

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED EL-BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE Département de GENIE CIVIL



Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Civil – Spécialité : Matériaux

THÈME

Etude de l'influence des ajouts minéraux sur le comportement physico-mécanique des BCR a base des granulats recyclés

Présentée par :

BENSAADOUNE Abderrahim et BOULEFRAKH Fateh

Devant le jury composé de :

NOUI Ammar	Université de BBA	Président
KESSAL Oussama	Université de BBA	Rapporteur
LOUMACHI Lazher	Université de BBA	Examineur
BELKADI Ahmed Abderraouf	Université de BBA	Examineur

Promotion 2019/2020

Remerciement

Tous d'abord, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant, qui m'a permis de finir ce travail.

Merci, « DR. Oussama KESSAL » qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, ainsi que pour leurs soutiens tout au long de réalisation de ce projet.

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

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

Et tous mes amis de spécialités « Matériaux de construction ». Et tous mes enseignants du département de génie civil qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même à assurer une Formation aussi meilleure que possible.

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

Résumé

En raison du virus corona, qui a conduit à la fermeture de toutes les universités du pays, et faute de temps, nous avons remplacé la partie pratique par une modélisation de la résistance à la compression du BCR à utilisant la méthode de plan d'expérience par le logicielle JMP

L'objet de ce travail consiste à l'étude de l'effet des ajouts cimentaires et les granulats recyclés sur la résistance mécanique d'un béton routier, et vise à valoriser les déchets de béton sous forme de granulats 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%, 100%) avec différents dosages de ciment (CEM II 42.5 R) (110, 175, 250, 350 kg/m³)

L'étude menée sur un béton compacté au rouleau a montré que le dosage de ciment élevé conduit à une augmentation de la résistance à la compression faible

Les résultats obtenus montrent que le principal inconvénient lié à l'incorporation du granulats recyclés dans le BCR est la chute de la résistance à la compression.

Mots clés : béton compacté au rouleau, granulats recyclés, résistance à la compression,

Abstract

Due to the corona virus, which led to the closure of all universities in the country, and lack of time, we replaced the practical part with a modeling of the compressive strength of the BCR using the experimental design method. by JMP software. The object of this work is to study the effect of cement additions and recycled aggregates on the mechanical strength of road concrete, and aims to recover concrete waste in the form of aggregates in compacted concrete mixtures. by roller (BCR). The particles of recycled aggregate were added to the mixtures as a partial replacement for the total volume of gravel at different percentages (0%, 50%, 100%) with a deferred dosage of cement (CEM II 42.5 R) (110,175,250, 350 kg / m³).

The study carried out on roller compacted concrete has shown that the high cement dosage leads to an increase in low compressive strength.

The results obtained show that the main drawback associated with the incorporation of the recycled aggregate in the BCR is the drop in compressive strength

Keywords : roller compacted concrete, recycled aggregate, compressive strength, experimental design

ملخص

بسبب فيروس كورونا، الذي أدى إلى إغلاق جميع الجامعات في الدولة، وضيق الوقت ، قمنا باستبدال الجزء العملي بنمذجة قوة الضغط لـ BCR باستخدام طريقة التصميم التجريبية. بواسطة برنامج JMP الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير إضافات الأسمنت والركام المعاد تدويره على القوة الميكانيكية لخرسانة الطرق ، ويهدف إلى استعادة نفايات الخرسانة على شكل مجاميع في خلطات خرسانية مضغوطة. بواسطة الأسطوانة (BCR). تمت إضافة جزيئات الركام المعاد تدويره إلى المخاليط كبديل جزئي للحجم الكلي للحصى بنسب مختلفة (0% ، 50% ، 100%) مع جرعات مختلفة الأسمنت (CEM II 42.5 R) (110,175,175,250) و 350كلغ/م³).

أظهرت الدراسة التي أجريت على الخرسانة المضغوطة بالدلقة أن جرعة الأسمنت العالية تؤدي إلى زيادة مقاومة الضغط المنخفضة.

أظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن العيب الرئيسي المرتبط بدمج الركام المعاد تدويره في BCR هو انخفاض مقاومة الانضغاط.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة المضغوطة، الركام المعاد تدويره، قوة الضغط، التصميم التجريبي

Table des matières

Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص	VI
Table des matières.....	VII
Liste de figure	XII
Introduction générale	1
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 DEFINITION DU BCR.....	5
I.3.HISTORIQUE :	8
I.4 CONSTITUANTS	9
I.4.1 Les liants.....	9
I.4.2. Les granulats.....	10
I.4.3. Les additions.....	11
I.4.4 Eau de gâchage	11
I.4.5. LES ADJUVANTS :	12
I.5. CURE DU BCR.....	13
I.6. AVANTAGES DU BCR.....	14
I.7. INCONVENIENTS DU BCR	16
I.8. Différence entre une chaussée en BCR et une chaussée en bitume.....	17
I.9. DOMAINE D'UTILISATION DU BCR	18
I.9.1 Application du BCR pour les barrages	18
I.9.2 Le BCR en technique routière	20
I.10. LES PROCEDES DE REALISATIONS DU BCR.....	22
I.10.1. Préparation de l'infrastructure et de la fondation granulaire.....	22
I.11. COMPACTAGE DU BCR.....	26
I.11.1. Opérations.....	26

I.11.2. Équipements et séquence typique de compactage	26
I.12. CONTROLE DE QUALITE DANS L'EXECUTION DES CHAUSSEES EN BCR.....	28
I.13. FORMULATION DE BCR.....	29
I.13.1 Méthodes empiriques.....	30
I.13.1.1 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	30
I.13.1.2 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique.....	31
I.13.2 Méthode semi-empirique	33
I.13.3 Méthode théorique	34
I.14. Conclusion	34
II.1 INTRODUCTION.....	36
II.2 INTERET DU RECYCLAGE DANS LE GENIE CIVIL	36
II.3 SOURCES DE DECHETS UTELISES EN GENIE CIVIL	37
II .3.1 Déchets de construction et de démolition	37
II .3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie	37
II.4 CLASSIFICATION DES DECHETS DANS LE GENIE CIVIL	37
II.4.1 DÉCHETS INERTES	38
II.4.2 – DÉCHETS BANALS	38
II.4.3 – DÉCHETS DANGEREUX	39
II.5 Granulats recyclés de béton.....	39
II.5.1 Sources des granulats recyclés	40
II .5.2 Production	41
II .5.3 Les principales étapes de traitement.....	42
II.5.4 DESCRIPTION DU GRANULAT RECYCLE.....	42
II .5.5 LES TYPES DES GRANULATS RECYCLES	43
II.6 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT FRAIS	44
II.6.1 Ouvrabilité.....	44

II.6.2	La masse volumique et la teneur en air	44
II.7	PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT DURCI	44
II.7.1	Perméabilité.....	44
II.7.2	Porosité.....	45
II.7.3	Résistance à la compression	45
II.7.4	Résistance à la traction et à la flexion	45
II.7.5	Module d'élasticité	45
II.8	PROPRIETES LIEES A LA DURABILITE	46
II.8.1	Retrait et fluage	46
II.9	CONCLUSION	46
III.1.	Introduction.....	48
III.2.	MATERIAUX UTILISES	48
III.2.1	Le gravier	48
III.2.1.1	Analyse granulométrique par tamisage.....	48
III.2.1.2	La masse volumique	56
III.2.1.2.1	La masse volumique apparente	56
III.2.1.2.2	La masse volumique absolue	57
III.2.1.3	La porosité	58
III.2.1.4	La compacité	58
III.2.1.5	L'indice des vides	58
III.2.2	Caractéristiques du sable.....	59
III.2.2.1	Analyse granulométrique par tamisage.....	59
III.2.2.2	La masse volumique	62
III.2.2.2.1	Masse volumique apparente [NA EN 1097-6].....	62
III.2.2.2.2	La masse volumique absolue [NA EN 1097-6]	63
III.2.2.3	La porosité	63

III .2.2.4 La compacité	63
III.2.2.5 L'indice des vides	63
III .2.2.6 Module de finesse	64
III .2.2.7 Equivalent de sable [NA EN 933-8]	65
III.2.2.7.1 Equivalent de sable visuel.....	65
III.2.2.7.2 Equivalent de sable piston (E.S.P).....	66
III.2.3 Caractéristiques du ciment (Mâtine).....	66
III.2.3.1. Présentation du ciment CPJ	67
III.2.3.2. Domaines d'utilisation	67
III.2.3.3. Analyses et caractérisation.....	67
III.3 FORMULATION DU BCR.....	69
III.3.1. Introduction.....	69
III.3.2. Paramètres de formulation	69
III.3.2.1 FUSEAU GRANULOMETRIQUE.....	69
III.4. CONCLUSION :	70
IV.1 Introduction.....	72
IV.3. Modélisation statistique	72
IV.3.1. Modèle de la résistance à la compression à 7 jour :	72
✓ Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :.....	72
✓ L'analyse des effets :	73
✓ Modèle mathématique :	74
✓ Représentation graphique de surface de réponse :.....	74
IV.3.2. Modèle de la résistance à la compression à 28 jours :	75
✓ Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :.....	75
✓ Résumé de l'ajustement :	75
✓ Estimations des coefficients :	76
✓ Modèle mathématique :	76

✓ Représentation graphique de surface de réponse :.....	76
IV.3.3. Modèle de la résistance à la compression à 90 jours	77
✓ Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :.....	77
✓ Estimations des coefficients :	78
✓ Modèle mathématique :	79
✓ Représentation graphique de surface de réponse :.....	79
VI.4. Conclusion :	80
Conclusion générale.....	82

Liste des figures

Figure I. 1 Définition d'un béton compacté au rouleau	7
Figure I. 2 Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).	7
Figure I. 3 Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction	8
Figure I. 4 Cure du béton par arrosages ciblés (ACI).	13
Figure I. 5 Bâche de protection contre la pluie (ACI).	13
Figure I. 6 installation rapide.	15
Figure I. 7 Facilement transportable	16
Figure I. 8 Mise en place rapide.....	16
Figure I. 9 Papèterie DOMTAR - Aire d'entreposage du bois.	17
Figure I. 10 Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB (Saucier F& all, 1995).	18
Figure I. 11 Barrage du lac Robertson en BCR au Canada (ZDIRI M 2008).	19
Figure I. 12 Barrage de Béni Haroun Mila-Algérie	20
Figure I. 13 Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (ZDIRI M 2008).	21
Figure I. 14 Schéma d'une centrale mobile (Association Canadienne, 2001).....	24
Figure I. 15 Photographie d'une centrale mobile.....	25
Figure I. 16 Mode de Mise en place du BCR	25
Figure I. 17 Rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses	27
Figure I. 18 Changement de direction des rouleaux compacteurs tandems à cylindres métalliques lisses. (ANDERSSON & R. Swedish, 1987)	28
Figure I. 19 Diagramme des contraintes d'un système bicouche (Gauthier P & all, 2000).	28
Figure I. 20 Contrôle du compactage.....	29
Figure I. 21 Paramètres optimums d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).	31
Figure I. 22 Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).....	32
Figure I. 23 Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).	33
Figure II. 1. Représentation en chiffres des déchets (Ait Mohamed A 2017)	39
Figure II. 2: modèle du cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'Art (Quebaud M., courtial M et Buyle-Bodin f 1996)	40
Figure II. 3 Concasseur à marteaux	42

Figure II. 4 Concasseur à percussions.....	42
Figure II. 5 Schématisation d'un granulats recyclé (Ait Mohamed A 2017).	43
Figure II. 6 Différents types des granulats recyclés (Hannequart & E. Schamp 2010)	44
Figure III. 1 Tamiseuse.	48
Figure III. 2 Fraction du gravier après tamisât.	49
Figure III. 3 Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8).	50
Figure III. 4 Courbe granulométrique des granulats concassés (8/15).	51
Figure III. 5 Courbe granulométrique des granulats concassés (15/20).	52
Figure III. 6 Courbe granulométrique des granulats recyclé (3/8).....	54
Figure III. 7 Courbe granulométrique des granulats recyclé (8/15).....	55
Figure III. 8 Courbe granulométrique des granulats recyclé (15/20).....	56
Figure III. 9 courbe granulométrique du sable de dune (OUED SOUF).	61
Figure III. 10 Courbe granulométrique du sable concassé.	62
Figure III. 11 Courbe combinée des agrégats utilisés.....	70
Figure IV 1 : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 7 jour.	73
Figure IV 2 L'évolution de la résistance à la compression a 7jour en fonction de C (%) et GR (%).	74
Figure IV 3 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	75
Figure IV 4 . L'évolution de la résistance à la compression a 28 jours en fonction de C (%) et GR (%).....	77
Figure IV 5 . Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	78
Figure IV 6 L'évolution de la résistance à la compression a 90 jours en fonction de.	80

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Caractéristiques et avantages du BCR.....	14
Tableau I. 2 Caractéristiques de deux bétons compactés au rouleau	21
Tableau III. 1 Tamis utilisés pour le tamisage des graviers.....	49
Tableau III. 2 L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8)	50
Tableau III. 3 L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15).	51
Tableau III. 4 L'analyse granulométrique de gravier concassé (15/20).	52
Tableau III. 5 L'analyse granulométrique de gravier recyclé (3/8).	53
Tableau III. 6 L'analyse granulométrique de gravier recyclé (8/15).	54
Tableau III. 7 L'analyse granulométrique de gravier recyclé (15/20).	55
Tableau III. 8 la masse volumique apparente et la masse volumique absolue du gravier recyclé.....	58
Tableau III. 9 la masse volumique apparente et la masse volumique absolue du gravier concassé	58
Tableau III. 10 Porosité, compacité et l'indice de vide du gravier recyclé	59
Tableau III. 11 Porosité, compacité et l'indice de vide du gravier concassé	59
Tableau III. 12 Tamis utilisés pour le tamisage du sable.....	60
Tableau III. 13 Analyse granulométrique du sable de dune d'OUED SOUF.....	60
Tableau III. 14 Analyse granulométrique du sable concassé.....	61
Tableau III. 15 la masse volumique apparente et la masse volumique absolue pour les deux sables	63
Tableau III. 16 La porosité, la compacité et l'indice de vide pour les deux sables.....	64
Tableau III. 17 Modules de finesse du sable.....	64
Tableau III. 18 Modules de finesse pour les deux sables	65
Tableau III. 19 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.....	66
Tableau III. 20 Résultats d'essai d'équivalent de sable pour les deux sables.....	66
Tableau III. 21 Analyse chimique élémentaire du ciment portland composé (% massique).	67
Tableau III. 22 Compositions minéralogiques du ciment portland composé (% massique)	68

Tableau III. 23 Caractéristiques physiques du ciment utilise	68
Tableau III. 24 Caractéristique Chimiques Du ciment Utilise.....	68
Tableau III. 25 Resistance a la compression.....	68
Tableau III. 26 Les Propriétés Physiques	68
Tableau III. 27 Tamisât des différentes fractions d'agrégats.....	69
Figure IV. 1 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 7 jour.....	73
Figure IV. 2 L'évolution de la résistance à la compression a 7jour en fonction de C (%) et GR (%).	74
Figure IV. 3 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	75
Figure IV. 4 L'évolution de la résistance à la compression a 28 jours en fonction de C (%) et GR (%).	77
Figure IV. 5 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	78
Figure IV. 6 L'évolution de la résistance à la compression a 90 jours en fonction de C (%) et GR (%).	80

Introduction générale

Introduction générale

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

Le domaine des routes possède deux axes principaux : le premier étant la chaussée souple qui est la plus répandue dans le monde. Les couches de roulement en béton bitumineux (BB) présentent l'inconvénient de leur souplesse sous l'effet d'un fort trafic. D'un point de vue environnemental, leur dépendance à l'hydrocarbure pose des problèmes écologiques. Le second axe est la chaussée rigide, qui s'appuie sur des routes en béton. La principale différence structurelle entre ces deux techniques est la façon dont les charges de trafic sont transférées vers la plate-forme.

Le béton compacté au rouleau (BCR), pour pavage, est une technique de construction des routes. Ce type de béton permet d'avoir une bonne répartition des charges vers la couche de fondation. 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. Ces caractéristiques sont similaires à un sol à l'état frais. La réalisation de ce type de chaussée nécessite des engins de travaux publics comme ceux utilisés pour un béton bitumineux. En termes d'économie, ces bétons présentent un faible coût et une bonne durabilité. Ce béton peut aussi être utilisé pour la construction des aires d'entreposage, des aérodromes et des barrages.

L'utilisation de BCR est très répandue dans le monde (États-Unis, Canada, Japon et Allemagne), néanmoins, les chercheurs poursuivent leurs travaux afin d'améliorer les caractéristiques de ces bétons. Pour cela, plusieurs études sont menées pour améliorer la durabilité, les performances mécaniques et physiques des BCR

L'utilisation des ajouts minéraux dans les bétons, d'une façon générale, ont pour objet d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques de bétons. Grâce à ses finesse (ultrafines), les ajouts minéraux permettent de remplir les micro-vides dans le

Introduction générale

béton. L'utilisation des additions minérales dans Le BCR est faite généralement par le remplacement partiel du ciment. La recherche de la quantité idéale des additions minérales à incorporer constitue l'objet de ce mémoire

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

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

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

Cette étude comprend quatre chapitres :

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

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

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

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats de la modélisation de la résistance à la compression du BCR à utilisant la méthode de plan d'expérience par le logiciel JMP.

Introduction générale

Enfin, on termine ce travail par des conclusions générales et des Recommandations.

Chapitre I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LE BCR

I.1 INTRODUCTION

Un intérêt croissant pour les routes en béton compacté au rouleau se développe dans le monde entier, tant pour la réalisation des grands axes routiers et autoroutes que pour les voiries urbaines ou pour des applications plus modestes. Les principales raisons qui ont poussé à ce développement sont dues à la satisfaction qu'elles apportent aux usagers comme aux responsables des réseaux. La chaussée en BCR apporte à l'utilisateur un niveau de service élevé : adhérence par tous temps, absence d'ornièrage, visibilité due à une réflexion de la lumière. Le bilan économique à long terme est très favorable du fait de la longévité des chaussées en béton et de leurs entretiens réduits.

I.2 DEFINITION DU BCR

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

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

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

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

Dans l'approche sol, la démarche consiste à utiliser les principes de géotechnique. Le béton est compacté d'une façon similaire à celle utilisée pour le compactage des sols en laboratoire. Dans l'approche béton, les différents constituants du mélange peuvent être déterminés sur la base de leurs caractéristiques à l'état frais (consistance). Toutefois, la production de BCR selon l'approche béton génère généralement un mélange plus fluide que l'approche sol, mais les deux philosophies conduisent à produire un béton à affaissement nul.

