-Poudre de verre



3-Granulats pulvérisés MEDACURE



5-Granulats pulvérisés au Medacure et puis à la poudre de verre (Granulats traités)

Figure III. 7: Les étapes de traitement des granulats recyclés

CHAPITRE III

III.4. Formulation du BCR :

Dans cette partie la formulation a été étudiée afin de déterminer les quantités adéquates pour notre BCR, la méthode suivie est celle qui se base sur la mécanique des sols (la méthode basée sur la géotechnique). Le principe de cette méthode est de déterminer premièrement, la proportion des granulats fins par rapport aux granulats grossiers par les fuseaux granulométriques. Ensuite, une série de mélange de béton à différentes teneurs en liant sont réalisés. La quantité de liant peut varier entre 11 et 14% de la masse totale des matériaux secs. Pour chaque série (c'est-à-dire, pour une teneur en liant donnée), les mélanges sont réalisés à différentes teneurs en eau (entre 4 et 7%). La teneur en eau optimale doit être déterminée en suivant la méthode décrite à la norme (ASTM C 1557 – méthode D). Cette méthode permet de sélectionner la teneur en eau qui correspond à la masse volumique sèche maximale. Chaque échantillon de béton est compacté dans un moule cylindrique avec une énergie de compactage spécifique. La masse du volume de béton ainsi compacté est mesurée et la masse volumique sèche est calculée. La relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau est mise en graphique.

III.4.1. Fuseau granulométrique :

Les résultats représentés dans le tableau III.7 et la figure III.8 sont utilisés pour choisir les pourcentages des différentes fractions d'agrégats.

Tableau III. 7 : Tamisât de différentes fractions d'agrégats.

Diamètre	Gravier 8/15	gravier 3/8	Sable		combinée
			Dune	Concasse	
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	93,18	100,00	100,00	100,00	97,61
12,5	77,29	100,00	100,00	100,00	92,05
10	42,60	100,00	100,00	100,00	79,91
8	14,72	100,00	100,00	100,00	70,15
6,3	2,54	91,61	100,00	100,00	64,63
5	1,16	65,51	99,70	99,89	60,17
4	0,00	34,95	99,20	99,69	55,06
3,15	0,00	10,79	98,89	94,18	48,94
2,5	0,00	4,86	98,30	84,26	43,56
1,25	0,00	2,13	93,70	53,50	29,08

CHAPITRE III

0,63	0,00	0,00	77,70	35,97	20,07
0,315	0,00	0,00	36,50	21,44	11,47
0,16	0,00	0,00	4,80	11,32	5,33
0,08	0,00	0,00	4,70	4,10	2,08
fond	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

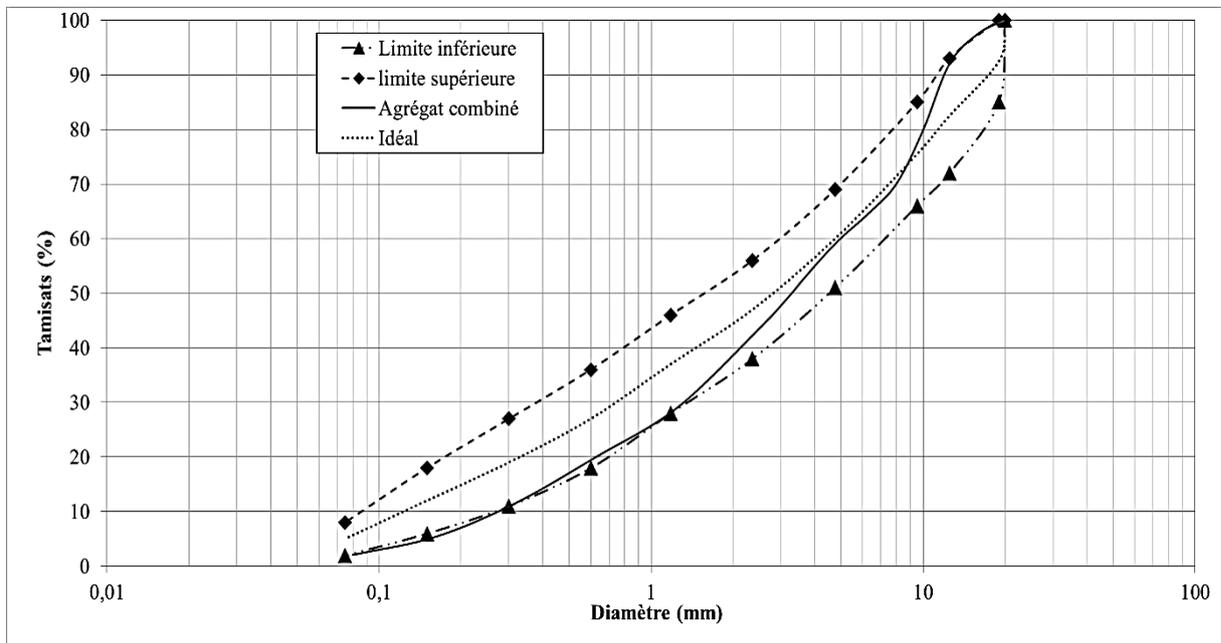


Figure III. 8: Fuseau granulaire.

