



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



Université Amar Têlidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : MECHRAOUI Slimane & CHATTA Abdallah

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Thème

ETAT DE L'ART SUR LES BETONS COMPACTES AUX ROULEAUX « BCR »

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
DJOUDI Amina	MCB	Président
FERHAT Ahmida	MAA	Examineur
GOUAL Idriss	Professeur	Rapporteur

Promotion : Juin - 2021

الإهداء

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أحب الخلق أجمعين
مجد وعلى آله الطيبين.

وبعد :

بأصدق معاني الشكر والعرفان وأسمى عبارات الامتنان أهدي عملي
المتواضع:

إلى سر نجاحي ونور دربي " والدي الحبيب " أطال الله في عمره
ورزقه الصحة والعافية.

إلى نبع المحبة والوفاء وأغلى ما أملك "أمي الغالية" حفظها الله
وأطال في عمرها.

إلى كل أسرتي وخاصة إلى من هم فخري وسندي في الحياة
بخوتي . مصطفى - علي - يوسف

إلى كل أصدقائي عامة ورفيق دربي خاصة: سليمان توفيق

إلى جميع أساتذتي الكرام وإلى كل من جمعني بهم مشعل العلم.

عبدالله شكة

الإهداء

الحمد لله الذي تتجلى بقدرته أحلك الظلمات وتنفك برحمته
أصعب الأزمات والصلاة والسلام على حبيب الرحمن وخير الأنام
محمد بن عبد الله وعلى آله وصحبه وسلم تسليماً كثيراً .

و بعد:

فإني أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع:
إلى رمز الصفاء والحنان ومأوى الأمان إلى أول من نطق بهما
اللسان أبي وأمي حفظهما الله ورعاهما ورزقهما الصحة والعافية
فأسأل الله العظيم أن يجمعني بهما في زمرة الشهداء والصالحين
وحسن أولئك رفيقاً.
إلى أخوتي وأخواتي طاهر علي فاطمة ماجدة ضحى مرام والذي
أسأل الله أن يوفقهم في حياتهم ويجعلهم من الصالحين.
إلى كل الأهل والأقارب و أساتذتي الكرام وكل من جمعني بهم
السنوات وإلى كل من كان له يد في مساعدتنا على إتمام هذا البحث.
إلى أصدقاء العمر كل باسمه و إلى عبدا لله خاصة أسأل الله أن
يوفقهم وأن يحفظهم ويطيل في أعمارهما.

سليمان توفيق مشراوي

شكر وعرفان:

عملاً بقوله صلى الله عليه وسلم

"من لا يشكر الناس لا يشكر الله" فإننا نرف جزيل الشكر إلى
الأستاذ المشرف الأستاذ الدكتور: قوال إدريس الذي أشرف على
هذا العمل وتابعه من أوله إلى آخره فله منا أسمى معاني التقدير
والاحترام ونسأل الله تعالى أن يبارك فيه ويحفظه.

إلى الأستاذة: أمينة الجودي على تقبلها رئاسة لجنة المناقشة.

وإلى الأستاذ: فرحات أحيدة على تقبله تقييم ومناقشة عملنا هذا.

التي كل من مد لنا يد العون والمساعدة من قريب أو من

بعيد ولا نجد لكم جزاء إلا قوله صلى الله عليه وسلم "من صنع إليهم

معروف فقل لفاعله جزاءك الله خير فقد أبلغ في

الثناء"

RESUME

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de ce mémoire de master comporte une étude bibliographique sur le Béton Compacté au Rouleau (BCR).

En se basant sur les différents travaux et résultats sur le BCR (formulations, caractérisation) décrits dans ce mémoire, nous avons pu recueillir un certain nombre d'informations et tirer des conclusions et des synthèses sur ce matériau.

Le BCR est un béton raide d'affaissement nul, généralement utilisé pour la construction des barrages et les pavages. Sa mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé.