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

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

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

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

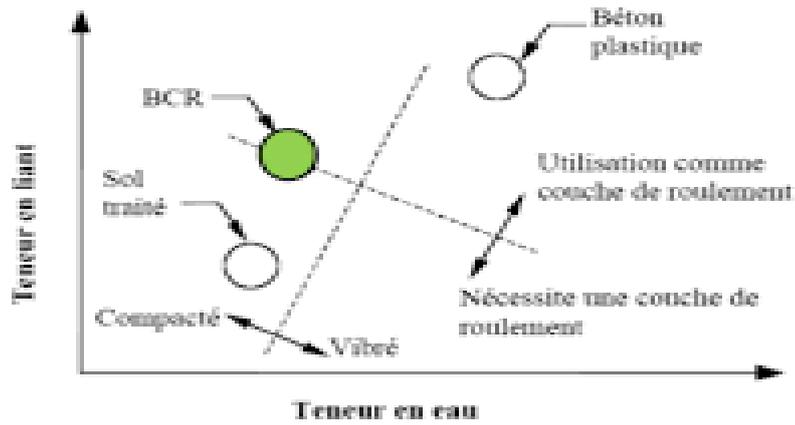


Figure I. 1 Définition d'un béton compacté au rouleau (Gauthier P& Marchand J, 2004).



Figure I. 2 Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).



Figure I. 3 Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction (Forbes 2007).

I.3.HISTORIQUE :

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

En 1942, l'US Army Corps of Engineers procéda à la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord. La première application au Canada eut lieu en 1976 avec la mise en place d'une aire d'entreposage de billes de bois de 25000 ml de surface sur l'île Vancouver en Colombie Britannique (ACDC 2001).

Après 1980, au moins dix autres pays (France, USA, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon) ont construit chacun plus de 10 000 m² de revêtement en BCR (Gauthier P& Marchand J, 2004).

Le premier projet d'importance a eu lieu en 1995 avec la construction d'un revêtement de 25000 m² à la fonderie Home de métallurgie pour l'entreprise des scories de laitier concassé (Québec). Il s'agissait d'un BCR à haute performance de 350 mm d'épaisseur avec une résistance en compression à 7 jours de 55 MPA et une résistance en flexion de 5 MPA.

En 1999, furent construites dans la ville de Montréal deux voiries urbaines en BCR : la rue Cabanel (trafic lourd) et la rue Molson (trafic léger).

En Afrique, le BCR reste, jusqu'à maintenant, une nouvelle technique et il ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages de Rmil en Tunisie, Koudiat Asserdoune en Algérie et Ain Al Koreima au Maroc, alors que l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée. Dernièrement, la construction d'une route en BCR a été réalisée en Algérie à la fin de l'année 2017. Ce projet réalisé par une société française consiste à relier la cimenterie de Lafarge Holcim M'sila, à la route Nationale RN60.

I.4 CONSTITUANTS

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

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

I.4.1 Les liants

Pour chaque béton, le ciment est un élément très important, car il procure la résistance mécanique qui est un facteur très important, donc plus la teneur en ciment est grande, plus la résistance mécanique augmente. Mais des recherches ont été -faites sur la quantité de la teneur en liant dans le béton et elles ont conclues qu'une quantité excessive de ciment peut nuire sérieusement à la durabilité du béton. En effet, la présence du ciment à une forte quantité peut

entraîner un surdosage en C3A. Ce composant réagit avec le gypse ce qui crée une ettringite expansive néfaste pour notre béton.

L'un des nombreux objectifs de cette étude est de déterminer le dosage optimal du ciment qui doit se tenir dans un intervalle précis pour des raisons économiques et de durabilité. Pour cela, le liant utilisé doit avoir des caractéristiques particulières telles que :

- Une faible chaleur d'hydratation.
- Une bonne résistance aux agents agressifs.
- Une quantité d'aluminate tricalcique C3A faible pour éviter les réactions nocives pour le béton.

I.4.2. Les granulats

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

Leurs influences à court et à long terme sont remarquables (Gauthier P& Marchand J, 2004).

Les granulats sont définis par la norme (NF P18-101) comme étant l'ensemble de grains minéraux, désignés par les termes fins, sables, gravillons ou cailloux et de dimensions comprises entre 0 et 125mm.

La forme et la texture des granulats influencent plus les propriétés du béton frais que celles du béton durci. Les particules plates et allongées ou à surface rugueuse demandent plus d'eau pour une maniabilité donnée que la particule sarrondies ou cubiques. Ainsi, de point de vue de compacité. Les particules de forme cubique et arrondie améliorent la compacité du BCR, comparativement à un granulat ayant une forte proportion de particules plates et allongées.

Le type de granulats et leur granulométrie influencent la qualité et les propriétés du béton compté au rouleau. Une bonne granulométrie permet de diminuer considérablement les vides de compactage et la ségrégation lors des opérations de mise en place. Pour limiter les problèmes de ségrégation et en vue d'une meilleure qualité de surface. La dimension maximale du granulat D doit être inférieure à 20 mm pour les ouvrages routiers. Le fuseau granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions (exemple : 0/3-3/8-8 /15-15/20). Par contre la taille maximale des granulats est d'environ 50 mm pour les ouvrages de masse. Cette taille augmente le risque de ségrégation, mais, permet de réduire la teneur en liant. Pour éviter les problèmes de ségrégation, on doit optimiser le plus possible la granulométrie de manière à obtenir un mélange de

compacité optimale. Par ailleurs, lors des opérations de mise en place, l'épaisseur des couches doit être trois fois plus élevée que la dimension des plus gros granulats (ZDIRI & all, 2005).

La fraction granulaire (0-5) joue un rôle important dans le remplissage de l'espace intergranulaire. La présence de cette fraction peut atteindre 45% dont elle améliore le compactage et par conséquent la compacité du mélange

Pour les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 0.08 mm, leur pourcentage varie entre 7 et 15 %. Ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, et donc une bonne compacité à l'état durci.

I.4.3. 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 J& et Olivier, 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 & Sauterey R, 1989)

Il existe quatre additions utilisables pour le BCR : Les additions calcaires, les cendres volantes, les laitiers vitrifiés moulu de haut fourneau et les fumées de silices.

I.4.4 Eau de gâchage

La quantité d'eau dans un mètre cube de BCR, sert d'abord pour l'hydratation du ciment et le mouillage des granulats. Elle permet au BCR d'avoir les qualités de plasticité et d'ouvrabilité, qui sont contrôlées, en général, par des essais et des mesures appropriées. Une partie de cette eau peut être absorbée par les granulats alors qu'un autre reste libre et ceci en fonction de leur porosité (NF EN 1008) (Gauthier P et al, 2000). La plage de variation de la teneur en eau, qui est le pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs, est comprise entre 4,5% et 6%. Ce dosage en eau, considéré relativement faible par rapport à celui du BC, permet d'obtenir un béton sec à un affaissement nul (Gauthier P et al, 2000). Alors que si on considère la teneur en eau efficace définie par la norme EN 206, cette

teneur représente la différence entre la quantité d'eau totale introduite dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée par les granulats.

On définit alors la quantité d'eau totale comme étant la quantité d'eau ajoutée, y compris l'eau déjà contenue dans les granulats, ainsi que la quantité d'eau mélangée avec les adjuvants (Belaïd M, 2004). D'autre part, la quantité optimale d'eau à employer permet d'obtenir des résistances maximales (Huang. Y. H, 2004). Expérimentalement, cette quantité d'eau est dosée en fonction du mode et des moyens de serrage disponible sans être influencée par les autres conditions telles que les moyens de transport, moyens de malaxage, etc.

I.4.5. LES ADJUVANTS :

Les adjuvants sont utilisés dans le but de faciliter la mise en œuvre des BCR, d'adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, de réduire les coûts de mise en œuvre, d'améliorer les propriétés du BCR durci voire même de lui conférer des propriétés nouvelles. Toutefois, dans le cas du BCR, la durée courte de malaxage et la faible quantité d'eau font qu'il y a une atténuation de l'effet des adjuvants, d'où une augmentation du dosage en Adjuvant par rapport au béton plastique afin d'accroître leur efficacité. Pas mal de précautions Doivent être prises pour leur utilisation. Il est même recommandé de réaliser des essais au laboratoire afin de déterminer le dosage optimal et de mesurer l'effet sur les propriétés du BCR frais et durci. Les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

. Les Adjuvants Retardateurs de Prise : ces adjuvants augmentent la durée de transport de mise en place du béton, permettent de maintenir longtemps la consistance recherchée du béton ou de ménager la contrainte des reprises de bétonnage.

. Les Adjuvants Réducteurs d'eau : Ils ont pour rôle, à consistance égale de réduire le dosage en eau et à dosage en eau constant d'augmenter l'affaissement au cône d'Abram. Ces adjuvants sont couramment employés dans la réalisation des BCR puisque permettant une amélioration de l'homogénéité de la pâte. Cependant, ces adjuvants employés à fort dosage peuvent avoir un effet retardateur de prise. L'utilisation de certains adjuvants dans un chantier de RCR n'est pas courante. Ces adjuvants sont les suivants :

Les Adjuvants Accélérateurs de Prise : L'accélérateur de prise a pour fonction Principale de diminuer les temps de début et fin de prise du ciment.

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

I.5. CURE DU BCR

En raison de la faible teneur en eau du BCR, une cure soignée s'impose, Immédiatement après le compactage. Afin d'éviter un délavage à la surface fraîchement compactée, l'eau ne doit être, au début, que finement vaporisée. La cure par aspersion d'eau doit durer au moins trois jours (ACI).



Figure I. 4 Cure du béton par arrosages ciblés (ACI).



Figure I. 5 Bâche de protection contre la pluie (ACI).

I.6. AVANTAGES DU BCR :

Il s'agit d'un revêtement en béton, donc d'un revêtement robuste et durable, même sous l'action de très lourdes charges dans des conditions défavorables. De plus, c'est un revêtement dont la mise en place s'exécute rapidement selon des techniques appropriées. La grande résistance de la chaussée en béton compacté au rouleau élimine les problèmes courants et coûteux tous ces avantages sont récapitulés dans **le tableau (I.1)**.

Tableau I. 1 Caractéristiques et avantages du BCR

Caractéristiques	Avantages
Forte résistance à la compression	Supporte les charges concentrées lourdes et l'impact de matériel minier, industriel et militaire lourd.
Forte résistance à la flexion	Supporte de lourdes charges répétées sans s'affaisser et répartit la charge sur la couche de forme aux endroits où celle-ci est moins ferme, ce qui réduit les frais d'entretien et les interruptions
Forte résistance au cisaillement	Élimine l'orniérage et les réparations qui s'ensuivent
Haute densité, Faible absorption	Garantit une excellente durabilité en dépit des gels dégelés et élimine les infiltrations à travers le revêtement
Faible teneur en eau, Faible rapport eau/ciment	Augmente la résistance, réduit la perméabilité et accroît la durabilité et la résistance aux attaques chimiques.
Ni armature d'acier Ni goujons	Accélère et simplifie la mise en place, réduit le coût et élimine le besoin de mesures destinées à limiter la corrosion de l'armature d'acier.

Emboîtement solidaire des granulats	Assure une forte résistance au cisaillement au niveau des joints et des fissures désordonnées, ce qui empêche les déplacements verticaux ou les cassures.
Ni coffrages Ni finition	Accélère les travaux, réduit le coût et la main-d'œuvre
Ni joints moulés Ni traits de scie	Accélère les travaux, réduit le coût. (On peut, pour une meilleure apparence, faire des traits de scie dans le revêtement.)
Surface rigide, Durable et claire	Résiste à l'abrasion, élimine la couche de roulement et réduit donc le coût. La clarté de la surface réduit les besoins d'éclairage dans les parcs de stationnement et aires de stockage.
Moins de travaux d'entretien	Des organisations indiquent dans ces rapports que les routes en BB nécessitent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contre, on ne commence à faire des travaux d'entretien pour les routes rigides qu'après 12 à 15 ans.



Figure I. 6 installation rapide.



Figure I. 7 Facilement transportable



Figure I. 8 Mise en place rapide

I.7. INCONVENIENTS DU BCR :

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

- ✓ La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être adaptés selon les différents types d'applications visées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique. La texture de la surface d'un revêtement est mesurée à l'aide de l'essai de tache de sable. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macro- texture de la surface (ASTM E 965). Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le tex-uromètre et la stéréoscopie (BaCaRa, 1996).
- ✓ L'uni d'une chaussée est exprimé par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a resté toujours un problème limitant relativement les applications du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage (BaCaRa, 1996).



Figure I. 9 Papèterie DOMTAR - Aire d'entreposage du bois.

I.8. Différence entre une chaussée en BCR et une chaussée en bitume

Les chaussées sont divisées traditionnellement en deux grandes catégories : les chaussées rigides et les chaussées souples. Cette subdivision permet de clarifier les idées sur la façon dont la chaussée réagit aux charges qui y sont appliquées et aux agressions des conditions ambiantes. Les spécialistes montrent qu'il y a une grande différence entre la chaussée en BCR et la chaussée en BB, la rigidité structurelle de la première est plus forte comparativement à

celle de la seconde. La principale différence entre ces deux types de chaussées, souple et rigide, réside dans la façon où le revêtement répartit la charge sur la couche de forme. Grâce à ces bonnes rigidités et raideur, le BCR tend à étaler la charge sur une grande surface de la couche de forme (**Figure I.10**). Par contre, le revêtement en BB se compose de matériaux plus souples et moins raides, il ne répartit pas la charge de la même façon qu'un revêtement rigide.

Pour atteindre les objectifs de répartition, il faut ainsi plus de couches de revêtement ou plus d'épaisseurs, pour former une hauteur propre à assurer un étalement optimal de la charge sur le sol support. En outre, selon Saucier et al (ERES Consultant, 1998) et d'après une étude du coût du cycle de vie faite en 1998 par ERES Consultants (Saucier F& all, 1995), la durée utile prévue de la chaussée souple en BB est de 17 ans, alors que celle de la chaussée rigide en BCR est de

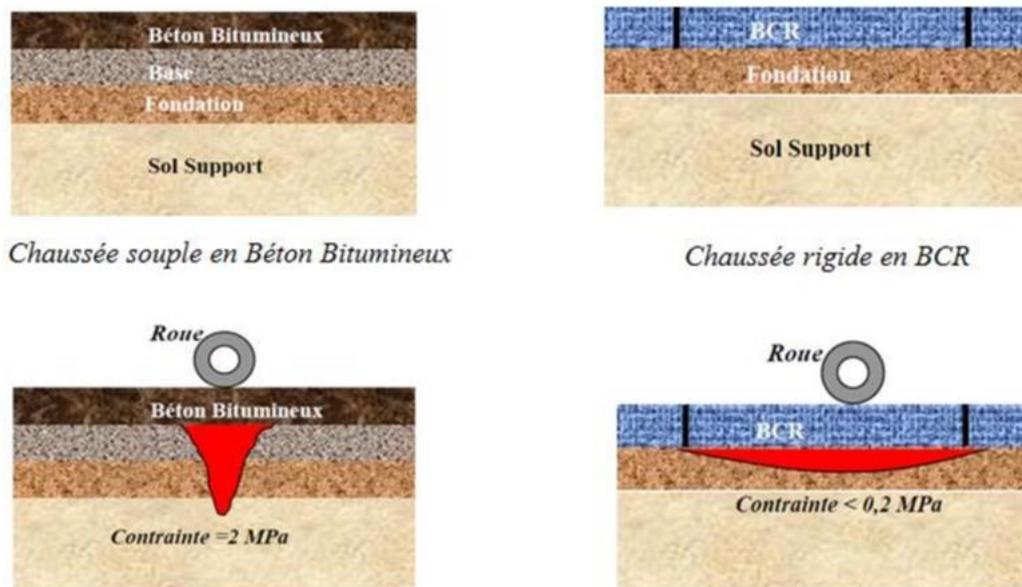


Figure I. 10 Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB (Saucier F& all, 1995).

I.9. DOMAINE D'UTILISATION DU BCR

Le béton compacté au rouleau est utilisé dans deux grands axes de construction, la construction des barrages et le revêtement des chaussées. Les nombreux avantages de ce béton l'ont rendu très populaire dans la construction des barrages et des routes. Cependant, une différence non négligeable entre ces deux applications existe. En effet, la nature des matériaux, leurs proportions et la mise en place du béton sont très différentes entre ces deux applications.

I.9.1 Application du BCR pour les barrages

Le béton compacté au rouleau est un béton très rapide à mettre en place et à mettre en service, pour cela, son utilisation pour les barrages parés bien utiles, de plus il permet de réaliser des pentes plus fortes par rapport à l'utilisation de terre et de digues de retenue. Le BCR en corps de barrages à une quantité de liant relativement faible par rapport au béton conventionnel. La dimension maximale des granulats des BCR destinés pour les barrages varie entre 60 à 150 mm. Les Résistances requises pour les projets en BCR en corps de barrages varient entre 7 à 20 MPa.

Au Canada, par contre, la construction de barrages en BCR est relativement plus développée dont on peut citer le barrage de Manouane. En outre, en Amérique du Nord, le plus grand barrage en BCR se trouve à Olivenhain, Californie (USA). Le plus haut barrage en BCR est le barrage Miel en Colombie de 617 m de hauteur, suivi par le barrage de Biobio au Chili de 503 mètres de hauteur. Tha Dan Canal Dam est le plus grand Barrage en BCR au monde d'une longueur de 2720 mètres et un volume de BCR de 5.470.000 m³. Le barrage de Beni Haroun en Algérie est considéré comme le plus grand barrage en Afrique avec 710 mètres de longueur et 120 mètres de hauteur (ZDIRI M 2008).

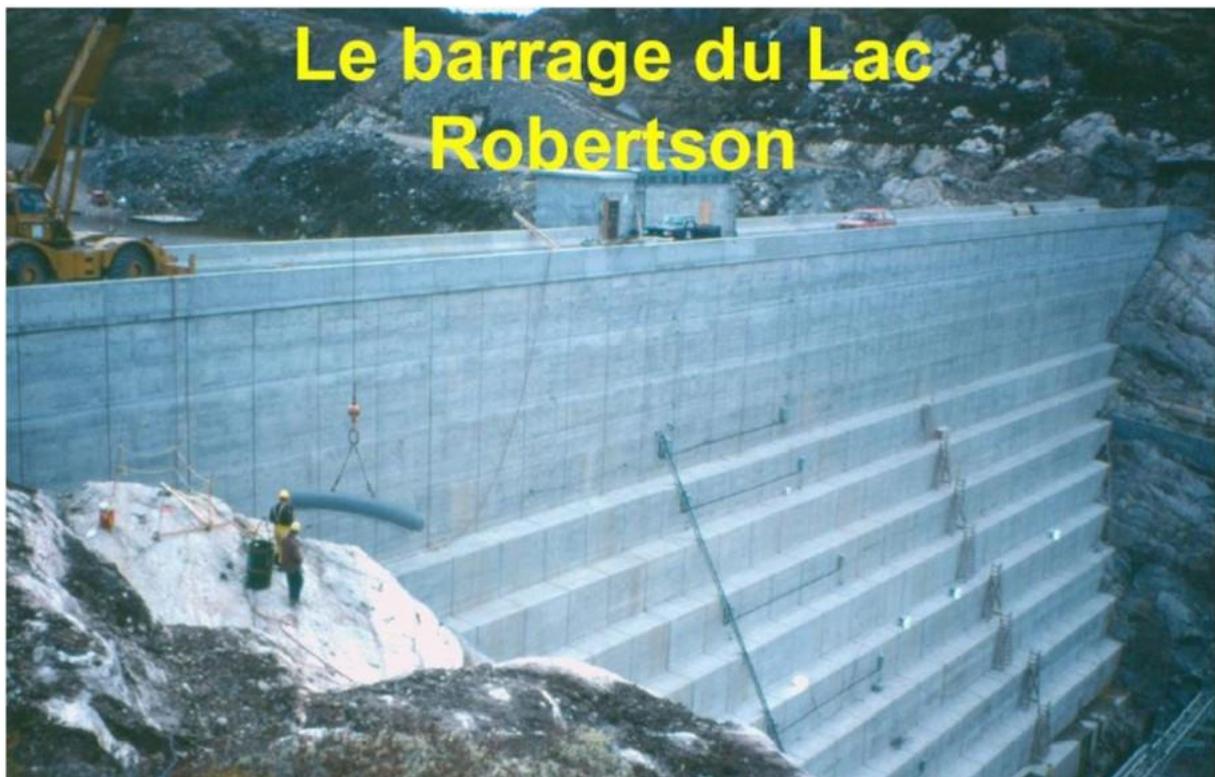


Figure I. 11 Barrage du lac Robertson en BCR au Canada (ZDIRI M 2008).