D'après le fuseau granulaire correspondant au mélange, nous avons obtenu les pourcentages des différentes fractions des granulats tels que montrés dans le tableau III.8.

Tableau III. 8: Pourcentage des granulats.

Sable dune	5%
Sable concasse	45%
Gravier 3/8	15%
Gravier 8/15	35%

III.4.2. Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment :

La quantité d'eau optimale déterminée à l'aide de l'essai Proctor modifiée (ASTM C 1557 – méthode D).

CHAPITRE III

Pour compacter le BCR au laboratoire, nous avons utilisé le procédé Proctor modifié qui correspond à une énergie de compactage assimilable à l'énergie donnée par un rouleau compacteur. On a choisi le moule CBR pour le béton compacté au rouleau qui ressemble aux sols grossiers dont les diamètres des grains ne dépassent pas 20 mm.

Pour déterminer la teneur en eau optimal, l'essai de Proctor a été réalisé pour différentes teneur en eau (4, 5, 6 et 7%), pour le pourcentage du ciment, on a choisie d'utilisé 14%. Les résultats son regrouper dans le tableau III.9 puis représenté dans la figure III.9.

Tableau III. 9 : Essai de Proctor pour 14% de ciment.

w théorique (%)	4%	5%	6%	7%
Mh ₁ (g)	6602,0	6872,0	6821,0	6750,0
Volume de moule (cm ³)	2780	2780	2780	2780
γ_h g/cm ³	2.375	2.472	2.454	2.428
Mh ₂ (gr)	42.377	42,702	42,366	40,435
Ms (gr)	40.837	40,659	39,901	37,860
W mesurée (%)	3.772	5,026	6,178	6,801
γ_d (g/cm ³)	2.283	2.354	2.315	2.269

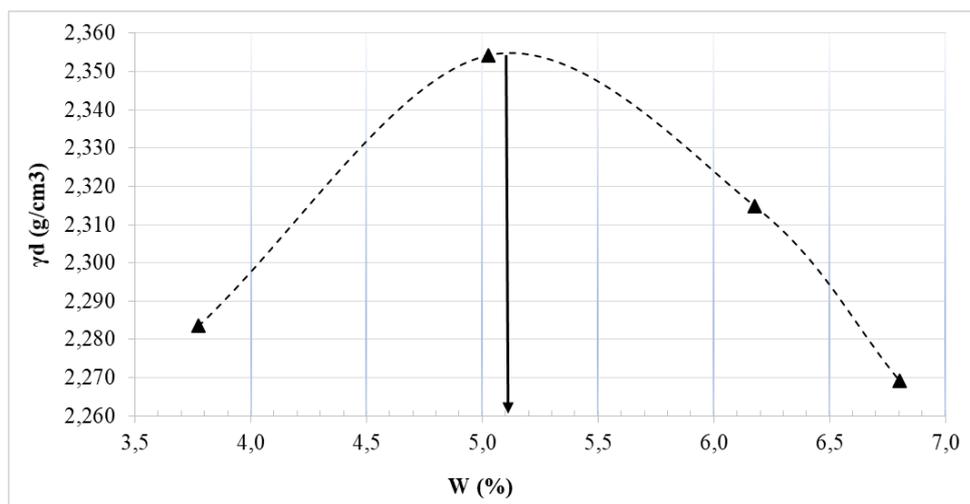


Figure III. 9: La densité sèche en fonction de la teneur en eau.

On peut voir d'après la figure ci-dessus que l'optimum se situe à 5,12%.

III.4.3. Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR :

Avec une teneur de 14% de ciment et de 5,35% d'eau les quantités pour un mètre cube de BCR sont comme suit :

CHAPITRE III

Tableau III. 10: Les quantités des matériaux pour un mètre cube.

	(%)	Dosage (kg/m ³)
Sable dune	5%	98,521
Sable concasse	45%	953,813
Gravier 3/8	15%	309,695
Gravier 8/15	35%	714,378
Ciment	14%	290,697
L'eau	5,12%	121,196

III.5. Techniques expérimentales :

III.5.1. Compactage :

Le compactage a été effectué en utilisant d'un marteau de compactage vibrant conforme à la norme NF EN 12697, 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.

III.5.1. La résistance à la compression :

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisée (10*10*10 cm) suivant la norme ASTM C39. L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

III.5.2. La résistance à la traction par flexion :

Cet essai a été réalisé conformément à la norme Américaine ASTM C293 (essai de résistance à la flexion en trois points). La réalisation de cet essai se fait sur une éprouvette prismatique de BCR mesurant 280 mm de longueur et 70 mm de hauteur et de largeur.

L'essai de résistance à la flexion a été réalisé après 7, 14 et 28 jour de conservation sur tous les mélanges de BCR. La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante :

$$f_{cf} = 1.5 \frac{F.l}{d_1 \cdot d_2^2}$$

CHAPITRE III

D'où :

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

F : Est la charge maximale, en newtons ;

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

d_1 et d_2 : Sont les dimensions latérales de l'éprouvette, en millimètres.