Le BCR est distingué par sa consistance qui est identique à celle d'un sol humide sauf que l'énergie de compactage est supérieure à celle de la vibration usuelle chez les bétons conventionnels « BC ». Il présente une grande résistance et une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges des équipements lourds.

Les avantages précités dans ce travail, tel que les bonnes résistances du BCR appuyés par des études de formulation, de résistance et d'une évaluation économique montrent que le BCR est un matériau très convenable et rentable pour la construction et l'entretien des chaussées en milieux urbains et rurales.

Mots clés : *Béton Compacté au Rouleau « BCR » – Formulation– Propriétés physicomécaniques– Techniques de mise en œuvre– Chaussées.*

Abstract

The research work carried out as part of this master thesis includes a bibliographical study on Roller Compacted Concrete (BCR). Based on the various work and results on BCR (formulations, characterization) described in this thesis, we were able to collect a certain amount of information and draw conclusions and syntheses on this material.

BCR is stiff zero-sag concrete, typically used for dam construction and paving. Its installation requires external compaction to be well consolidated.

BCR is distinguished by its consistency which is identical to that of wet soil except that the compaction energy is greater than that of the usual vibration in conventional "BC" concrete. It has great strength and good durability therefore, is well suited to heavy equipment loads.

The aforementioned advantages in this work, such as the good strengths of BCR supported by formulation, strength and economic evaluation studies show that BCR is a very suitable and cost effective material for the construction and maintenance of roadways in urban and rural settings.

Keywords: Compacted Concrete with Roller *"BCR" - Formulation–
Physicomechanical properties - Installation techniques - Pavements.

ملخص

يتضمن العمل البحثي الحالي دراسة حول الخرسانة المضغوطة الأسطوانية (BCR) ، وهي عبارة عن خرسانة جافة (خليط من الماء والأسمنت والركام والمضافات وإضافات الأسمنت إذا لزم الأمر) والتي تتطلب توفير طاقة ضغط خارجية ليتم دمجها جيدًا من أجل التطبيق في هندسة الطرق واستخدام المواد من الرواسب المحلية مع خصوصية جرعة منخفضة من الأسمنت.

تم تطوير BCR على طول خطين مختلفين: BCR للسدود و BCR للرصيف. تختلف الصياغة وطرق البناء وطرق التنسيب حسب نوع BCR. يستمر استخدام هذا النوع من المواد في النمو في جميع أنحاء العالم. تم استخدام BCR لأول مرة لبناء سد HORSESHOE BEND في نيوزيلندا في عام 1960. وفي عام 1970 تم توسيع استخدامه لبناء الطرق. توضح المزايا المذكورة أعلاه في هذا العمل ، مثل نقاط القوة الجيدة لـ BCR المدعومة بالصياغة والقوة ودراسات التقييم الاقتصادي ، أن BCR هي مادة مناسبة جدًا وفعالة من حيث التكلفة لبناء وصيانة الطرق في المناطق الحضرية والريفية .

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : *valeur de l'indice de serrage K pour procédés de mise en place*

Tableau 3.1 : *Classe de consistance de bétons en fonction du temps VEBE*

Tableau 3.2 : *Valeurs de l'Optimum Proctor modifié et des masses volumiques à l'état humides et à l'état sec pour différents mélanges de BCR.*

Tableau 3.3 : *ordre de grandeur typique de béton plastique et de BCR]*

Tableau 3.5 : *propriétés mécanique de mélanges de BCR formulés avec et sans ajout de filler calcaire*

Liste des figures

Figure 1.1 : *Production et mise en œuvre du BCR*

Figure 1.2 : *Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau*

Figure 1.3 : *Historique de la construction de revêtement en BCR au Québec*

Figure 1.4 : *Les techniques de réalisation utilisées dans la construction de barrages en BCR*