➤ **Barrage de Béni Haroun**

Le barrage de Béni Haroun est un grand complexe hydraulique stratégique en Algérie, situé dans la wilaya de Mila au nord-est de l'Algérie. Le barrage de 120 m de hauteur, est le plus important et le plus grand barrage en Algérie avec une capacité de 960 millions de mètres cubes. Le barrage proprement dit est constitué d'une digue renforcée de 1,5 million de m³ de béton roulé compact (BCR). Avec sa grande station de pompage d'eau brute, dont la puissance est de 180 MW, le barrage alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi, Batna et Khenchela. Le barrage fournit également une quantité importante d'eau d'irrigation pour quelques centaines d'hectares d'exploitations agricoles dans les régions voisines. En juin 2011, le barrage a atteint un niveau des plus élevés depuis le début de son remplissage graduel en 2005 en atteignant le volume de 851 millions de mètres cube. Au 12 février 2012, le barrage a atteint un pic historique jamais réalisé depuis sa mise en service à ce jour : 1 milliard de m³, dépassant ainsi de 40 millions m³ sa capacité théorique (960 millions m³).



Figure I. 12 Barrage de Béni Haroun Mila-Algérie

I.9.2 Le BCR en technique routière

Le BCR peut également être utilisé comme matériaux routiers. Ce type d'application nécessite une plus grande quantité de ciment et un rapport E/C plus faible que pour un barrage, car les sollicitations tant mécaniques (passage des véhicules) que thermiques (cycles de gel-dégel, présences de sels fondants) y sont plus importantes (Marchand J& all, 1997). De plus,

la teneur en particules fines de diamètre inférieur à 80 μm doit être assez élevée afin de faciliter la finition de la surface du béton.

Du point de vue de durabilité, le revêtement en BCR a montré de bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telles que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes (ERES 1998).



Figure I. 13 Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (ZDIRI M 2008).

Le tableau (I.2) présente deux mélanges typiques de béton compacté au rouleau dont l'un est utilisé pour la construction des routes et le second pour les barrages

Tableau I. 2 Caractéristiques de deux bétons compactés au rouleau

Caractéristiques du béton	Routes	Barrages
---------------------------	--------	----------

Liant (Kg/m ³)	250-350	70-250
Adjuvant (% quantité totale de liant)	0-20	0-70
Rapport eau/ciment	0,3-0,4	0,4-0,8
Taille maximale des granulats (mm)	20	50

On emploie, dans la construction de barrages en BCR, les mêmes techniques de réalisation utilisées pour les remblais en terre comme c'est montré sur les Figures....

I.10. LES PROCEDES DE REALISATIONS DU BCR

Les techniques de mise en œuvre des pavages en BCR, d'après Gauthier et al. (Gauthier P&all, 2000), 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, bien adaptés à la mise en place du BCR. Certaines précautions doivent cependant être prises.

De plus, des équipements à haut pouvoir de compactage sont parfois requis pour des applications particulières. La mise en œuvre d'un revêtement en BCR comprend les étapes suivantes : préparation de l'infrastructure et de la fondation, production du BCR, transport, mise en place et compactage, réalisation des joints et mûrissement. De la production du BCR à sa Mise en place, toutes les précautions doivent être prises afin d'éviter (ou à tout le moins réduire) la ségrégation du matériau et sa perte d'humidité. Un plan de mise en œuvre du BCR doit être réalisé avant le début des travaux de construction d'un revêtement. Ce plan doit définir la séquence de mise en place du béton (direction des équipements de mise en place, longueur et largeur des bandes), l'emplacement des joints de construction, l'emplacement de la centrale mobile. Ce plan de pose permet d'assurer une mise en place continue, de respecter les délais de mise en œuvre et de minimiser les joints froids (ZDIRI, 2008).

I.10.1. Préparation de l'infrastructure et de la fondation granulaire

La préparation de l'infrastructure et de la fondation granulaire pour un revêtement en BCR répond aux mêmes exigences que pour un revêtement en béton plastique. La capacité de support de l'infrastructure et de la fondation doit être suffisante pour permettre le compactage adéquat de toute la couche de BCR mise en place. Il est important d'assurer le drainage de l'infrastructure et de la fondation granulaire. La fondation granulaire doit être compactée afin d'obtenir 95 % et plus de la masse volumique optimale de l'essai Proctor modifié (OPM)

déterminée conformément à la norme CAN/BNQ 2501-255. Le BCR est très sensible à l'humidité de la surface de la fondation granulaire. La partie inférieure du revêtement en BCR est la zone la plus sollicitée par les charges, c'est-à-dire que les contraintes de flexion y sont les plus élevées. Un apport d'eau provenant de la fondation dans cette partie critique du revêtement augmentera localement le rapport eau/liant et diminuera ainsi la résistance mécanique du BCR. Les zones d'humidité excessives doivent donc être excavées et remplacées par du nouveau matériau granulaire (ZDIRI, 2008).

I.10.2. Fabrication du BCR

Le malaxage du BCR nécessite une énergie suffisante pour assurer une dispersion efficace de la faible quantité d'eau de gâchage et du ciment dans le mélange. Le système de malaxage doit permettre de produire un mélange homogène et uniforme. L'unité de production doit être fiable de manière à éviter les arrêts (augmentation des coûts de production) et doit posséder un système de dosage des constituants précis. Le débit du malaxeur doit être suffisant afin d'assurer une mise en place continue (Gauthier P & Marchand, 2004). Le BCR est produit en centrale fixe ou par une centrale mobile. Le choix du type de centrale de production dépend des Caractéristiques du projet, c'est-à-dire de la proximité et de la disponibilité des unités de production, de la quantité de béton à mettre en place et du budget à investir.

Deux types de centrales existent :

- ✓ Les centrales fixes ;
- ✓ Les centrales mobiles

Ce type de centrale présente deux bascules : une pour les granulats et l'autre pour le ciment. Les bascules servent essentiellement à peser les quantités élémentaires de matériaux. Le malaxeur apporte l'eau nécessaire à la fabrication du béton. Il y a d'abord le pré-malaxage à sec ; on ajoute l'eau au dernier moment. Pendant cette phase, on prépare déjà la gâchée suivante. La fabrication marche en discontinu. Afin d'éviter toute ségrégation et pour une meilleure homogénéité du mélange, plusieurs précautions doivent être prises :

- ✓ Il faut réduire le volume des gâchées à environ 50% de la capacité maximale du malaxeur.
- ✓ Le temps de malaxage pour béton plastique est prolongé dans le cas du BCR soit de l'ordre de 3 minutes par gâchée.
- ✓ La hauteur de chute du béton frais doit être réduite au minimum lors du chargement des camions à bennes basculantes.

- ✓ Il faut procéder au nettoyage du malaxeur à tous les 100 m³ durant la production et à la fin de chaque journée de production.
- ✓ Centrales mobiles

De nombreux projets de construction de revêtement en BCR de moyenne et de grande envergure ont été réalisés ces dernières années au Québec à l'aide de centrales mobiles. Un schéma et une photographie d'une centrale mobile sont présentés aux **figures I.14.I.15**, respectivement. La production en continu est assurée par un approvisionnement constant en matières premières. Les matériaux granulaires sont mis en piles, directement sur le site, en prenant soin d'éviter la ségrégation. Les trémies les contenant sont constamment alimentées à l'aide de chargeurs sur roues en évitant leur contamination. Ils sont ensuite acheminés au malaxeur par un convoyeur. Le ciment est dosé à partir de sa trémie et incorporé directement dans le malaxeur sur le convoyeur à granulats juste avant l'entrée du malaxeur. L'eau de gâchage et les adjuvants sont introduits par un système de gicleurs sur les matériaux secs à l'entrée du malaxeur. Le malaxage est à son tour assuré par deux arbres d'agitation en parallèle. Ce type de centrale présente plusieurs avantages parmi lesquels la rapidité de mobilisation et démobilisation, la réduction du temps de transport du béton, la productivité élevée et l'efficacité de son système de malaxage. (Association Canadienne, 2001)

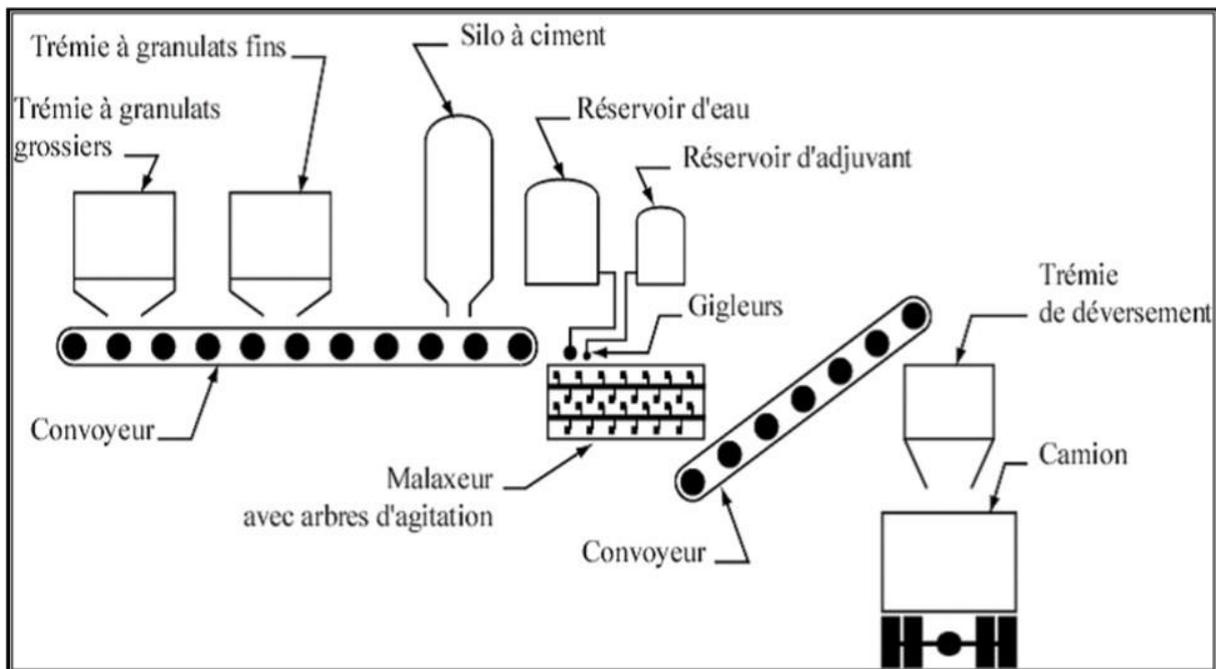


Figure I. 14 Schéma d'une centrale mobile (Association Canadienne, 2001)



Figure I. 15 Photographie d'une centrale mobile



Figure I. 16 Mode de Mise en place du BCR

I.11. COMPACTAGE DU BCR

Le compactage est l'étape la plus importante du procédé car il permet d'obtenir la densité et la résistance du revêtement, ainsi que son égalité et sa texture superficielle. Il commence dès la mise en place et se poursuit jusqu'à ce que le revêtement ait la densité recherchée. Toutes les propriétés du BCR à l'état durci, notamment la résistance en compression et celle en flexion, sont étroitement liées au degré de compactage. Ces propriétés du BCR déterminent sa capacité à résister aux charges puisque le béton est moins résistant en traction qu'en compression. En effet, si le compactage est insuffisant, il subsistera des vides entre les granulats, qui agissent comme des points de faiblesse et provoqueront une diminution de la résistance en compression. Généralement, le degré minimal de compactage à respecter est de 97 % de l'optimum Proctor modifié (S.E.M).

I.11.1. Opérations

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

Le compactage des bords est aussi une question délicate. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les épauler avec des matériaux stables placés à l'avance, comme par exemple les bordures en zone urbaine ; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produisent. Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale.

I.11.2. Équipements et séquence typique de compactage

Le compactage doit être effectué au moyen de rouleaux vibreur autopropulsés. Les rouleaux vibreurs doivent être en nombre suffisant pour compacter le béton au taux de 1,5

fois la capacité nominale de production du malaxeur à béton. Au moins deux rouleaux vibrateurs doivent être en opération de compactage. Les vibrateurs doivent être munis de deux tonneaux en acier lisse dont le diamètre est de 1,3 à 1,4 et de 1,7 m de largeur. Chaque rouleau vibrateur doit avoir une masse totale supérieure à 9500 kg.



Figure I. 17 Rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses

Le béton doit être compacté jusqu'à ce que la densité en place atteigne 100 % de la densité optimale abstenue par l'essai Proctor. la densité en place sera jugée acceptable si la moyenne de toutes les mesures est supérieure à 99 % et si aucune n'est inférieure à 97 % modifiée. Généralement, Lorsque les rouleaux vibrateurs opèrent en mode dynamique, l'arrêt des vibrateurs doit obligatoirement être à plus de 2 mètres avant l'immobilisation de l'appareil.

Procédure a comme objectif d'éviter la formation de dépressions à la surface du béton compacté au rouleau tandis que les Changements de direction des rouleaux compacteurs tandem à cylindres métalliques lisses doivent être réalisés loin des finisseurs et sur du BCR frais déjà compacté comme montré à **la figure (I.19)** (ANDERSSON & R Swedish , 1987).

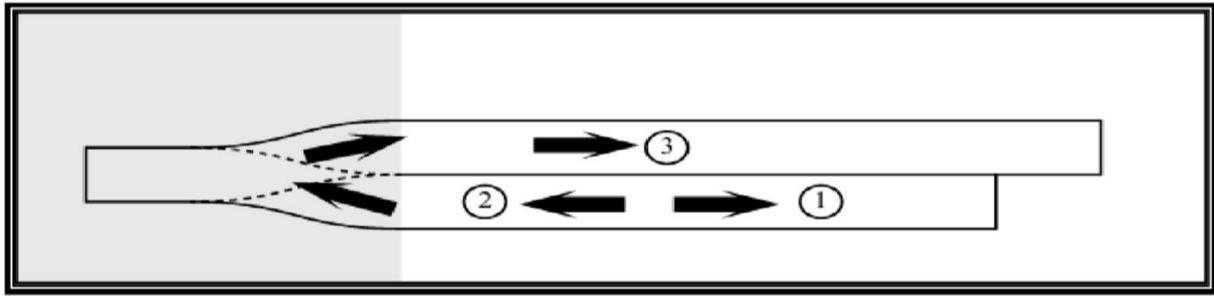


Figure I. 18 Changement de direction des rouleaux compactionnaires tandems à cylindres métalliques lisses. (ANDERSSON & R. Swedish, 1987)

Les opérations de compactage doivent être effectuées sur l'ensemble de la surface de béton compacté au rouleau et doivent débuter près des bordures et progresser vers le centre de la dalle selon les indications présentées aux figures de la section 6.6 techniques de construction. Dans la section en pente, le compactage doit être débuté côté inférieur. En tout temps, la vitesse maximale de rouleau ne doit pas dépasser 2,5 km/h. Les passes consécutives de rouleau vibrateur doivent se chevaucher sur une distance minimale de 0,5 m pour assurer une bonne consolidation des bandes adjacentes du béton compacté au rouleau.

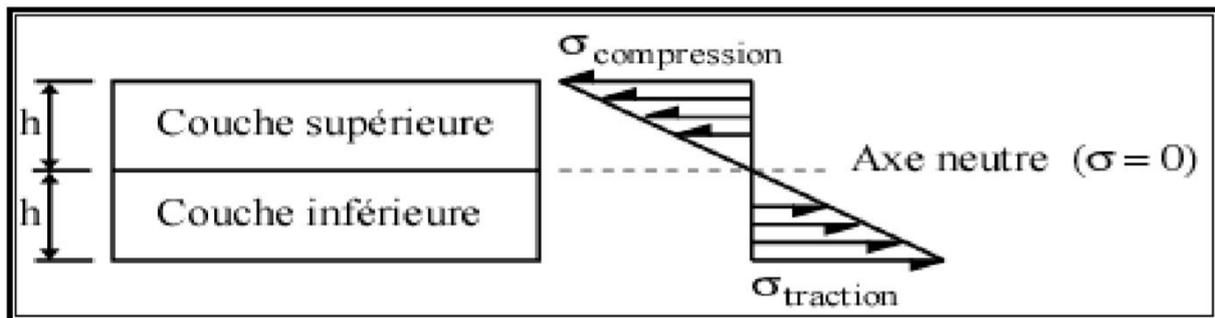


Figure I. 19 Diagramme des contraintes d'un système bicouche (Gauthier P & all, 2000).

I.12. CONTROLE DE QUALITE DANS L'EXECUTION DES CHAUSSEES EN BCR

Le processus de contrôle de la qualité exige un bon contrôle du compactage sur chantier. En effet un compactage insuffisant (< 97%) influe négativement sur les caractéristiques du BCR durci. Le contrôle de la compacité in situ est réalisé généralement par un Nucléo-densimètre appelé aussi appareil Troxler (**Figure I.20**)



Figure I. 20 Contrôle du compactage

I.13. 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.

I.13.1 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.13.1.1 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).

La première étape comporte la réalisation de plusieurs gâchées d'essais de mélanges de mortier avec différent rapport eau/ciment et différents rapport sable/ciment pour déterminer le volume de pâte minimum. La masse volumique est mesurée pour chaque mélange. **La figure I.21** 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 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).