III.5.3. Auscultation dynamique (Ultrason) :

La méthode qui consiste à mesurer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques est actuellement la seule du genre qui permette d'effectuer des essais de résistance sur le béton coulé sur place.

III.5.4. Porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau (indication du volume poreux) est mesurée en saturant sous vide trois échantillons. Après cela, la porosité est calculée par le rapport de la masse d'eau contenue dans la porosité sur le volume apparent de l'échantillon qui est déterminé par une pesée hydrostatique.

Trois différentes pesées ont été réalisées pour calculer la porosité P (%). La masse de l'échantillon sec M_{sec} (après étuvage à 105 °C pendant 24 heures) est calculer puis l'échantillon est immergé dans l'eau pendant 72 heures, le poids obtenu représente M_{air} . Finalement, la pesée hydrostatique est effectuée (M_{eau}).

$$P = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \%$$

Avec :

M_{air} : masse de l'échantillon immergé dans l'eau, pesé dans l'air ;

M_{sec} : masse de l'échantillon sec (étuve à 105 °C) ;

M_{eau} : masse de l'échantillon avec une pesée hydrostatique.

III.5.5. Absorption d'eau :

Cette norme a pour objet d'exposer la technique pour mesurer le coefficient d'absorption d'eau par le béton.

Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105°C jusqu'à une masse constante. On considère que cette masse est atteinte lorsque l'écart entre deux pesés

CHAPITRE III

effectuées à une heure d'intervalle est au plus égale à 1/1000 (Généralement, il suffit de 15 heures à l'étuve pour éteindre cette masse

On note la masse M1 (en gramme) de chaque éprouvette sèche.

- Au temps t, on place les éprouvettes dans l'eau potable jusqu'au quart de leur hauteur de façon que l'eau remonte perpendiculairement au lit de carrière.
- À [t+1 heure], on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour que le niveau atteigne la moitié de la hauteur des éprouvettes.
- À [t+22 heures] on ajoute de l'eau jusqu'à ce que les éprouvettes soient complètement immergées.
- À [t+48 heures], les éprouvettes sont sorties de l'eau, rapidement essuyées à l'aide d'un chiffon ou d'une peau de chamois humide, puis pesées, soit M2 la masse (en grammes) de chaque éprouvette saturée d'eau à la pression atmosphérique [93].

Alors le taux d'absorption sera calculer a partir cette formule :

$$A(\%) = \frac{(M2 - M1)}{M1} \times 100\%$$

A : taux d'absorption.

M1 : masse d'éprouvette après l'étuvage.

M2 : masse d'éprouvette saturée d'eau.

CHAPITRE IV : Résultats et discussion.

IV.1. Introduction :

Dans le présent chapitre, sont exposés les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les bétons, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats, suivi d'une comparaison avec ceux reproduites dans la littérature seront également présentés dans ce chapitre.

Les paramètres pris en compte sont :

1. L'influence de l'âge du béton.
2. Le taux de substitution des agrégats recyclés.
3. L'influence de traitement des agrégats sur le béton compacté au rouleau (BCR).

IV.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations:

Afin d'évaluer l'effet des granulats recyclés sur la performance du BCR, deux mélanges ont été préparés avec différentes teneurs en granulats recyclés: 50 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 effectuées en utilisant d'un marteau de compactage vibrant, 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.

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du BCR à base des granulats recyclés, un traitement a été fait sur les agrégats recyclés, ce traitement se fait par lavage des granulats recyclés nous et les pulvérisés au MEDACURE et puis au poudre de verre. Les granulats recyclés traités ont été incorporés dans le BCR en remplacement d'une partie du volume total des graviers naturels.

Des éprouvettes cubiques (100x100x100 mm), ont été utilisées pour la mesure de la résistance à la compression et la vitesse de propagation (V). Des éprouvettes prismatiques (70x70x280 mm) ont été utilisées pour la mesure de la résistance à la traction par flexion, l'absorption totale et la porosité accessible.

CHAPITRE IV

IV.3. La nomination des bétons :

BGN : Béton compacté aux rouleaux à base des granulats naturels (BCR témoin).

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

BGR50T : Béton compacté aux rouleaux à base de 50% des granulats recyclés et traité.

BGR100T : Béton compacté aux rouleaux à base de 100% des granulats recyclés et traité.

IV.4. Résultats :

IV.4.1. La résistance à la compression :

La résistance en compression est un facteur important dans un mélange à base cimentaire. Elle peut donner une forte indication sur la qualité du produit finale. Les résultats obtenus sont représentés par la figure IV.1 :

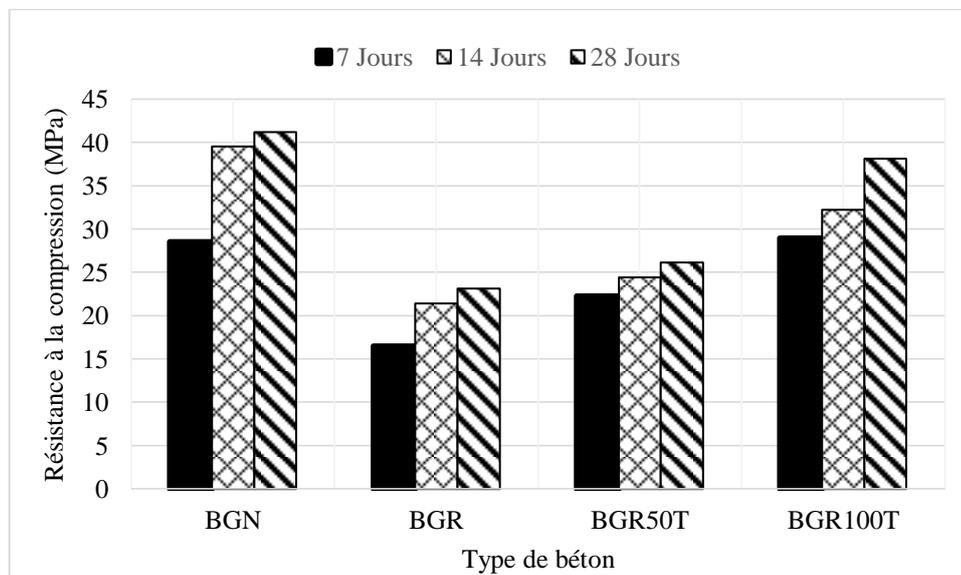


Figure IV. 1: Résistance à la compression des différents mélanges de BCR à 7, 14 et 28 jours.

Selon la figure IV.1, on remarque que tous les mélanges étudiés présentent la même cinétique de développement de la résistance aux différents âges 7, 14, et 28 jours. Cela est naturel vu que tous les mélanges ont le même dosage de liant.

Généralement, les valeurs obtenues de la résistance à la compression (**R_c**) sont plus faibles pour un béton avec **100 %** agrégats recyclés (**BGR**) en comparaison avec le béton témoin

CHAPITRE IV

(**BGN**), cependant pour les autres types des bétons la valeur maximale enregistrée est toujours obtenue pour le béton (**BGN**) c.-à-d. sans substitution. Ce béton donne une meilleure résistance à la compression à 28 jours environ (**41,18 MPa**) par rapport aux autres types de BCR.

Le béton avec **100%** agrégats recyclés (**BGR**) donne une résistance à 28 jours très faible (**23,17MPa**) en comparaison avec les autres bétons. On note une diminution de la résistance à la compression du béton **100%** recyclé (**BGR**) de l'ordre de **44%** par rapport au béton témoin (**BGN**). On constate l'effet de substitution des agrégats recyclés remarquable sur le développement de la résistance (**Rc**). Ceci peut être attribué à la nature des agrégats, notamment les granulats recyclés qui ont une porosité élevée et en teneur en air importante, et moins de compacité en comparaison avec les agrégats concassés (dense, compacte). Selon des études précédentes faites sur la résistance à la compression du béton recyclé est légèrement supérieure (**10 à 30%**) comparativement à un béton à base de granulat 100% naturel (**Quebaud 1996 ; Maafi. N et al., 2013**).

Le béton avec **100 %** agrégats recyclés et traité par la poudre de verre (**BGR100T**) (**38,11 MPa**) donne une valeur de résistance à la compression (**Rc**) à 28 jours similaire à celui du béton témoin (**BGN**) (**41,18 MPa**), Cette augmentation causé par le changement de 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 verre 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.

IV.4.2. La résistance à la traction par flexion :

À partir la figures IV.2 qui représente la variation de la résistance à la traction par flexion des différents mélanges ;on observe que l'utilisation des agrégats recyclés dans les BCR avec remplacement de 100% a un effet négatif sur la résistance à la traction par flexion, on note une diminution de l'ordre de **34%** par rapport au béton témoin (**BGN**) a été remarquée. Selon des études précédentes faites sur la résistance à la traction par flexion du béton recyclé à 28 jours est inférieure à 10% comparativement à un béton à base de granulat 100% naturel (**Ajdukiewicz et al., 2002**).

CHAPITRE IV

D'après la figure IV.2, on constate l'effet de traitement des agrégats recyclés par la poudre de verre est remarquable sur le développement de la résistance à la traction par flexion. Le béton avec 100 % agrégats recyclés et traité par la poudre de verre (**BGR100T**) (**6,71 MPa**) donne une valeur de résistance à la traction par flexion à 28 jours similaire à celui du béton témoin (**BGN**) (**7,34 MPa**).

La résistance des bétons sous des sollicitations de flexion est très faible, ce matériau a d'excellentes performances au niveau de la compression, mais en ce qui concerne la flexion son rendement est très limité.