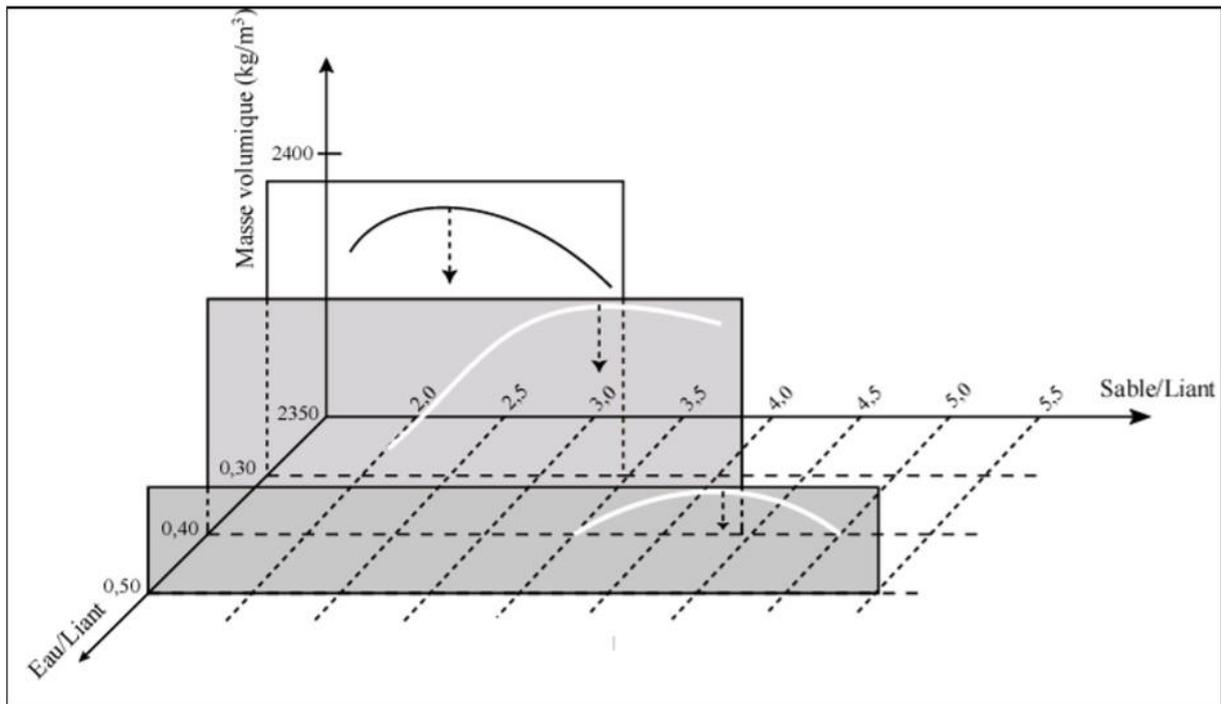


Figure I. 21 Paramètres optimaux d'un mortier pour BCR (J. Marchand 1997).

I.13.1.2 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 granulat fin par rapport au granulat grossier à l'aide d'un fuseau granulaire présenté dans la figure I.22. En deuxième lieu, plusieurs gâchés de béton avec différentes 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 – Method D. (ASTM-D155707 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.23**, 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 différente teneur 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).

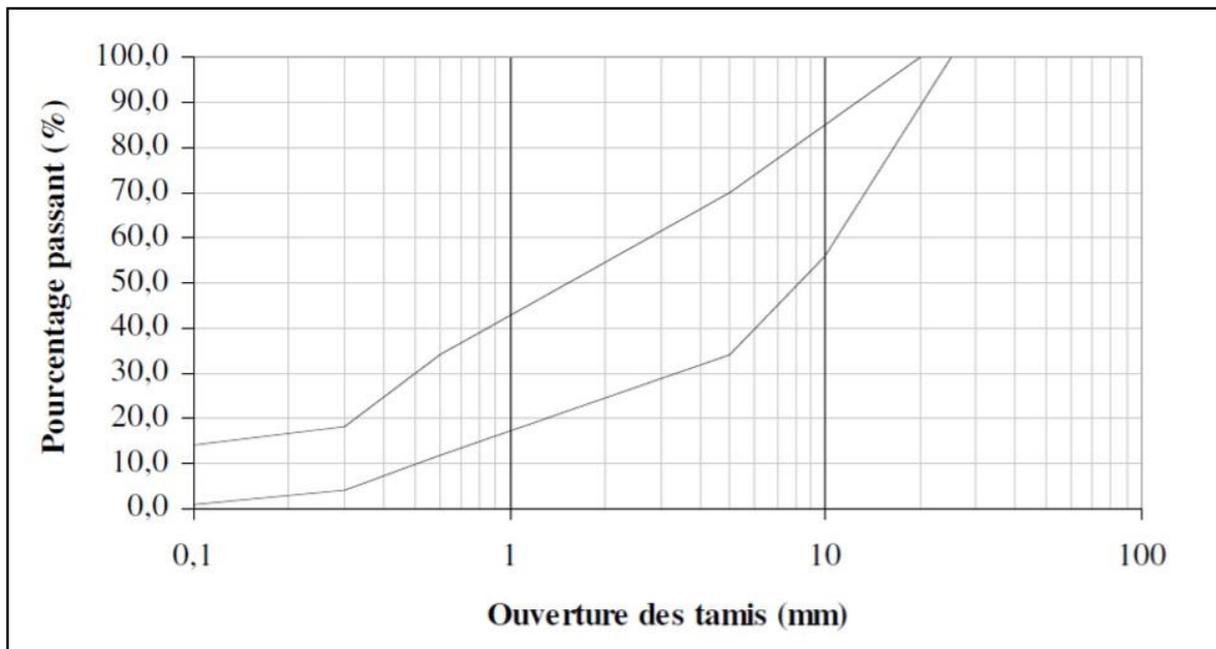


Figure I. 22 Fuseaux granulométriques pour un BCR (J. Marchand 1997).

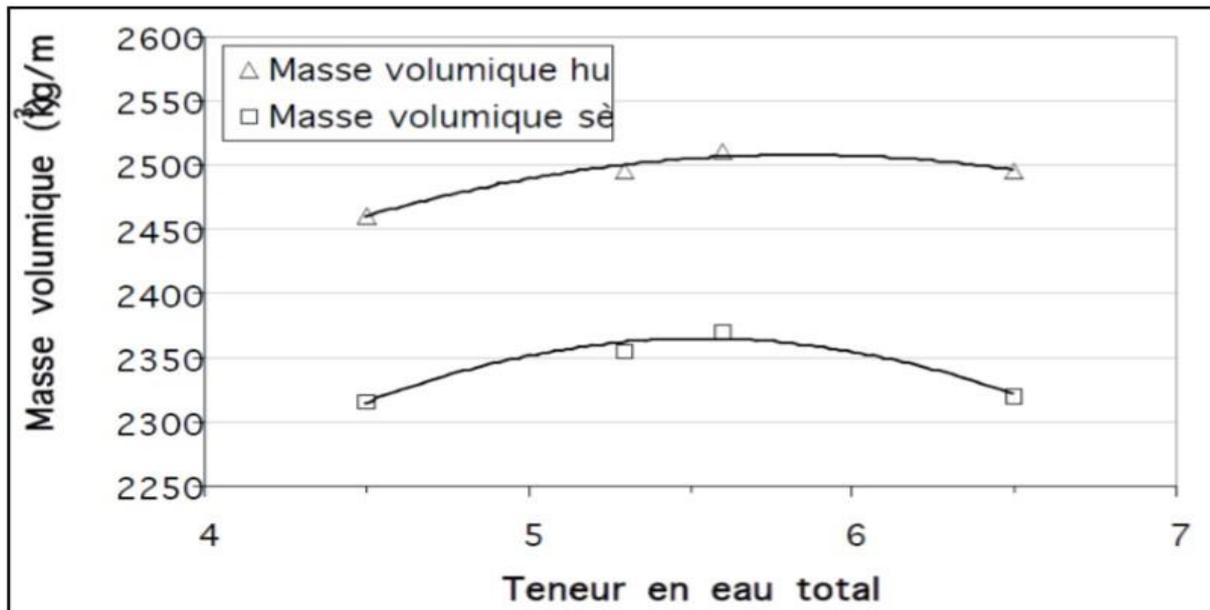


Figure I. 23 Relations typiques entre la masse volumique et la teneur en eau de mélanges de BCR (J. Marchand 1997).

I.13.2 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 intergranulaires restant après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale.

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.13.3 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.

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.14. Conclusion

Dans ce chapitre on a procédé à une recherche sur le BCR concernant leur définition, historique, applications, avantages, mise en œuvre ainsi que leur formulation. Les études réalisées sur la technologie du BCR et notamment sur les différents constituants de ce matériau cherchent à définir un mélange répondant aux performances recherchées.

Chapitre II :

GENERALITE SUR LES

GRANULATS RECYCLES

II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les granulats recyclés ainsi que certaines propriétés avec un aperçu de recherches précédentes. Ensuite, différentes techniques d'améliorations des granulats recyclés sont listées et exposées. Pour finir, certaines propriétés des bétons et mortiers sont expliquées et des résultats de précédentes recherches sur les mortiers à base de granulats de béton recyclé sont présentes.

II.2 INTERET DU RECYCLAGE DANS LE GENIE CIVIL

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

En France, le secteur de la démolition produit annuellement **20 à 25 millions** de tonnes de gravats (GDCBFNB, 1994). Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de **10 à 15 millions** de tonnes (GDCBFNB, 1994). En 2001, la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de **5 millions** de tonnes (UNPG, 2001).

Face aux **400 millions** de tonnes de granulats naturels produits en 2001 (GDCBFNB, 1994), le granulats recyclé de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels.

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

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

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

- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

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

- Pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO2 attribuée au transport de granulats ;

- Le béton concassé est susceptible de piéger le CO2 en se carbonatant (Thai-Hoa V 2009).

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

II.3 SOURCES DE DECHETS UTILISES EN GENIE CIVIL

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

II .3.1 Déchets de construction et de démolition

Sont lourds et volumineux, généralement classés parmi les déchets industriels. Produisent dans la construction tel que : béton, briques, pierre de taille, bois...etc., ces tas sont plus ou moins composite suivant la nature et l'âge des ouvrages (Barkat A 2006).

II .3.2 Déchets de sous-produits de l'industrie

L'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles. Parmi les sous-produits utilisés tel que (les laitiers de haut fourneau, cendre volante, terre cuite...etc.) (Barkat A ,2006).

II.4 CLASSIFICATION DES DECHETS DANS LE GENIE CIVIL

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

II.4.1 DÉCHETS INERTES

Les déchets inertes sont les déchets les plus stables. En cas de stockage en décharge, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement (Barkat A 2006).

Ces sont donc des matériaux, sans caractère polluant, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils sont constitués presque intégralement de minéraux tels que silicates, carbonates ou aluminates ; leur contenu en métaux lourds ou autres polluants est très (Barkat A 2006).

Selon l'article n°3 de la loi Algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001, déchets inertes : " tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et/ou à l'environnement "(Barkat A 2006). Il s'agit donc :

- Des résidus minéraux provenant des industries d'extraction et des industries de fabrication de matériaux de construction (Barkat A 2006),
- Des déchets provenant des activités de construction, de réhabilitation (rénovation) et de démolition liée au secteur du bâtiment, ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux...) en mélange ne contenant pas de substance dangereuse et ne contenant que des déchets presque minéraux (Barkat A 2006). Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve :
 - Béton,
 - Briques,
 - Parpaings,
 - Tuiles et céramiques,
 - Terres et granulats non pollués et sans mélange (Barkat A 2006).

II.4.2 – DÉCHETS BANALS

Les déchets banals ou les déchets industriels banals (DIB) sont non inertes et non dangereux générés par les activités, publiques ou privées, du commerce, de l'artisanat, de l'industrie ou du

service. Ce sont des déchets qui ne présentent pas de danger particulier vis-à-vis des personnes ou de l'environnement et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les ordures ménagères. Il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois d'ouvrage, des métaux, etc. (Barkat A 2006).

II.4.3 – DÉCHETS DANGEREUX

Les déchets dangereux ou les déchets industriels spéciaux (DIS) sont des déchets qui présentent un caractère polluant ou toxique et nécessitent d'être éliminés dans une filière spécifique. En citant par exemple : pots de peinture, tubes de colle, certains déchets d'amiante, néons, etc. (Barkat A 2006).

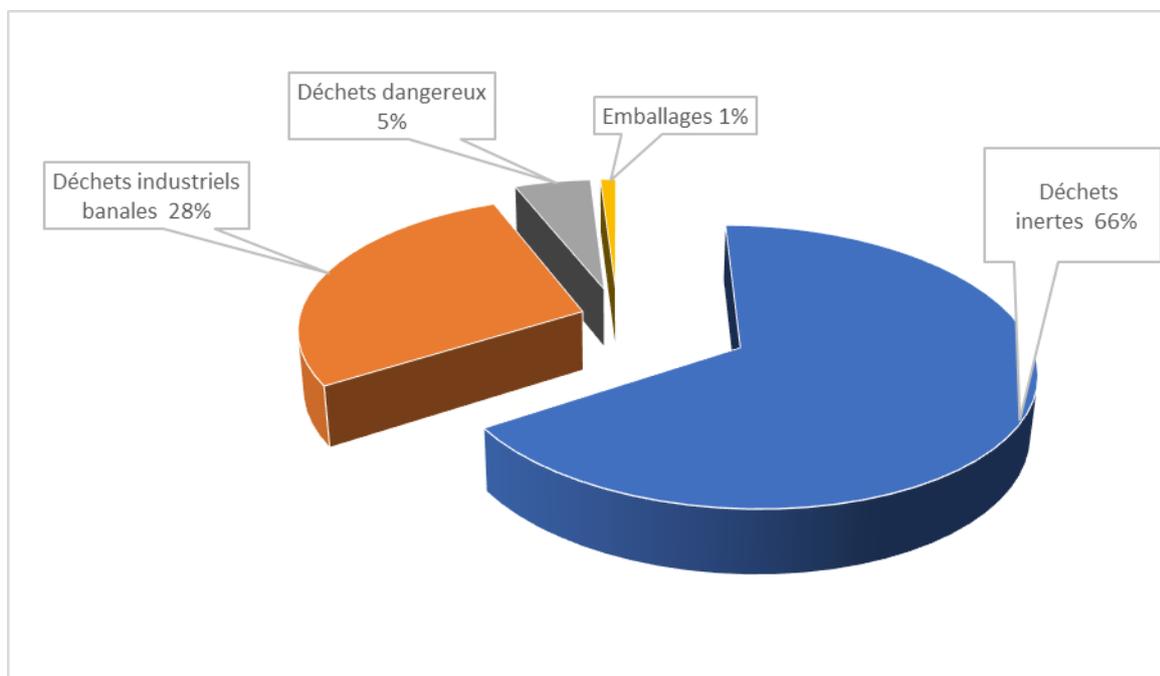


Figure II. 1. Représentation en chiffres des déchets (Ait Mohamed A 2017)

II.5 Granulats recyclés de béton

Les granulats recyclés sont utilisés pour des raisons environnementales. En effet, afin de contribuer aux différents problèmes de stockage des déchets ainsi qu'à la réduction de la pollution de l'environnement, il importe de valoriser les granulats recyclés. Leur utilisation permet de pallier au manque de granulats naturels et de contribuer au prolongement de la durée d'exploitation des carrières existantes.

II.5.1 Sources des granulats recyclés

Les déchets inertes de l'industrie du béton sont principalement composés de produits défectueux ou cassés, ainsi que de déchets de bétons ou granulats issus des opérations de manutention et de nettoyage. La production des déchets C&D dépend du degré de développement urbain et de l'ancienneté du cadre bâti et des infrastructures.

En Europe, on estime que la durée de vie moyenne d'une habitation est de cinquante ans ; les bâtiments industriels et les ouvrages d'art ont une durée de vie supérieure (Quebaud M., courtial M et Buyle-Bodin f 1996).

La figure II.2 illustre le cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art :

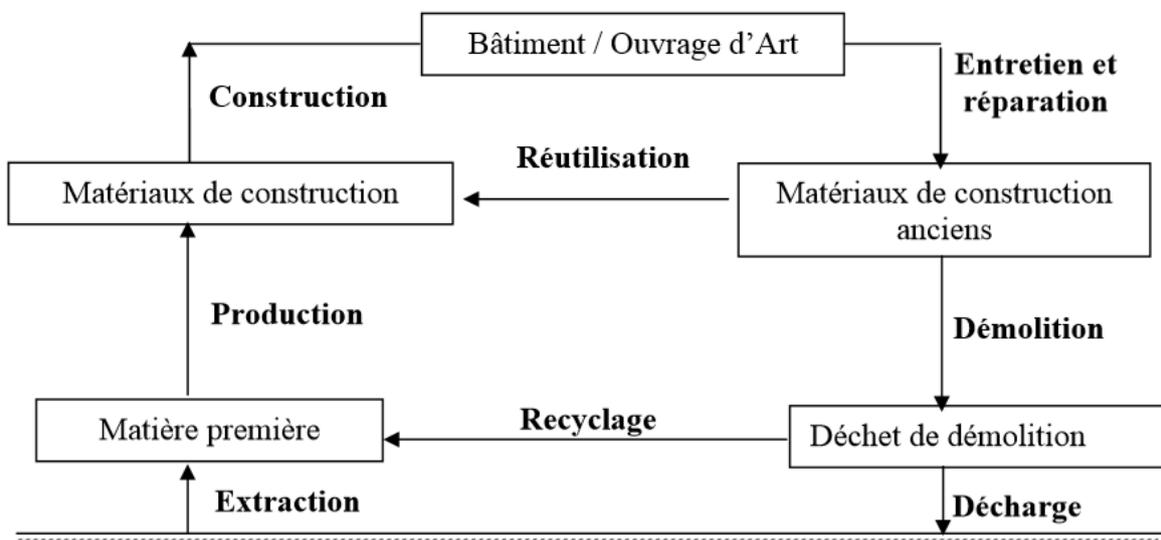


Figure II. 2: modèle du cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'Art (Quebaud M., courtial M et Buyle-Bodin f 1996)

La composition des produits de démolition varie selon la nature des ouvrages démolis (bâtiment industriel, bâtiment résidentiel, ouvrage d'art, etc.) et leur date de construction.

Ainsi une construction du XIX^{ème} siècle repose sur un gros œuvre en pierre, en brique et en métal tandis qu'une construction de la deuxième moitié du XX^e siècle est principalement en béton.

Dans le passé, la quasi-totalité des déchets de démolition provenait de bâtiments industriels. Actuellement, le rapport entre les bâtiments industriels et les bâtiments résidentiels démolis est de 5/1 (Quebaud M., courtial M et Buyle-Bodin f 1996). Dans l'avenir, les déchets de démolition seront composés de plus en plus de substances légères et de matériaux composites.

En général, les matériels de traitement des déchets de démolition ne diffèrent pas trop des matériels de concassage utilisés pour la production d'agrégats naturels. Ils comportent divers types de concasseurs, écrans, équipement de transfert et dispositifs pour l'enlèvement de matière étrangère. La première génération comportait deux systèmes : un ouvert et l'autre fermé, les deux systèmes sont généralement dans la réhabilitation de chaussées et projets de recyclage.

II .5.2 Production

Les installations de recyclage en Europe sont nombreuses. Il en existe 220 en Allemagne, 120 au Royaume-Uni, 70 aux Pays-Bas, 50 en France, 43 en Italie, 20 au Danemark et 90 en Belgique. (Debieb, 2007)

La production de granulats recyclés est en général basée sur trois types d'installations : (Debieb, 2007)

L'installation fixe composée d'un ou plusieurs concasseurs d'une assez grande capacité ;

L'installation mobile sur site fixe qui est transportable avec un ou deux concasseurs d'une assez grande capacité permettant le traitement sélectif des matériaux ;

L'installation mobile permettant une réutilisation immédiate des granulats recyclés, grâce à une petite installation transportable pourvue d'un concasseur de faible capacité.