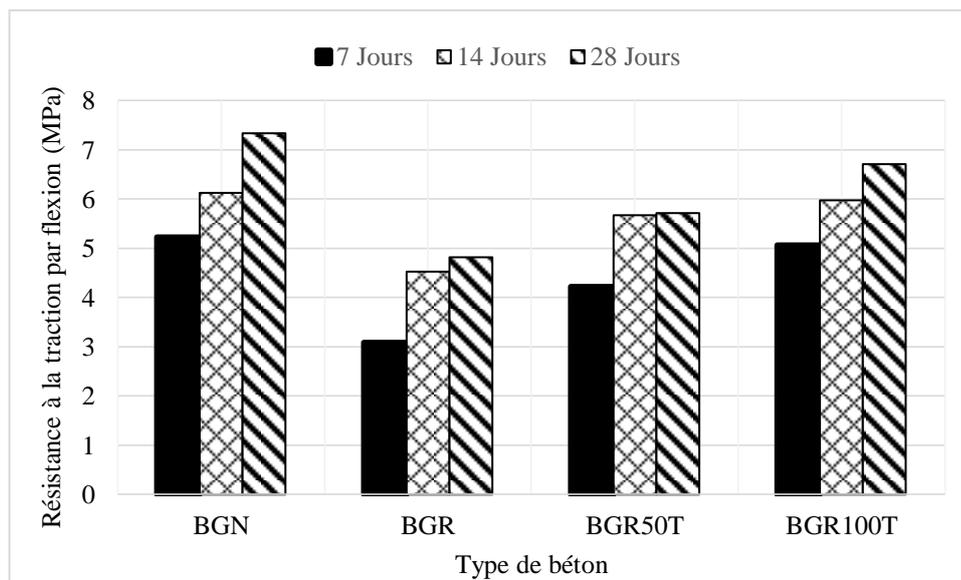


Figure IV. 2: Résistance à la traction par flexion des différents mélanges de BCR.

IV.4.3. Vitesse de propagation d'ultrason:

À partir la figures IV.3 qui représente la variation de vitesse de propagation d'ultrason (V) des différents mélanges ;on observe que l'utilisation des agrégats recyclés dans les BCR avec remplacement de 100% a un effet négatif sur la vitesse de propagation d'ultrason.

Selon la figure IV.3, on constate que le béton témoin (**BGR**) présente la meilleure valeur de la vitesse ultrason (V)(**4651 m/s**) par rapport aux autres types des bétons testés.

CHAPITRE IV

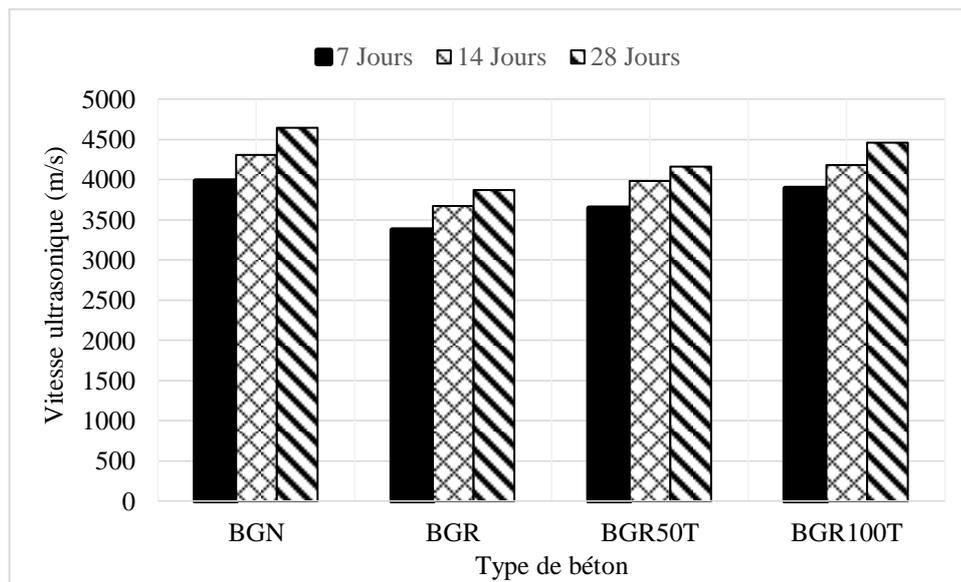


Figure IV. 3: Vitesse de propagation d'ultrason (V) des différents mélanges de BCR.

Le béton avec **100%** agrégats recyclés (**BGR**) donne une valeur de vitesse d'ultrason à 28 jours faible (**3876 m/s**) en comparaison avec les autres bétons. On note une diminution de la de l'ordre de **17%** par rapport au béton témoin (**BGN**). On constate que le remplacement des agrégats naturels par agrégats recyclés présente une diminution de la vitesse (**V**). Ceci est principalement, du au faite que la présence des agrégats recyclés qui ont une porosité élevée et en teneur en air importante, qui freine et amortisse la propagation des ondes (vides et pores) (**Quebaud 1996 ; Maafi. N et al., 2013**).

Le béton avec **100 %** agrégats recyclés et traité par la poudre de verre (**BGR100T**) (**4461 m/s**) donne une valeur de vitesse de propagation d'ultrason (**V**) à 28 jours similaire à celui du béton témoin (**BGN**) (**4651 m/s**), Cette augmentation causé par le changement de 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 verre par l'intermédiaire de produit adhésif (**MEDACURE**) qui remplir les vides et diminué la porosité . On peut constater comment le traitement de la surface de granulats recyclés améliore clairement les propriétés du BCR.

IV.4.4. Absorption totale :

La figure IV.4 montre l'évolution de l'absorption totale des BCR. Cette caractéristique nous permet d'avoir un aperçu sur les structures poreuses des bétons à une macro-échelle. L'absorption totale peut aussi nous donner une idée sur les performances mécaniques des bétons. En effet, la littérature nous apprend que la majorité des bétons avec un faible

CHAPITRE IV

coefficient d'absorption capillaire présentent des bonnes performances mécaniques. On peut estimer, d'après les résultats de l'absorption capillaire, la durabilité des bétons dans un milieu agressif; un béton durable doit forcément avoir un faible coefficient d'absorption ce qui minimise les transferts de fluide entre le milieu extérieur et le milieu interne du béton.

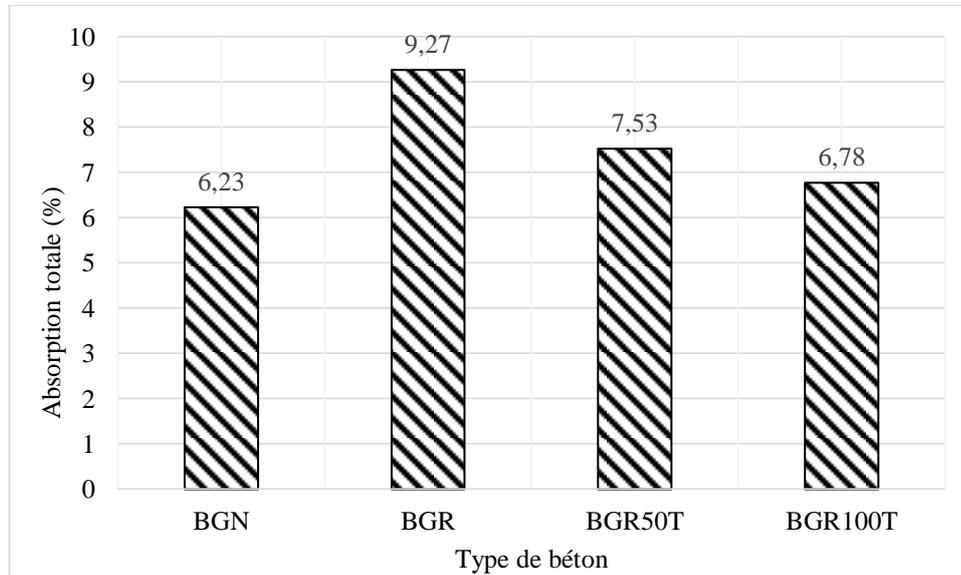


Figure IV. 4: Absorption totale des différents mélanges de BCR.

D'après les résultats obtenus dans cette étude, on peut remarquer que le taux d'absorption est grandement influencé par type d'agrégat.

On observe que le taux d'absorption d'eau croît avec l'augmentation du pourcentage des agrégats recyclés, selon une relation proportionnelle, le béton témoin (**BGN**) donne un taux d'absorption le plus faible de (**6,23%**) par rapport les autres types des bétons.

On observe, que l'effet des agrégats recyclé sur le béton utilisés; c'est un effet négatif. Le taux d'absorption du béton (**BGR**) 100% agrégats recyclé est supérieur par rapport les autres types des bétons; d'une valeur environ (**9.27%**), donc les agrégats recyclés augmente le taux d'absorption jusqu'à **33%**, cette valeur permet de voir un béton perméable avec porosité élevé, donc moins résistant aux agents agressif par rapport au béton témoin (**BGN**).

Selon des études précédentes faites sur l'absorption d'eau du béton recyclé est légèrement supérieure (**2 à 12%**) comparativement à un béton à base de granulat 100% naturel (**Gilpin et al., 2004; Khalaf et al., 2004**).

CHAPITRE IV

Le béton avec **100 %** agrégats recyclés et traité par la poudre de verre (**BGR100T**) (**6,78%**) donne taux d'absorption à 28 jours similaire à celui du béton témoin (**BGN**) (**6,23%**), Cette similarité à causer par le changement de 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 verre qui a une caractéristique d'absorption quasi nulle par l'intermédiaire de produit adhésif (MEDACURE) qui empêche l'absorption d'eau.

IV.4.5. Porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau est un essai physique qui révèle beaucoup sur la performance du béton du point de vue mécanique et de durabilité.

La figure IV.5 montre clairement que les agrégats recyclés affectent négativement la porosité du béton.

On observe que la porosité croît avec l'augmentation du pourcentage des agrégats recyclés, selon une relation proportionnelle, le béton témoin (**BGN**) donne une faible porosité (**15,09%**).