Le principe de fonctionnement des installations, à savoir les matériels de concassage des déchets de béton, est relativement semblable à celui utilisé pour la production d'agrégats naturels. La seule différence réside dans le fait que l'usure du matériel nécessaire à la production des granulats recyclés est beaucoup plus rapide – jusqu'à deux fois – ce qui provoque un débit de production plus faible. On retrouvera notamment des concasseurs, des dispositifs de retrait d'impuretés et des équipements de transfert. (Debieb, 2007)

Pour fragmenter les déchets, des concasseurs – appelées également broyeurs ou granulateurs sont utilisés, en une ou plusieurs étapes. Nous pouvons citer, par exemple, les concasseurs à mâchoire, à percussion, à marteaux, giratoires, à soles tournantes et à cylindres. Le concasseur sera choisi suivant la quantité, la qualité et la granulométrie des granulats recyclés. (Debieb, 2007)

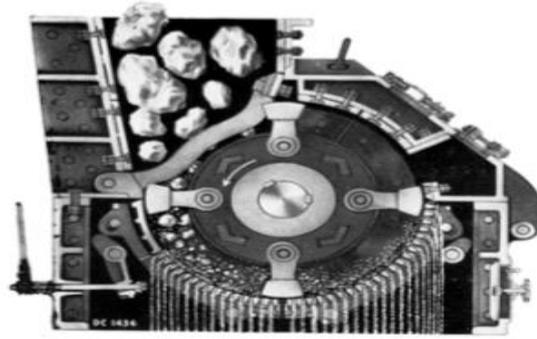


Figure II. 3 Concasseur à marteaux

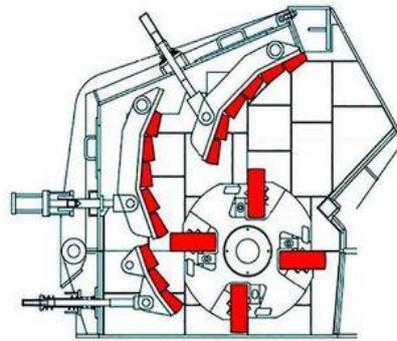


Figure II. 4 Concasseur à percussions

II .5.3 Les principales étapes de traitement

Les étapes de traitement sont les suivantes : le prétraitement, l'alimentation, le scalpage ou pré-criblage, le concassage primaire, la séparation magnétique, le criblage, le concassage secondaire ou broyage et le criblage secondaire. Le concassage et le criblage sont des dispositifs qui procèdent au retrait de certaines impuretés pendant le processus de production. Ces impuretés sont présentes car les déchets sont constitués d'autres matériaux minéraux tels que le bois, le plâtre, le verre, etc. en plus du béton. (Debieb, 2007) ; (Oikonomou, 2005)

II.5.4 DESCRIPTION DU GRANULAT RECYCLE

Un granulats provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Sont formés du granulats d'origine et de mortier attaché à celui-ci (Figure .5). Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes. La teneur en mortier résiduel attaché au granulats d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulats recyclé (Ait Mohamed A 2017).

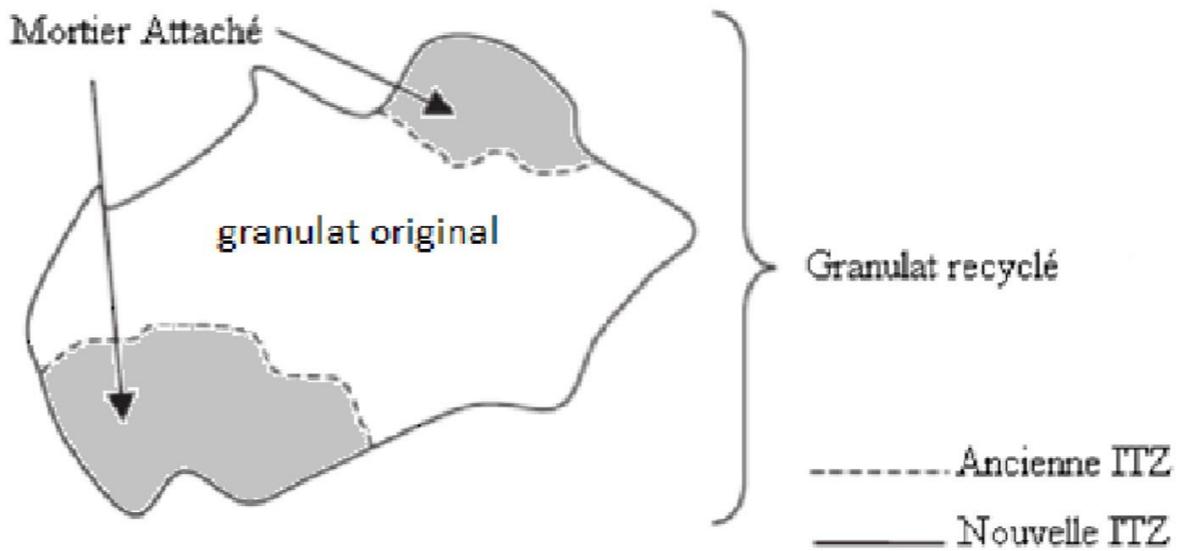


Figure II. 5 Schématisation d'un granulats recyclé (Ait Mohamed A 2017).

II .5.5 LES TYPES DES GRANULATS RECYCLES

En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés (Figure .6) (Hannequart & E. Schamp 2010).

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





Figure II. 6 Différents types des granulats recyclés (Hannequart & E. Schamp 2010)

II.6 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT FRAIS

II.6.1 Ouvrabilité

L'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulat naturel pour un même rapport E/C. Cette baisse d'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, on observe une augmentation de **3,1% à 9,4 %** de la demande en eau du béton lors de l'utilisation des granulats recyclés, pour garantir un même affaissement. Ceci a été attribué aux granulats recyclés ayant une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton (Ait Mohamed A 2017).

II.6.2 La masse volumique et la teneur en air

La masse volumique apparente du béton frais à base de granulats naturels est dans la plage de **2400 kg/m³**, alors que le béton à base de granulats recyclés est nettement plus léger, **2150 kg/m³**, quel que soit le type de ciment. Et la teneur en air du béton de granulat recyclé est légèrement supérieure (**4% à 5,5%**) par rapport au béton à base des granulats **100%** naturel (Barkat A 2006).

II.7 PROPRIETES DU BETON A BASE DES GRANULATS RECYCLES A L'ETAT DURCI

II.7.1 Perméabilité

Elle est augmentée avec le taux de remplacement du granulat. Cette augmentation est principalement due à l'absorption d'eau des granulats recyclés. Cette augmentation n'a

cependant pas été observée pour un taux de remplacement de **20%** selon certains travaux. (Ait Mohamed A 2017).

II.7.2 Porosité

Généralement corrélée à leur capacité d'absorption et le volume de pores et la distribution. Du fait de la présence de mortier attaché aux granulats, la structure des bétons recyclés est plus poreuse qu'un béton ordinaire. Les valeurs de porosité obtenues dans la littérature vont de **14%** à **20,1%**. (Ait Mohamed A 2017).

II.7.3 Résistance à la compression

En général, c'est entre **5%** à **30%** de diminution dans la résistance à la compression du béton fait de gros agrégats recyclés, en fonction de la qualité du béton et la composition du mélange. (Rao, 2005) a trouvé la résistance du béton à base de granulat recyclé et le béton de référence à comparable avec un remplacement à **100%**, à condition que le rapport E/C est supérieur à **0,55**. (Poon et al, 2004) ont également observé que des granulats recyclés ont une forme plus anguleuse et une texture de surface rugueuse par rapport aux granulats naturels qui peuvent conduire à une meilleure liaison et résistance. (Corinaldesi et Moriconi, 2009) ont étudié l'effet des fumées de silice sur l'amélioration de résistance à la compression du BGR. Ils ont observé que la force peut être améliorée pour égaler ou voire dépasser celle du béton de granulats normaux en ajoutant des fumées de silice dans le mélange. (Ait Mohamed A 2017).

II.7.4 Résistance à la traction et à la flexion

La résistance à la traction des bétons recyclés présente des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certaines ont montré une réduction de **15** à **20%** à un taux de remplacement de **100%** et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours (Ait Mohamed A 2017).

II.7.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont la teneur en mortier résiduel, le rapport E/C et la teneur en air entraînée. Le module d'élasticité d'un **BGR** fabriqué à partir de fins et gros granulats est d'environ **25%** à **40%** de moins que celui du béton ordinaire, tandis que pour un béton fait avec de gros granulats seulement, il est d'environ **10%**

à **33%** de moins, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés (Ait Mohamed A 2017).

II.8 PROPRIETES LIEES A LA DURABILITE

II.8.1 Retrait et fluage

Le retrait est une mesure du changement volumétrique du béton libre de chargement extérieur. Le béton se dilate avec l'accroissement de la teneur en eau et se contracte avec la perte d'humidité. D'après les études les propriétés de retrait endogène et de séchage du béton Contenant des granulats de béton recyclé, il indique que le taux de retrait est élevé aux jeunes âges, puis ralentit avec le temps. Les facteurs de remplacement des granulats de béton recyclé par des granulats naturel supérieur à **30%** provoquent une augmentation rapide dans les valeurs de retrait de séchage et indiquée une déformation moyenne de **0.007** mm/m par contre un taux de remplacement supérieur à **60%** indique une déformation de l'ordre **0.05** mm/m. (Ravindrarajah et Tam,1985) ont montré que le fluage du **BGR** est d'environ **30%** à **60%** plus élevé que celui du béton ordinaire. Donc le fluage du béton est proportionnel à la teneur en pâte ou de mortier dans le béton (Ait Mohamed A 2017).

II.9 CONCLUSION

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

Chapitre III :

Caractérisation des matériaux et formulation du BCR

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les résultats de caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude. Les essais réalisés concernent la détermination des caractéristiques physicomécaniques des différentes composantes de BCR, le sable, les différentes classes de graviers. Pour les ciments et ajouts minéraux employés dans la présente étude sont délivrés à partir des fiches techniques en vigueur.

III.2. MATERIAUX UTILISES

Les matériaux prélevés ont été soumis aux essais d'identification au sein du laboratoire de Génie Civil de l'Université Med El-Bachir El-Ibrahimi de Bordj Bou-Arredj, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes. Les essais effectués sur les matériaux sont : analyse granulométrique, équivalent de sable, coefficient d'absorption d'eau, masses volumique (apparente et absolue) et Los Angeles.

III.2.1 Le gravier

Le gravier utilisé pour la confection du béton dans notre étude expérimentale provient de la carrière d'OUIAM qui se situe à environ 40 Km de la ville de BBA.

III.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-5]

❖ But de l'essai

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



Figure III. 1 Tamiseuse.

❖ Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau.

Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

❖ Matériels utilisés

- Une colonne de tamis propres correspondants à chaque fraction.

Tableau III. 1 Tamis utilisés pour le tamisage des graviers

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
3/8	(8 - 6,3 - 5 - 4 - 3.15 - 2.5 - et le fond)
8/15	(16 - 12.5 - 10 - 8 - 6.3 - 5 - et le fond)
15/20	(20 - 16 - 12.5 - 10 - 8 - et le fond)

❖ Préparation de l'échantillon

L'échantillon de gravier est préparé selon la norme NF EN 933-5. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à 0.2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

❖ Mode opératoire

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



Figure III. 2 Fraction du gravier après tamisât.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 2 L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8)

Poids initial = 1600 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
40	8	3	3	0.1875	99.8123
39	6,3	136	139	8.6875	91.3125
38	5	304	443	27.6875	72.3125
37	4	404	847	52.9375	47.0625
36	3,15	374	1221	76.3125	23.6875
35	2,5	152	1373	85.8125	14.1875
–	Fond	226	1599	99.9375	0.0625

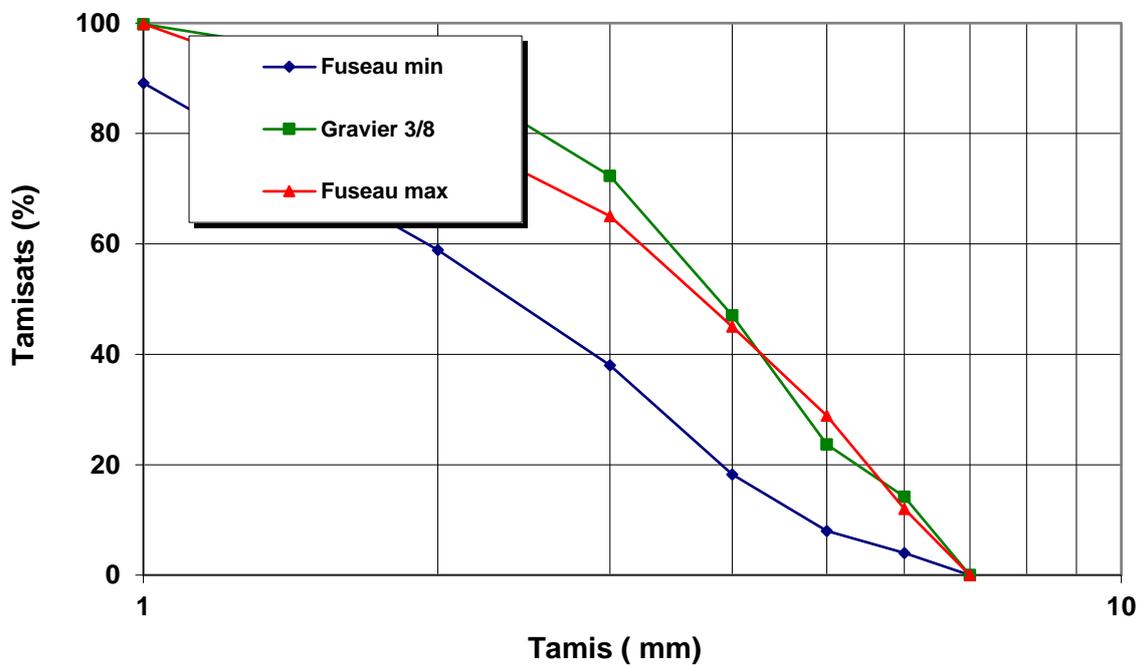


Figure III. 3 Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8).

Tableau III. 3 L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15).

Poids initial = 3200 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât
43	16	154	154	4.1825	95.1875
42	12,5	504	658	20.5625	79.4375
41	10	688	1346	42.0625	57.9375
40	8	723	2069	64.6562	35.3438
39	6,3	750	2819	88.0937	11.9063
38	5	195	3014	94.1875	5.8125
–	fond	180	3194	99.8125	0.1875

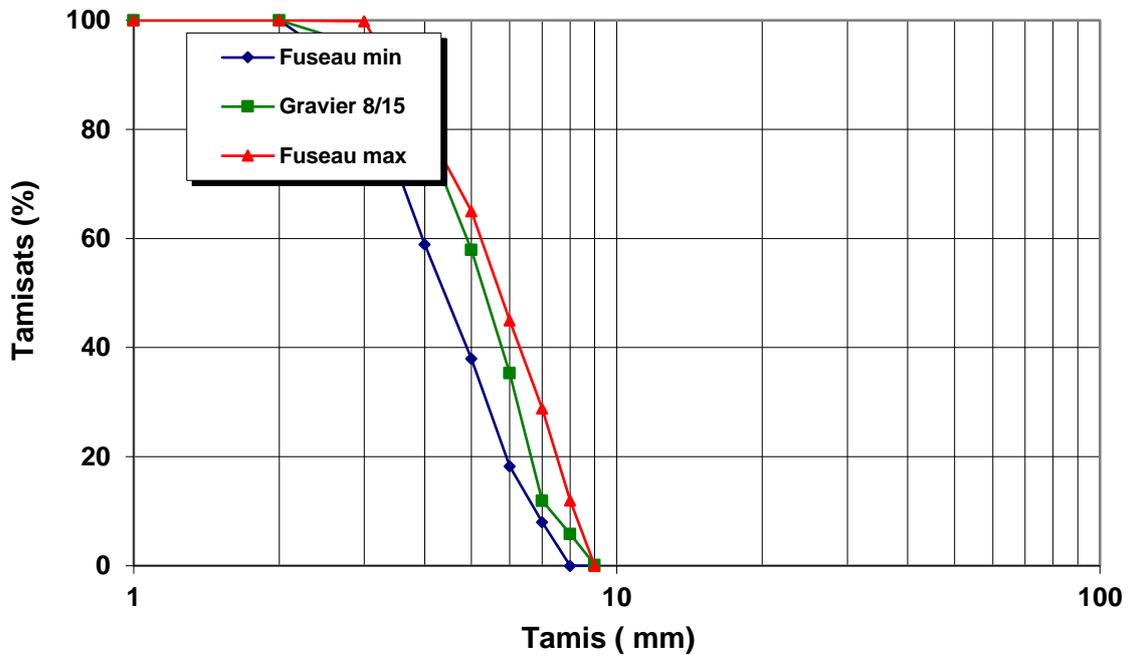


Figure III. 4 Courbe granulométrique des granulats concassés (8/15).

Tableau III. 4 L'analyse granulométrique de gravier concassé (15/20).

Poids initial = 4000 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât
44	20	0	0	0	100
43	16	2220	2220	55.5	44.5
	Fond	1780	4000	100	0

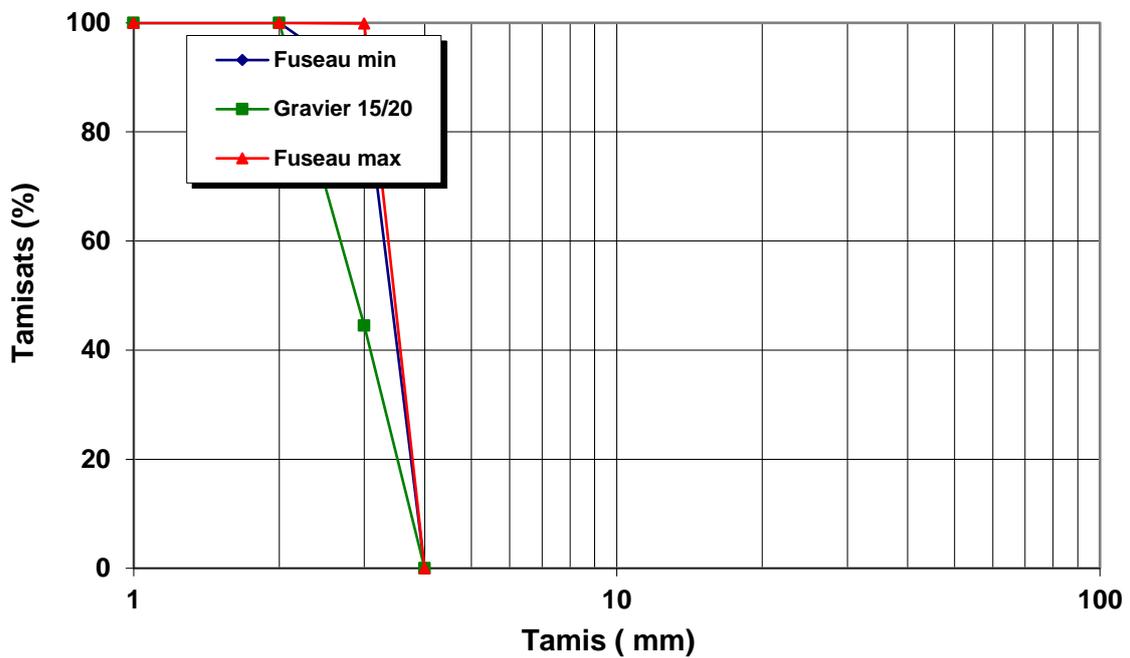


Figure III. 5 Courbe granulométrique des granulats concassés (15/20).

Tableau III. 5 L'analyse granulométrique de gravier recyclé (3/8).

Poids initial = 1600 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât
40	8	27	27	1.6875	98.3125
39	6,3	491	518	32.375	67.625
38	5	467	985	61.5625	38.4375
37	4	321	1306	81.0625	18.9375
36	3,15	197	1503	93.9375	6.0625
35	2,5	50	1553	97.0625	2.9375
–	Fond	40	1593	99.5625	0.4375

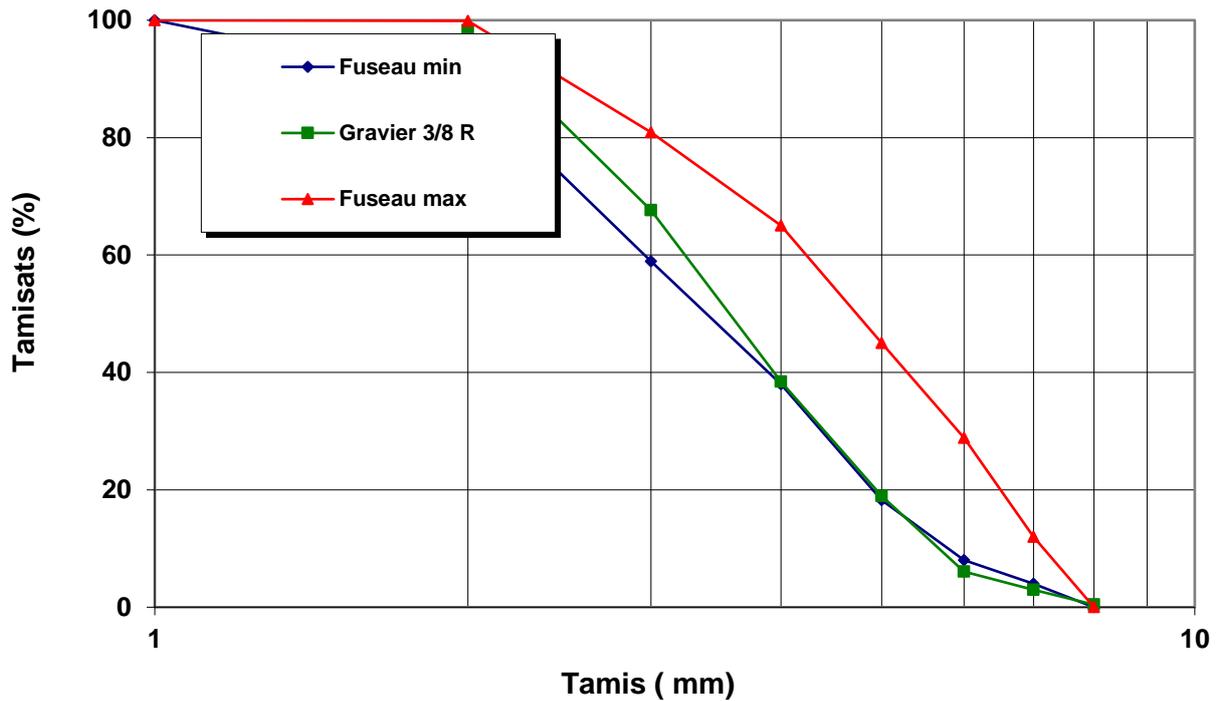


Figure III. 6 Courbe granulométrique des granulats recyclé (3/8).

Tableau III. 6 L'analyse granulométrique de gravier recyclé (8/15).

Poids initial = 3200 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât
43	16	28	28	0.875	99.125
42	12,5	705	733	22.9062	77.0938
41	10	883	1616	50.5	49.5
40	8	1042	2658	82.875	17.125
39	6,3	496	3154	98.5625	1.4375
38	5	18	3172	99.125	0.875

-	Fond	22	3194	99.8125	0.1375
---	------	----	------	---------	--------

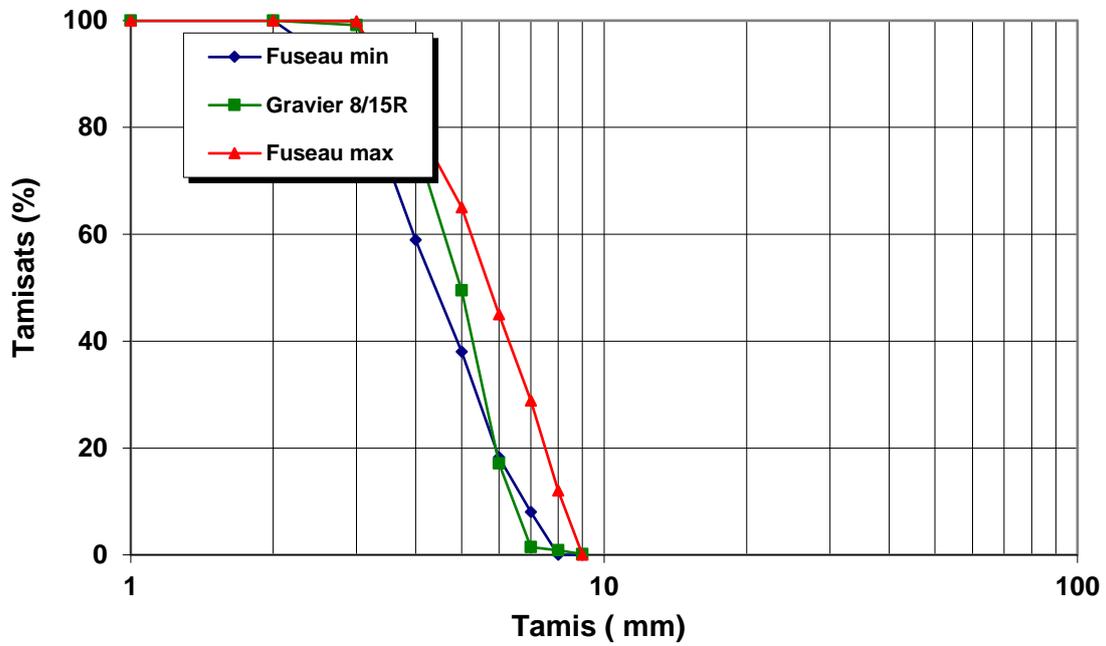


Figure III. 7 Courbe granulométrique des granulats recyclé (8/15).

Tableau III. 7 L'analyse granulométrique de gravier recyclé (15/20).

Poids initial = 4000 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
44	20	284	284	6.2	93.8
43	16	1797	2081	52.025	47.975
42	12.5	1753	3834	95.85	4.15
-	Fond	164	3998	99.95	0.05

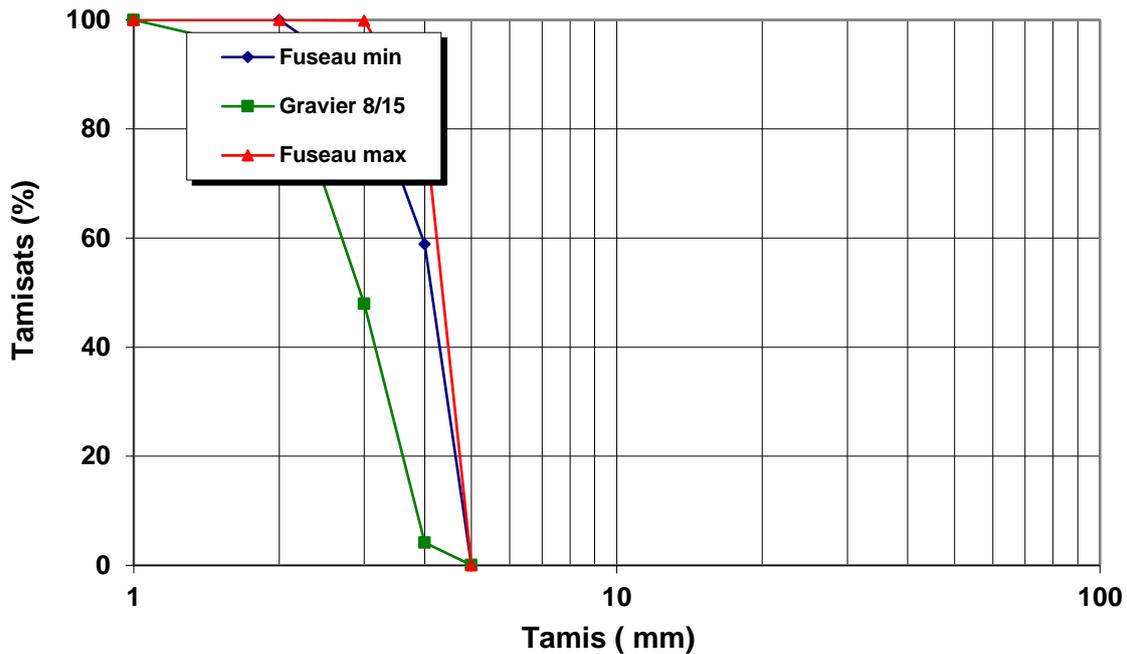


Figure III. 8 Courbe granulométrique des granulats recyclés (15/20).

III.2.1.2 La masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume, on distinguera :

III 2.1.2.1 La masse volumique apparente [NA EN 1097]

C'est le rapport entre la masse d'un corps et l'unité de volume apparent (y compris les vides), Elle est exprimée en (g/cm^3 , Kg/m^3 , t/m^3).

❖ Principe de l'essai

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

❖ Matériels utilisés

- Une balance avec une précision de 0.01 g.
- Un récipient avec un volume de 5 litre.
- Une règle à araser.

❖ Mode opératoire

- Peser le récipient vide et taré.
- Prendre le matériau (gravier) dans les deux mains formant un entonnoir.

- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

III.2.1.2.2 La masse volumique absolue [NA EN 1097]

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³, t/m³).

❖ Principe de l'essai

Consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée, car cette méthode est très simple et très rapide.

❖ Matériels utilisés

- Une éprouvette graduée en verre.

❖ Mode opératoire

- Remplir l'éprouvette graduée en verre par un volume d'eau (V1 = 400 ml).
- Peser une masse (M = 300 g) du matériau (gravier).
- Introduire cette masse dans l'éprouvette (s'assuré de bien éliminer les bulles d'air).
- Noter le nouveau volume V2.
- Cette opération est répétée 3 fois.
- La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante

$$\rho_{aps} = M/(V2 - V1)$$

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 8 la masse volumique apparente et la masse volumique absolue du gravier recyclé

Propriétés	Symboles	3/8	8/15	15/20
Masse volumique apparente	P (g/cm ³)	1.121	1.179	1.151
Masse volumique absolue	P abs (g/cm ³)	2.48	2.38	2.36

Tableau III. 9 la masse volumique apparente et la masse volumique absolue du gravier concassé

Propriétés	Symboles	3/8	8/15	15/20
Masse volumique apparente	P (g/cm ³)	1.356	1.418	1.378
Masse volumique absolue	P abs (g/cm ³)	2.810	2.580	2.46

III.2.1.3 La porosité

C'est le rapport du volume des vides contenu dans les grains au volume total des grains, elle est exprimée en pourcentage (%), définie par la relation suivante :

$$P (\%) = V_v / V_t * 100$$

D'après les résultats obtenus précédemment (masse volumique apparente et absolue), on peut exploiter ces données afin de déterminer la porosité du gravier grâce à la relation suivante :

$$P (\%) = V_v / V_t * 100$$

$$P (\%) = (1 - \rho / \gamma) * 100$$

D'où ;

γ : La masse volumique absolue du gravier.

P : La masse volumique apparente du gravier.

III.2.1.4 La compacité

C'est le rapport du volume des grains solides au volume total des grains, elle est exprimée en pourcentage (%), définie par la relation suivante :

$$C (\%) = V_s / V_t * 100$$

$$\text{Où :} \quad C (\%) = 1 - P$$

III.2.1.5 L'indice des vides

C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains solides, définie par la relation suivante :

$$e (\%) = V_v/V_s$$

$$\text{Où :} \quad e (\%) = (1-C) / C$$

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 10 Porosité, compacité et l'indice de vide du gravier recyclé

Propriétés	Symboles	3/8	8/15	15/20
Compacité	C (%)	48.87	49.54	48.77
L'indice de vide	e	1.05	1.02	1.05
Porosité	P (%)	51.13	50.46	51.23

Tableau III. 11 Porosité, compacité et l'indice de vide du gravier concassé

Propriétés	Symboles	3/8	8/15	15/20
Compacité	C (%)	48.260	54.960	56.02
L'indice de vide	e	1.070	0.820	0.79
Porosité	P(%)	51.740	45.040	43.98

III.2 .2 Caractéristiques du sable

Le sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale est un mélange de sable de dune prélevé de la région d'OUED SOUF, et un sable concassé prélevé de la carrière il est apprécié pour ses bonnes caractéristiques.

III .2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1]

❖ But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

❖ Principe de l'essai

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

❖ Matériels utilisés

- Une colonne de tamis propres et correspondants à chaque fraction.

Tableau III. 12 Tamis utilisés pour le tamisage du sable.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/5	(5 – 4- 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08 et le fond)

❖ **Préparation de l'échantillon**

L'échantillon de sable est préparé selon la norme NF EN 933-1. La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

❖ **Mode Opérateur**

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier, la seule différence est la durée de l'essai ; au lieu de 7 minutes pour le gravier elle va être 3 minutes pour le cas du sable.

Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 13 Analyse granulométrique du sable de dune d'OUED SOUF.

Poids initial = 1000 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât
38	5	0	0	0	100
35	2,5	8	8	0.8	92,2
32	1,25	48.5	56.5	5.65	94.35
29	0,63	228	284.5	28.45	71.55
26	0,315	480	764.5	76.45	13.55
23	0,16	194	958.5	95.85	4.15
20	0,08	37	995.5	99.55	0.45
–	Fond	4	999.5	99.95	0.05
D max			5 mm		

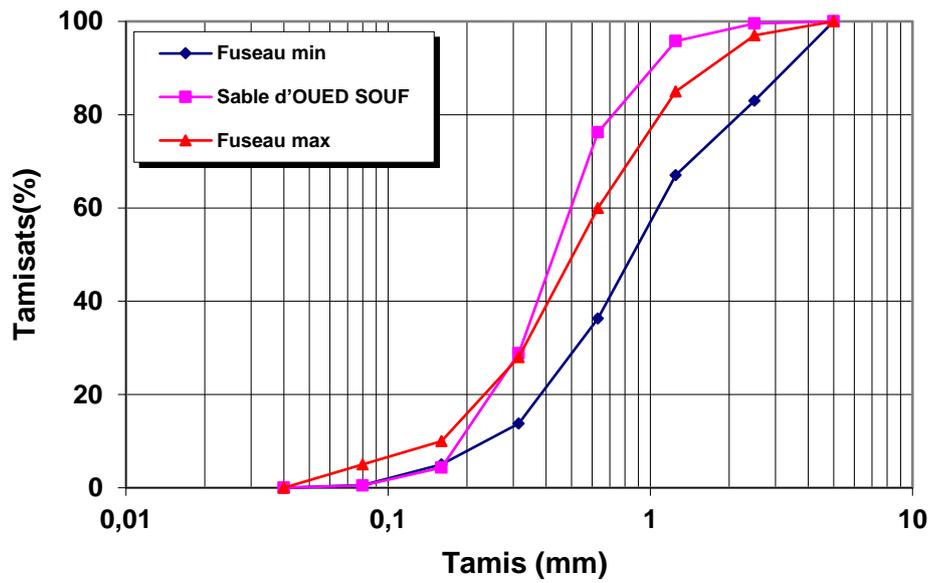


Figure III. 9 courbe granulométrique du sable de dune (OUED SOUF).

Tableau III. 14 Analyse granulométrique du sable concassé.

Poids initial = 1000 g					
Modules AFNOR	Tamis en mm	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
38	5	0	0	0	100
35	4	7	7	0.7	99.3
32	3.15	38	45	4.5	95.5
29	2.5	68	113	11.3	88.7
26	1.25	320	433	43.3	56.7
23	0.630	217.5	650.5	65.05	34.95
20	0.315	145.5	796	79.6	20.4
17	0.160	104	900	90	10
14	0.08	71.5	971.5	97.15	2.85
11	Fond	28	999.5	99.95	0.05
D max			5 mm		

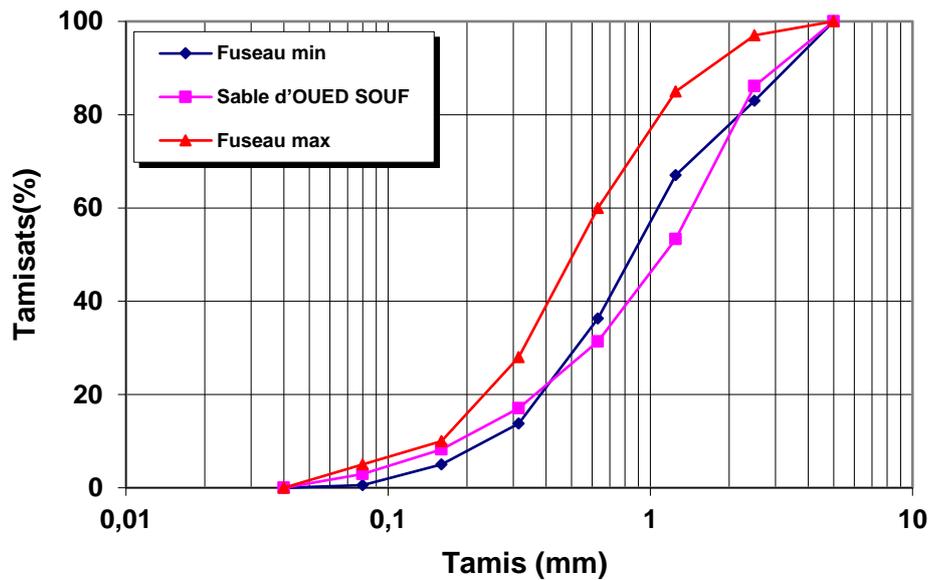


Figure III. 10 Courbe granulométrique du sable concassé.

III .2.2.2 La masse volumique

III.2.2.2.1 Masse volumique apparente [NA EN 1097-6]

❖ Principe de l'essai

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondants.

❖ Matériels utilisés

- Une balance avec une précision de 0.01g.
- Un récipient avec un volume de 1 litre.
- Une règle à araser.