On observe, que l'effet des agrégats recyclé sur le béton utilisés; c'est un effet négatif. La porosité accessible du béton (**BGR**) 100% agrégats recyclé est supérieur par rapport les autres types des bétons; d'une valeur environ (**18,17%**), donc les agrégats recyclés augmente la porosité jusqu'à **17%** par rapport au béton témoin (**BGN**).

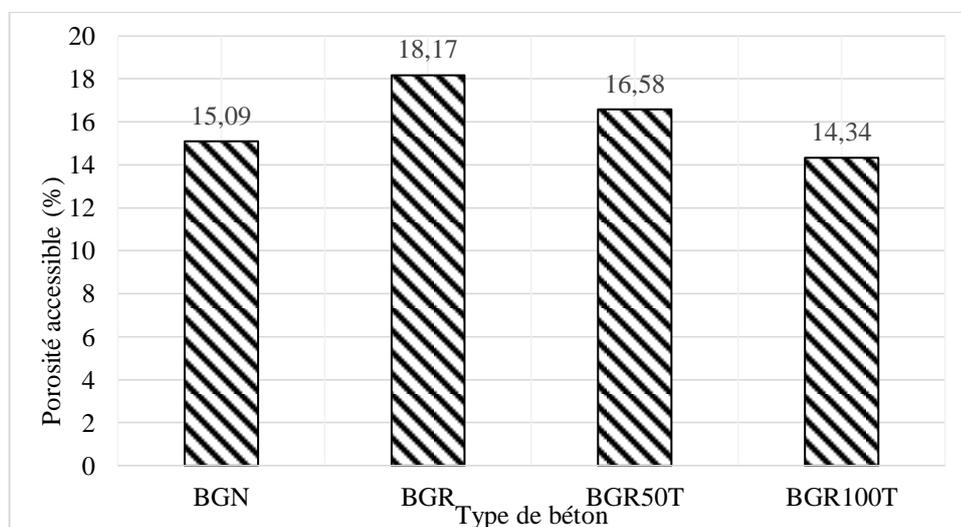


Figure IV. 5: Porosité accessible des différents mélanges de BCR.

CHAPITRE IV

Le béton avec **100 %** agrégats recyclés et traité par la poudre de verre (**BGR100T**) (**14,34%**) donne une porosité à 28 jours la plus faible par rapport aux autres types de bétons.

Cette amélioration est causée par la présence de la poudre de verre et le MEDACURE qui améliore la structure poreuse des bétons par le changement de l'état de la rugosité de la surface de granulats recyclés.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale :

Les objectifs visés dans ce mémoire sont -à notre avis- largement réalisés, nous considérons que le travail expérimental effectué dans le cadre de ce projet a touché la problématique posée au début.

Les résultats obtenus à travers l'étude de l'effet de traitement des agrégats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton compacté au rouleau (BCR) ; nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le taux substitution des agrégats recyclés influence négativement sur la résistance à la compression des bétons, cette diminution 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 procédé au traitement des granulats recyclés par lavage et aussi par collage de la poudre de verre en utilisant un adhésif (MEDACURE).
- Le béton avec 100% d'agrégats recyclés traités donne une valeur résistance à la compression, résistance à la traction par flexion proche au béton témoin.
- On constate l'effet de traitement avantageux sur la résistance à la compression, résistance à la traction par flexion est parfois comparable au béton témoin.
- Les résultats de l'absorption totale indiquent que le traitement des agrégats recyclés par la poudre de verre a un effet positif sur les BCR. La valeur d'absorption totale diminue proportionnellement avec l'augmentation de taux de remplacement des agrégats recyclé traité.
- Les résultats de la porosité montrent que le traitement des agrégats recyclés diminue la porosité.
- Le traitement des granulats recyclés par la poudre de verre et avec l'intermédiaire de MEDACURE a donné des résultats très encourageants.

Recommandations et perspectives :

Sur la base des résultats obtenus et conclusions tirées de cette étude; nous recommandons pour des futurs travaux de recherche futurs :

- étudier la perméabilité du BCR ;
- étudier le comportement à la fatigue du BCR ;

Conclusion générale et perspectives

- compléter l'analyse du comportement du BCR frais et durci sous l'effet des actions des hydrocarbures et des autres produits chimiques ;
- étudier l'influence des paramètres comme la compacité et la densité sur l'évolution des attaques des hydrocarbures et des produits chimiques.
- Enfin, une étude à long terme sur des routes en BCR à base des agrégats recyclés traités en pleins services est primordiale pour valider définitivement les performances de ce béton comme matériaux de pavages.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

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

A. Shayan, A. Xu, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research*. 34 (2004) 81–89. doi:10.1016/S0008-8846(03)00251-5.

A. Zidol, Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre, Sherbrooke (Québec) Canada, 2014.

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

Ajdkiewicz A, Kliszczewicz Alina «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/I-WC. *Cement Concrete Composites* » 2002; 24:269-279.