❖ Mode opératoire

- Peser le récipient vide et tarer.
- Prendre le matériau (sable) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Placer les deux mains à hauteur d'environ 10 cm au-dessous de récipient.
- Verser le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Araser avec la règle sans compacter le matériau.
- Peser le contenu et noter la masse M.
- Répéter l'opération 3 fois afin de valider l'essai.
- La masse volumique apparente à l'état lâche est déterminée par la formule suivante :

$$P_{app} = M/V$$

III.2.2.2.2 La masse volumique absolue [NA EN 1097-6]

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le gravier décrit précédemment. La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$P_{\text{abs}} = M / (V_2 - V_1)$$

Avec : $M=300$ g.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 15 la masse volumique apparente et la masse volumique absolue pour les deux sables

Propriétés	Symboles	Sable de dune (OUED SOUF)	Sable concassé
Masse volumique apparente	P (g/cm ³)	1.551	1.628
Masse volumique absolue	P abs (g/cm ³)	2.620	2.720

III .2.2.3 La porosité

C'est une caractéristique très importante qu'il faut la prendre en considération car elle influe sur certaines propriétés telles que la résistance mécanique.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P (\%) = [1 - (\rho_s / \gamma)] \times 100\%$$

III .2.2.4 La compacité

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

La compacité est donnée par la relation suivante :

$$C = 1 - P$$

III.2.2.5 L'indice des vides

Le rapport de volume des vides sur le volume des solides :

$$e = p / (1 - p)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 16 La porosité, la compacité et l'indice de vide pour les deux sables

Propriétés	Symboles	Sable de dune	Sable concassé
L'indice de vide	E	0.690	0.671
Porosité	P(%)	40.800	40.150
Compacité	C (%)	59.200	59.850

III .2.2.6 Module de finesse

C'est un facteur très important qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés par les tamis (0.08, 0.125, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5). Il est donné par la relation suivante : $Mf = \sum RC / 100$ donc $Mf = 2,201$

On peut dire que le module de finesse 2.2 montre que le sable utilisé est un sable qui doit être utilisé si on cherche une ouvrabilité suffisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Tableau III. 17 Modules de finesse du sable.

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

Le module de finesse, c'est une caractéristique intéressante qui donne des indications sur le comportement probable d'un mélange de béton fabriqué avec un sable d'une granulométrie donnée. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd son ouvrabilité.

$$MF = \frac{1}{100} \left(\sum (\text{refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\}) \right)$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

III.2.2.7.2 Equivalent de sable piston (E.S.P)

- Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, à cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

$$Esp = (h^2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h^2 : hauteur du sable.

Tableau III. 19 Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP

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

Tableau III. 20 Résultats d'essai d'équivalent de sable pour les deux sables

Propriétés	Symboles	Sable de dune	Sable concassé
Équivalent de sable	E.S.P moy (%)	86.520	78.09

III.2.3 Caractéristiques du ciment (Mâtine)

III.2.3.1. Présentation du ciment CPJ

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Le ciment provient de l'usine matin. Le produit a comme identification.

C'est un ciment conforme à la norme.

III.2.3.2. Domaines d'utilisation

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

Le ciment NA442 CEM2/B-L 42.5 N Convient pour :

- Les bétons armés et non armés, Préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvé
- Les bétons prêts à l'emploi ;
- Le génie Civil (ouvrages et routes) ;
- Les travaux de construction (Logements, locaux commerciaux et Industriels)
- Les produits dérivés de ciment ;
- Les mortiers pour chapes et crépis.
- Béton au Haute Performance
- Préfabrication léger construction des Ouvrages, Infrastructure et super structure pour Bâtiments

III.2.3.3. Analyses et caractérisation

Le ciment utilisé pour la confection des bétons a été ramené de la cimenterie Matin. Toute information concernâtes propriétés physiques, sa composition chimique sont tirés à partir de la fiche technique de Matin délivré du fournisseur et donnée comme suit :

Tableau III. 21 Analyse chimique élémentaire du ciment portland composé (% massique).

Composition élémentaire	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Cl-
Teneur (%)	23.07	4.94	4.88	58.95		1.92	0.35	0.13	0.73	0.002

Tableau III. 22 Compositions minéralogiques du ciment portland composé (% massique)

Composition élémentaire	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaO	Gypse
Teneur (%)	54,08	22,33	4,44	15	0,73	5

Tableau III. 23 Caractéristiques physiques du ciment utilise

Masse volumique absolue	$\rho_s = (\text{g/cm}^3)$
Masse volumique apparente	$\rho_a = (\text{g/cm}^3)$
Début de prise	DP=150±30 minutes
Fin de prise	FP =230±50 minutes
Surface spécifique Blaine	SSB= (g/cm ³)

Tableau III. 24 Caractéristique Chimiques Du ciment Utilise

Analyses Chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en Sulfates (SO_3) (%)	2.5±0.5
Teneur ne Oxydes de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures (AN5042) (%)	0.02-0.05

Tableau III. 25 Resistance a la compression

Resistance a la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥10.0
28 jours (MPa)	≥42.5

Tableau III. 26 Les Propriétés Physiques

Propriétés Physiques	Valeur
----------------------	--------

Consistance Normale (%)	26.5±2
Finesse Suivant la méthode de Blain (cm²/g) (NA231)	3700 - 5200
Retrait a 28 Jour (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	≤3.0

En conclusion, le produit se présente comme suit :

- ❖ **Désignation** : Ciment Portland au Calcaire
- ❖ **Identification** : NA442 CEM2/B-L 42.5 N
- ❖ **Composition** : 60±3 % De C_3S et 7.5±1 % De C_3A

III.3 FORMULATION DU BCR

III.3.1. Introduction

Dans cette partie de chapitre on présente les étapes suivies pour déterminer les différentes composantes du mélange. Parmi les méthodes de formulations exposées en premier chapitre on a choisi de travailler avec la méthode de MDS vue es moyens disponibles chez notre laboratoire BCR aussi l'essai de Proctor pour la détermination de la quantité d'eau optimum.

III.3.2. Paramètres de formulation

Selon la méthode qui se base sur la géotechnique on doit suivre les étapes suivantes :

III.3.2.1 FUSEAU GRANULOMETRIQUE

Pour choisir les pourcentages des différentes fractions d'agrégats il faut que la courbe combinée soit à l'intérieur du fuseau, les résultats sont représentés dans le tableau et la figure ci-dessous.

Tableau III. 27 Tamisât des différentes fractions d'agrégats

Diamètre	Gravier 15/20	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Sable		Combinée
				Dune	Concasse	
20	100	100	100	100	100	100
16	44,5	95,1875	100	100	100	93,246875
12,5	0	79,4375	100	100	100	84,859375
10	0	57,9375	100	100	100	79,484375
8	0	35,34375	99,8125	100	100	73,8078125
6,3	0	11,90625	91,3125	100	100	66,6734375

5	0	5,8125	72,3125	100	100	62,3
4	0	0,1875	47,0625	99,2	99,3	56,74625
3,15	0	0	23,6875	98	95,5	51,553125
2,5	0	0	14,1875	96	88,7	47,208125
1,25	0	0	0,0625	94,35	56,7	32,124375
0,63	0	0	0	71,55	34,95	21,135
0,315	0	0	0	23,55	20,4	10,515
0,16	0	0	0	4,19	10	4,419
0,08	0	0	0	0,45	2,85	1,185
Fond	0	0	0	0,05	0,05	0,025

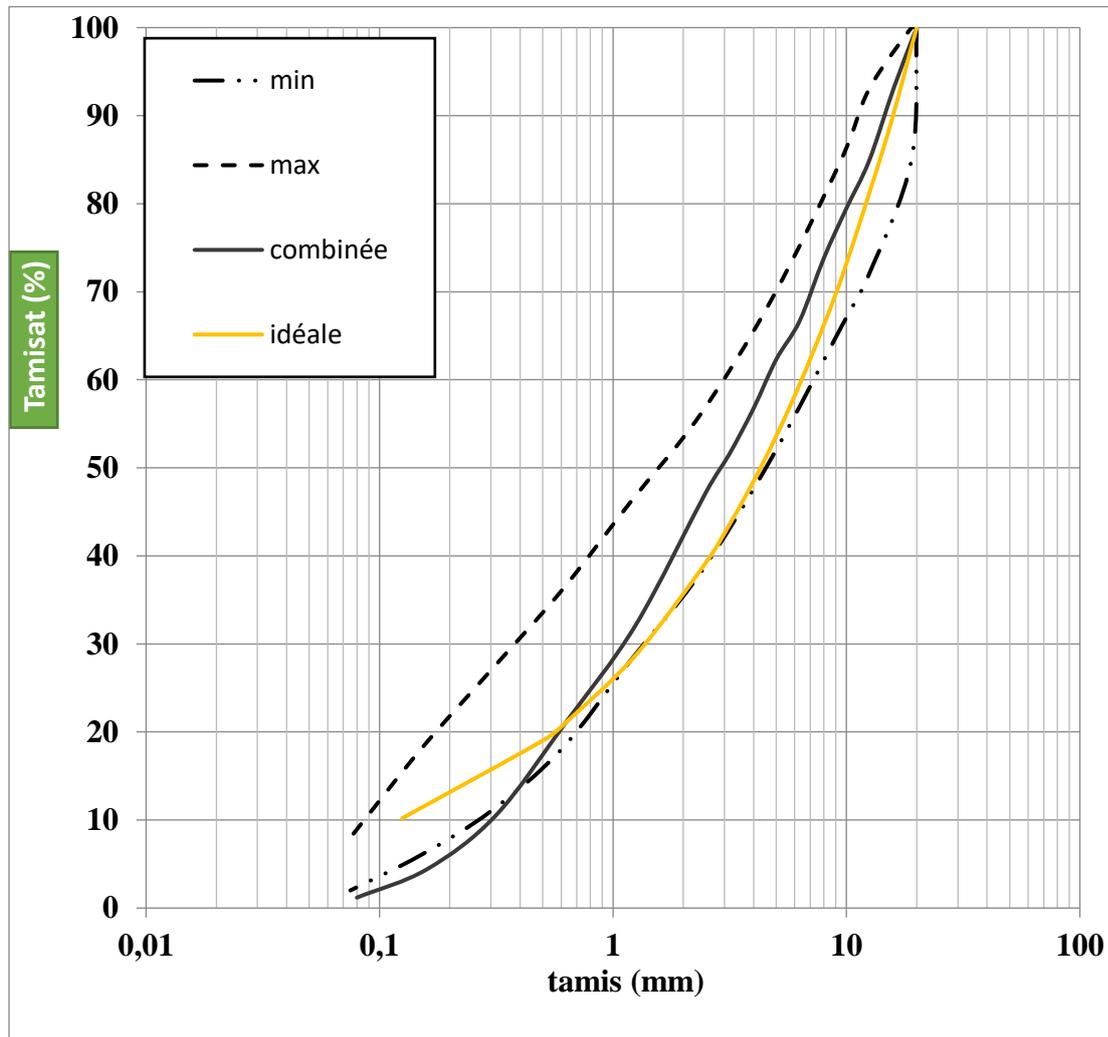


Figure III. 11 Courbe combinée des agrégats utilisés.

III.4. CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a présenté et analysé les résultats de caractérisation des matériaux employés pour la préparation des mélanges de BCR. Les résultats nous ont montré les principales caractéristiques physicochimiques et mécaniques nécessaire pour entamer le programme expérimental

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons regrouper des résultats expérimentaux de plusieurs chercheurs traités la même problématique proposer dans notre étude ; puis une modélisation statistique a été réalisée par la méthode de plan d'expériences.

Tableau IV. 1 les valeurs des résistances mécaniques a 7,28 et 90 jours

Facteurs		La résistance à la compression (MPa)		
Granulats recyclés	Dosage de Ciment	7-jour	28-jour	90-jour
0%	110	5,5	6,7	7,5
50%	110	4,1	5,1	5,7
100%	110	3,5	4,5	5,1
0%	175	17,3	20,2	23,0
50%	175	15,7	19,1	22,1
100%	175	14,8	18,2	21,2
0%	250	28,2	33,2	35,4
50%	250	22,8	25,4	28,9
100%	250	17,9	21,5	24,1
0%	350	35,6	40,6	43,9
50%	350	27,6	35,2	40,6
100%	350	23,9	27,6	31,9

IV.3. Modélisation statistique

Dans cette partie on va voir l'effet du dosage de ciment et la quantité des granulats recycle sur le comportement mécanique d'un béton compact aux rouleaux à court, moyenne et long terme (7,28,90jours).

IV.3.1. Modèle de la résistance à la compression à 7 jour :

✓ **Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :**

La figure IV. 2 présente les valeurs observées en fonction des valeurs prévues du modèle de la résistance à la compression à jeune âge (7 jours). On constate que les points sont moins dispersés et proche au 1^{ère} bissectrice qui est souhaitable. Ceci traduit par une valeur de R carre proche de 1 ($R^2=0.94$)

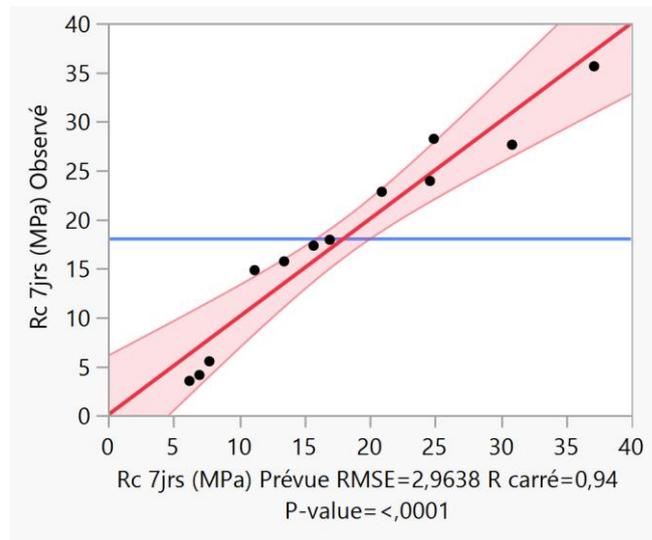


Figure IV. 1 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues à 7 jour.

Tableau IV. 2 Résumé de l'ajustement

R carré	0,934854
R carré ajusté	0,910424
Racine de l'erreur quadratique moyenne	3,89666
Moyenne de la réponse	24,11667
Observations (ou sommes pondérées)	12

✓ L'analyse des effets :

D'après le tableau IV. 2 on remarque que le dosage de ciment joue un rôle prépondérant sur la résistance mécanique à la compression a jeune âge (à 7jours) même les granulats recycle mais moins que C (%).

Tableau IV. 3 l'analyse des effets de différents paramètres

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
-------	------------	-----------------	---------	------------

C (%) (110,350)	11,938907	1,149332	10,39	<,0001*
GR (%) (0,100)	-3,513217	1,052873	-3,34	0,0103*
GR (%) *C (%)	-2,752692	1,407638	-1,96	0,0863

✓ **Modèle mathématique :**

Le modèle mathématique de la résistance à la compression en fonction de dosage du ciment et les granulats recycle est déterminé par :

$$RC(7jrs) = 18,94554533 + [-3,513217153] \times \left(\frac{GR(\%)-50}{50} \right) + 11,938907382 \times \left(\frac{C(\%)-230}{120} \right) + \left(\frac{GR(\%)-50}{50} \right) \times \left(\frac{C(\%)-230}{120} \right) \times (-2,752692383)$$

✓ **Représentation graphique de surface de réponse :**

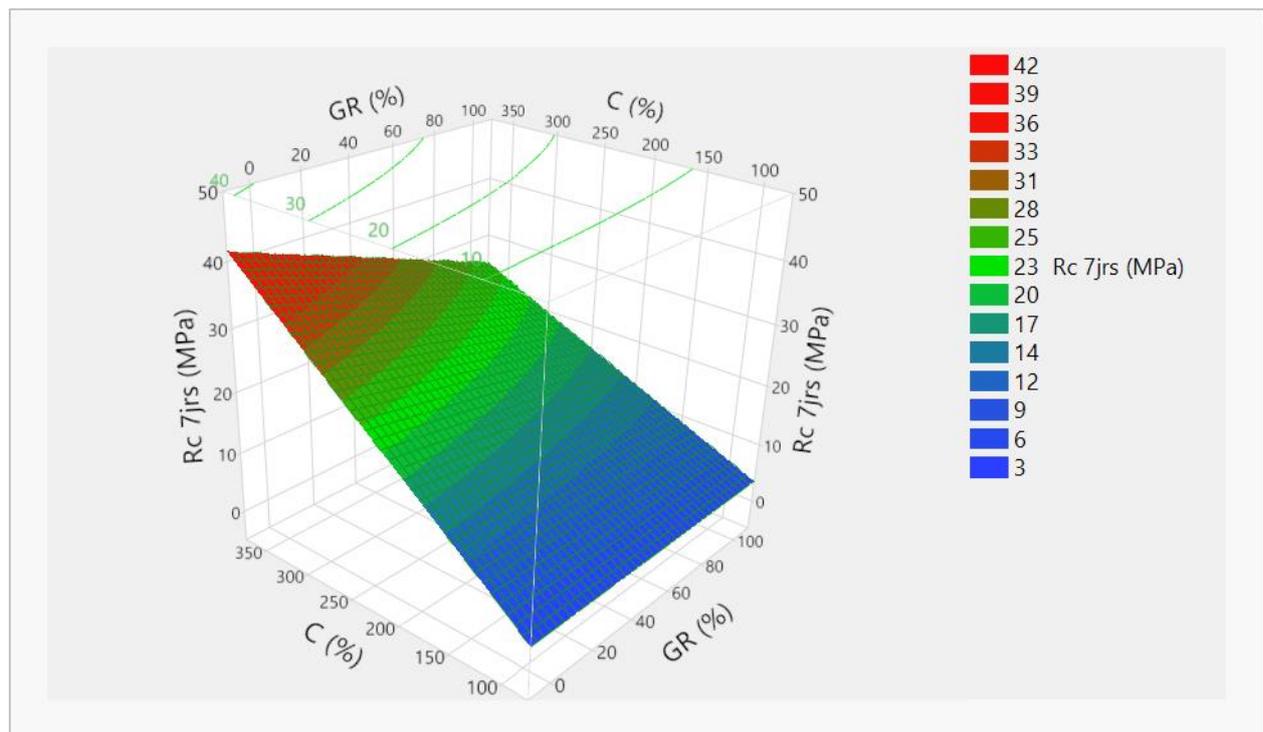


Figure IV. 2 L'évolution de la résistance à la compression a 7jour en fonction de C (%) et GR (%).

La figure IV. 2 représente l'évolution de la résistance à la compression à 7 jours en fonction du

C (%) et GR (%). On peut observer que la résistance à la compression augmente progressivement avec l'augmentation du dosage de ciment.

Par contre la quantité de granulat recyclé élevé provoque une diminution de la résistance à jeun âge.

IV.3.2. Modèle de la résistance à la compression à 28 jours :

✓ **Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :**

La figure IV. 4 présente les valeurs observées en fonction des valeurs prévues du modèle de la résistance à la compression à 28 jours. On constate que les points sont plus dispersés avec un coefficient de régression R carré égale a 0.94.