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

ASTM-C1176/C1176M-08 (2008). "Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C-1435-99 (1999). "Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C293 (2010). "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-C39/C39M-11a (2011). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

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

B. Topcu and M. Canbaz. Properties of Concrete containing waste glass. *Cement*

Baron J. et Olivier J. P., (1997), *Les Bétons: bases et données pour leur formulation*, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Eyrolles Paris, pp. 20-149.

Références bibliographiques

Belaïd M., (2004), Etude des Matériaux du Béton Compacté au Rouleau et du remblai dur, Annales de l'Équipement, Volume XIV, N° 02, Tunisie.

BENOUADAH Abdelatif, «Étude du comportement d'un béton compacté au rouleau armé de fibres. », thèse doctorat, 2019.

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

Chakradhara. R.M, Bhattacharyya. S and Barai. S, « Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete», in Materials and Structures. 2011, Springer Netherlands, p. 205-220.

Crentsil Sagoe KK, Brown T, Taylor AH «Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate». Cem Concr Res 2001; 31:707-12.

De Brito J. etAlves F. « Concrete with recycled aggregates», 2010 the Portuguese experimental research. RILEM.

De Juan M.S. and Gutiérrez P.A. «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate» 2009, Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 872-877.

Djerbi. A, Nguyen. T.D, and Ramanich. S, «Autogenous shrinkage of at very early Age: Effect of recycled aggregates», 3rd fib International Congress, 2010.

Douara. T.H, Benhoua. M, et Nezergui. B, « caractéristiques physique et chimiques des granulats recycle et granulats naturelle », SBEIDCO, 1st International Conference on Sustainable BuiltEnvironment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

Evangelista L., De Brito J: «Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites» 2010, 32, 9-14.

Gagné R., (2000), High-performance roller compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability, International symposium on engineering materials for sustainable development, Novembre 2000, Okayama, Japon, pp. 74-88.

Gagné R., (2004), Le Béton Compacté au Rouleau BCR, présentation PowerPoint, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.

Gagné R., (2004), Le Béton Compacté au Rouleau BCR, présentation PowerPoint, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.

Références bibliographiques

- GAGNÉ, R. (2000). "High-performance roller-compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability." International symposium on engineering materials for sustainable development, Okayama, Japon: 74-88.
- Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M., (2000), Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.
- Gonzalez-Fonteboa. B, Martinez-Abella. F, « Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties », *Building and Environment*, 43 (2008), 429–437.
- J. Marchand, R. G., E. Ouellet and S. Lepage (1997). " Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete-A Review." ACI Special Publication 171.
- Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes, Chaussée en béton de ciment, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France, pp. 29-47 et 112-133.
- Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes, Chaussée en béton de ciment, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France, pp. 29-47 et 112-133.
- Karimpour, A. (2010). "Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS)." *Construction and Building Materials* 24(11): 2079-2083.
- Katz A., «Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and concrete research*», 33 (5), pp. 703-711, 2003.
- Levy Salomon M, Paulo Helene « Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development». *Cem Concr Res* 2004; 34(11):175-80.
- M.Rakshvir, S.V.Barai, Studies on recycled aggregates-based concrete. *Waste Management & Research* 2006; 24 (3):225–233.
- Maafi. N, Zemmit. A, « L'effet des différents types d'agrégats sur le comportement mécanique d'un béton » PFE Master 2, 2013, département de génie civil, université de Bordj Bou Arreridj, Algérie.
- Mahmoud. S, «Classification of Recycled Sands and their Applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures», Thèse de doctorat, Université de Kassel, Allemagne, 2005.
- N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and Concrete Composites*. 30 (2008) 486–496. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001

Références bibliographiques

N. Schwarz, N. Neithalath, Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration, *Cement and Concrete Research*. 38 (2008) 429–436. doi:10.1016/j.cemconres.2007.12.001.

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.

Norbert Delatte, N. A., and Chris Storey (2003). "Improved Management of RCC Pavement Technology." The University of Alabama at Birmingham.

Oikonomou N.D. «Recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*» 27 (2), pp. 315-318, 2005.

Otsuki N, Miyazato S, Yodsudjai W. « Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete». *ASCE J Mater Civil Eng* 2003.

Pittman, D. W. (1989). "The Effects of the Construction Process on Selected Fresh and Hardened Properties of Roller-Compacted Concrete (RCC) Pavements." ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB.

Projet National BaCaRa 1988-1996, (1996), Le béton compacté au rouleau. Presse ENPC, Paris, pp. 17-25.

Québaud. M, « Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats », Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.

R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites*. 33 (2011) 19–29. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013.

R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials*. 24 (2009) 1309–1312. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030.

R.IDIR, Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, SHERBROOKE, 2011.

Rao. A, «Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur; 2005.

Site de l'American Concrete Pavement Association, <http://www.pavement.com>

Références bibliographiques

Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>

Smith T., Tighe S. et Fung R., (2001), Presentation of the Concrete Pavement Technology Advancements, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia.

Topcu BekirIlker, Guncan FuatNedim. «Using waste concrete as aggregate». Cem Concr Res 1995; 25(7):1385-90.

Topcu BI, Sengel S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cem Concr Res 2004; 34(8): 1307-12.