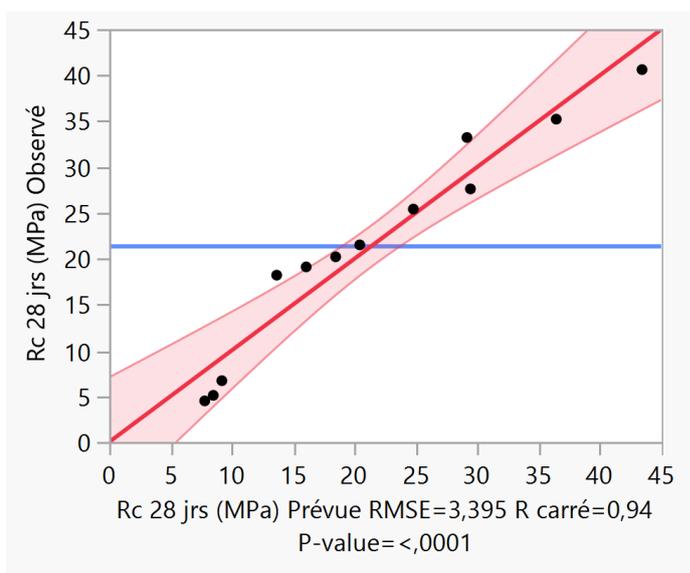


Figure IV. 3 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

✓ **Résumé de l'ajustement :**

Tableau IV. 4 Résumé de l'ajustement

R carré	0,940013
R carré ajusté	0,917518

Racine de l'erreur quadratique moyenne	3,394961
Moyenne de la réponse	21,44167
Observations (ou sommes pondérées)	12

✓ **Estimations des coefficients :**

Le tableau IV.4 présente le test des effets qui influence sur la repense étudiée, on peut constater que :

- le dosage de ciment et la quantité du GR influe sur la résistance à 7jours .

Tableau IV. 5 l'analyse des effets de différents paramètres.

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
C (%) (110,350)	13,964049	1,316535	10,61	<,0001*
GR (%) (0,100)	-3,841796	1,206044	-3,19	0,0129*
GR (%) *C (%)	-3,144625	1,61242	-1,95	0,0870

✓ **Modèle mathématique :**

Le modèle mathématique de la résistance à la compression (3jours) en fonction du rapport FA/C et E/C est déterminé par : $Rc(28 \text{ jours}) = 22,459878598 + -3,841795575 \times \left(\frac{(GR(\%) - 50)}{50}\right) + 13,964049344 \times \left(\frac{(C(\%) - 230)}{120}\right) + \left(\frac{(GR(\%) - 50)}{50}\right) \times \left(\frac{(C(\%) - 230)}{120}\right) \times -3,144625024)$

✓ **Représentation graphique de surface de réponse :**

D'après la figure IV.5 qui présente la surface de réponse du modèle de résistance à la compression a 28 jours en fonction de C (%) et le GR (%) On constate que la tendance de variation et identique à celle de 7 jour.

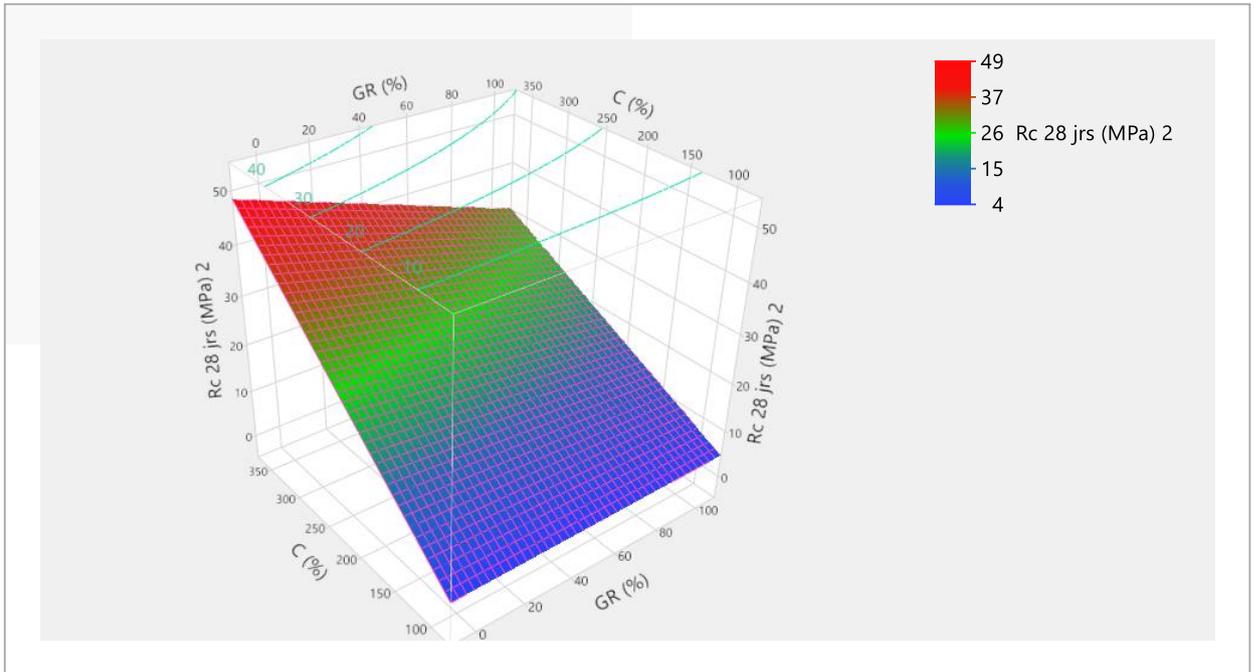


Figure IV. 4 L'évolution de la résistance à la compression a 28 jours en fonction de C (%) et GR (%)

IV.3.3. Modèle de la résistance à la compression à 90 jours :

✓ Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues :

D'après la figure IV.6 on constate que le nuage des points, est moins dispersé. On conclut qu'il y a une bonne corrélation entre les résultats de l'expérimentation et ceux de la simulation ($R \approx 1$). Le tableau IV.3 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.

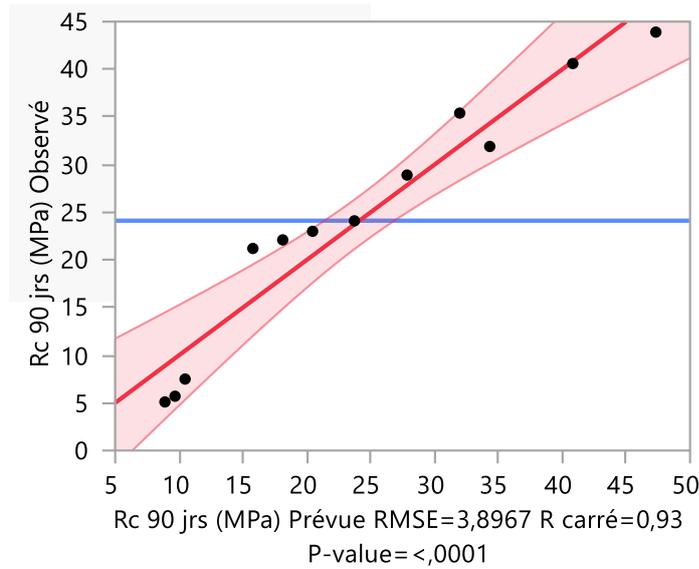


Figure IV. 5 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues

Tableau IV. 6 Résumé de l'ajustement.

R carré	0,938329
R carré ajusté	0,915203
Racine de l'erreur quadratique moyenne	2,963792
Moyenne de la réponse	18,075
Observations (ou sommes pondérées)	12

✓ **Estimations des coefficients :**

D'après le tableau IV.7, on remarque que l'effet de C (%) et le GR (%) ainsi qu'est beaucoup plus importants que GR (%) *C (%).

Tableau IV. 7 Estimations des coefficients.

Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	Prob. > t
C (%)	15,571725	1,51109	10,30	<,0001*

GR (%)	-3,64579	1,384271	-2,63	0,0300*
GR (%) * C (%)	-2,85655	1,850699	-1,54	0,1613

✓ **Modèle mathématique :**

Le modèle mathématique de la résistance a la compression en fonction du C (%) et GR (%) est déterminé par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 R_{c \ 90 \ \text{jours}} = & 25.252104954 + -3.645725083 \times \left(\frac{(GR(\%) - 50)}{50} \right) \\
 & + 15,571725083 \times \left(\frac{(C(\%) - 230)}{120} \right) \\
 & + \left(\frac{(GR(\%) - 50)}{50} \right) \times \left(\frac{(C(\%) - 230)}{120} \right) \times -2,856549834
 \end{aligned}$$

✓ **Représentation graphique de surface de réponse :**

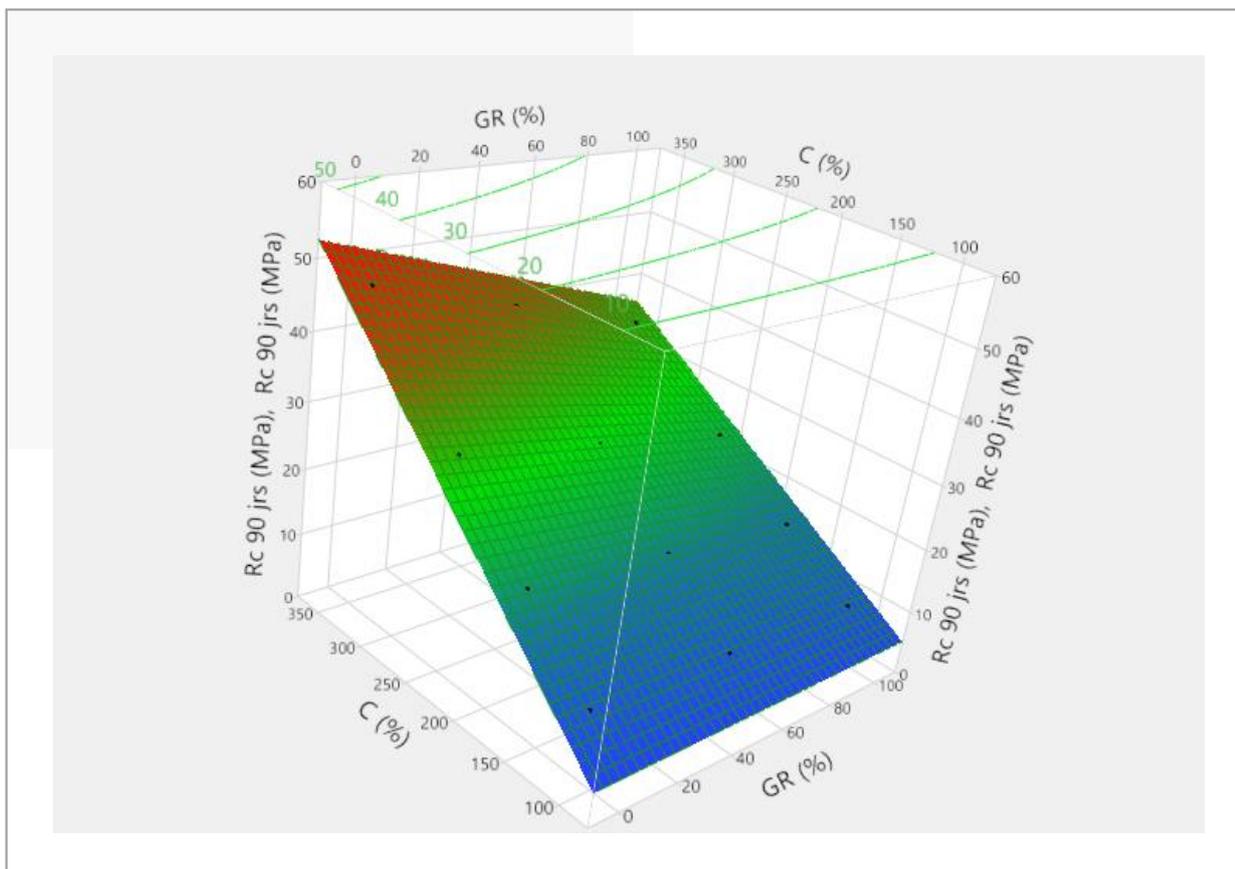


Figure IV. 6 L'évolution de la résistance à la compression a 90 jours en fonction de C (%) et GR (%)

D'après la figure IV.7 qui présente la surface de réponse du modèle de la résistance à la compression a 90 jours en fonction de C (%) et GR (%).

On constate que l'augmentation de C (%) provoque une augmentation de la résistance à la compression.

Concernant le GR (%), on remarque que l'augmentation de ce dernier provoque une légère diminution de la résistance à la compression à long terme

VI.4. Conclusion :

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer la résistance à la compression d'un béton compacté aux rouleaux avec différents dosages de ciment.

L'utilisation du plan d'expérience nous permet d'avoir des lois de comportement qui rassemble différents paramètres de formulation GR (%) et le dosage de ciment.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le béton compacté au rouleau est un béton très ferme (affaissement nul) composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. Ce béton raide, n'est pas armé et sa compacité est très élevée.

Le BCR présente une grande résistance et une bonne durabilité vis-à-vis aux différentes sollicitations dont une chaussée a besoin pour durer, ces qualités lui permettent de supporter un trafic dense.

Au vu du développement en cours dans le domaine du génie civil, de la rareté et du coût des matières premières, nous nous sommes fixé un objectif, qui est de pouvoir étudier un béton respectueux de l'environnement en utilisant de vieux granulats recyclés en plus de la vase des barrages comme un ajout cimentaire pour réduire l'utilisation de ciment coûteux et polluant et pour obtenir un béton économique et écologique. Malheureusement, et en raison du virus corona qui a conduit à la fermeture de toutes les universités du pays, et faute de temps, on n'avait pas d'autre choix que de remplacer la partie pratique par une modélisation de la résistance à la compression du BCR en utilisant la méthode de plan d'expérience par le logiciel JMP

L'objectif de cette étude consiste à étudier l'effet des ajouts minéraux et les granulats recyclés sur la résistance mécanique du BCR à partir de la méthode de plan d'expérience par le logiciel JMP. Les résultats de cette étude montrent que :

- La résistance à la compression des BCR témoin à base de 100% de granulats naturels est plus élevée que celle d'un BCR recyclés réalisés avec (BCR50%GR et BCR100%GR).
- La résistance à la compression des BCR à augmenter proportionnellement avec l'augmentation des dosages de ciment.

La méthode de plan d'expérience utilisant le logiciel JMP nous a permis de tirer des modèles mathématiques qui gèrent le comportement mécanique de notre béton en fonction du taux des granulats recyclés et du dosage du ciment.

L'étude des différents BCR à plusieurs échéances (7, 28 et 90 jours) nous a permis de conclure que la cinétique du développement de la résistance à la compression reste la même.

Les résistances à la compression, enregistrées pour les mélanges contenant des agrégats recyclés, est inférieure par rapport aux agrégats sains, cependant leur utilisation reste une excellente initiative pour leur valorisation et l'aspect écologique.

Références bibliographiques

Reference

(ACDC 2001) ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT : Conception et réalisation des revêtements en BCR 2001.

(ACI) Guide to Curing Concrete (Reapproved 2008), États-Unis. American Concrete Institute, 2001, 311p. (ACI 308R-01).

(ACI116) ACI116, 1967. Cement and Concrete Terminology, ACI 116. ACI Special Publication, 19.

(ACI 325, 2001). ACI Comimittee 325, 2001. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements.

(ACI 325.10R-95) American Concrete Institute 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 pages.

(Ait Mohamed A 2017) Ait Mohamed Amer Adam, « valorisation des matériaux de démolition dans la construction », thèse doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chalef, février 2017.

(ANDERSSON & R Swedish, 1987). ANDERSSON, R. Swedish experiences with RCC, Concrete International: Design and Construction, 1987, vol. 9, no 2, février, pp. 18-24

(Association Canadienne, 2001) Conception et réalisation des revêtements en BCR 2001.

(ASTM-D155707 2007) "Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort Standards " AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

(BaCaRa, 1996). BaCaRa, 1996. Le Béton Compacté au Rouleau : les Barrages en BCR : Projet National BaCaRa 1988-1995, Paris : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

(Barkat A 2006), Barkat Abderezzak, « valorisation des déchets de briques ». Mémoire MAGISTER. UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA. Novembre 2006

(Baron J& et Olivier, 1997). 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.

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

Références bibliographiques

(Charlot-Valdieu C. 1993). Les déchets de démolition ou de chantier, état des lieux Observatoire Technique de l'Europe du Bâtiment-CSTB. Cité dans (Raphaël, 2003).

(Choi & Hansen, 2005). Choi, Y.-K. & Hansen, K.D., 2005. RCC/Soil-Cement: What's the Difference? *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), pp.371–378.

(Corinaldesi et Moriconi, 2009) Corinaldesi V, Moriconi G, Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*,2009; 23(8):2869-2876.

(Debieb, 2007) Debieb, F Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur en génie civil : "Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés", Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2007.

(ERES Consultant, 1998) ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procédures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada

(Forbes 2007). Forbes, B. B. a. B. A. (2007). A High RCC Dam with Low Grade Aggregates. 5th International Symposium on RCC Dams.

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

(Gauthier P& Marchand J, 2004). Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté.

(Gauthier P& all, 2000), 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.

(GDCBFNB, 1994) Guide des déchets de chantier de bâtiment Fédération Nationale du Bâtiment, Direction de l'habitat et de la Construction, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie-septembre 1994. Cité dans (Raphaël, 2003).

(Hannequart & E. Schamp 2010) V Hannequart & E. Schamp, « l'utilisation de granulats issus du recyclage », Matriciel 4ème édition, Bruxelles, Décembre 2010. (Rao, 2005) Rao A., «

Références bibliographiques

Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates and concrete ». Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of technology Kanpur; 2005.

(Huang. Y. H, 2004). Huang Y. H., (2004), Pavement Analyses and Design, seconde édition, Université de Kentucky USA, pp. 5-8

(Jeuffroy G & Sauterey R, 1989) .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.

(Marchand J& all, 1997). Marchand J., Gagné R., Ouellet E. et Lepage S., (1997) Mixture proportioning of roller compacte d concrete, Concrete Technology, Special Publication SP 171-22. pp. 457-487.

(Oikonomou, 2005) Oikonomou, Nik. D. “Recycled Concrete aggregates”, Cement & Concrete Composites, Vol. 27, p. 315-318, 2005

(Poon et al, 2004) Poon CS., Shui ZH., Lam L., Kou SC., « Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete », Cement and Concrete Research, vol. 34, n°1, 2004, p. 31-36.

(Quebaud et all 1996) Quebaud M., Courtial M. et Buyle-Bodin F., ‘le recyclage des matériaux de démolition’, Matériaux et structure, travaux, n° 721, France, juin 1996

(Ravindrarajah et Tam,1985) Ravindrarajah RS, Tam TC, Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Magazine of concrete research,1985 ; 37(130) :29-38.

(Saucier F et al, 1995) Saucier F., Cormier B. et Duchesne C., (1995), Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.

(Thai-Hoa V 2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquée à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université Toulouse. Pp.24-25.

(Tremblay, 1997). Tremblay, S., 1997. Méteodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraineur D’air Sur La Maniabilité. Université de Laval.

Références bibliographiques

(UNPG, 2001). Union Nationale des Producteurs de Granulats. Le marché des granulats. Cité dans (Raphaël, 2003).

Vahedifard et al. (2010), Vahedifard, F., Nili, M. & Meehan, C.L., 2010. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12), pp.2528–2535.

(ZDIRI M 2008). ZDIRI, Mustapha : Etude de formulation et comportement mécanique des bétons compacts au rouleau (BCR) application routières-cas des matériaux de jagement locaux, Tunisie 2008.

(ZDIRI &all, 2005). ZDIRI, Mustapha NEJf, Jarnel BEN OUEZDOU, Monji EL OUNI Mohamed Ridha : Formulation et Simulation des bétons compactés au rouleau : application aux matériaux de gisement locaux, Colloque CMEDIMAT 2005.