Figure 1.5 : *Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA*

Figure 1.6 : *Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB*

Figure 1.7: *Aire d'entreposage du bois en BCR - Papeterie DOMTAR Québec*

Figure 1.8 : *Zone d'arrêt d'autobus - Ville de Sherbrooke Québec*

Figure 2.1 : *Effets de desserrement et de paroi*

Figure 2.2 : *Paramètres optimum d'un mortier pour BCR]*

Figure 2.3 : *Courbes de Fuller-Thompson modifiées pour différents grosseurs de granulats*

Figure 2.4 : *Relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport V_p/V_{vc} pour des mélanges de BCR sans air entraîné (rapport eau/liant < 0,50))*

Figure 2.5 : *Relation entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné)*

Figure 2.6 : *Évolution de la résistance à la compression de mélanges de BCR formulés avec différents types de ciment.*

Figure 2.7 : *Influence de la teneur en cendres volantes sur la résistance à la compression*

Figure 3.1 : *Dispositif et schéma de Mesure de la consistance (Essai VÉBÉ)*

Figure3.2. *La mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais, en laboratoire et en chantier*

Figure3.3 : *L'état de surface d'un pavage en BCR (a) sans ségrégation, (b) avec ségrégation*

Figure 3.4 : *Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction.*

Figure 3.5 : *Propagation des fissures lors de l'essai de traction par fendage sur cylindre de BCR*

Figure 3.6 : *Moule et charge conçu pour la confection des éprouvettes prismatiques (7x7x28) de BCR*

Figure 3.7 : *Mode de rupture des éprouvettes prismatiques de BCR en flexion*

Figure 3.8 : *Évolution de la résistance à la compression de mélanges de BCR avec et sans Adjuvants*

Figure 3.9: *Influence de la teneur en cendres volantes sur la résistance à la compression*

Figure 3.10 : *Influence de la teneur en cendres volantes sur la résistance à la flexion du BCR*

Figure 3.11 : *Module d'élasticité de différents mélanges de BCR*

Figure 3.12 : *Application d'un produit de cure après compactage du BCR*

Figure 3.13 : *Schéma représentatif de la différence de la distance d'arrêt pour une chaussée en BB et une chaussée en BCR*

Figure 4.1 : *Photographie d'une(a) centrale mobile, (b) central fixe*

Figure 4.2 : *Méthode de transport de BCR*

Figure4.3 : *Mise en place du BCR en pavage*

Figure 4.4 : *Mode de mise en œuvre et de compactages du BCR*

Figure 4.5 : *Transport, mise en place et mûrissement du BCR*

Figure4.6 : *Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR - aire*

Industriel - Montréal

Figure 4.7 : *Contrôle du compactage*

Chapitre 1

1	INTRODUCTION	2
2	DEFINITION DU BCR.....	2
3	HISTORIQUE	4
4	INTERET DU BCR SELON DOMAINES D'UTILISATION.....	8
4.1	BCR pour les barrages	8
4.1.1	Intérêt du BCR pour barrage.....	10
4.1.2	Inconvénients du BCR pour barrage.....	11
4.2	BCR pour pavages.....	12
4.2.1	Intérêt du BCR pour pavage.....	14
4.2.2	Inconvénients du BCR.....	16
5	LES COMPOSANTS DU BCR	17
5.1	Le liant	17
5.2	Les granulats	18
5.3	L'eau de gâchage	19
5.4	Les adjuvants	19
5.4.1	Les adjuvants retardateurs de prise.....	19
5.4.2	Les adjuvants réducteurs d'eau	20
5.4.3	Les entraîneurs d'air	20
5.4.4	Les super-plastifiants.....	20
5.4.5	Les accélérateurs de durcissement.....	21
6	CONCLUSION.....	21

Chapitre 2

1	INTRODUCTION	24
2	MÉTHODES DE FORMULATION.....	24

2.1	Méthodes théoriques.....	25
2.1.1	Viscosité de référence	25
2.1.2	Détermination de la compacité réelle d'une classe granulaire	26
2.1.3	Détermination de la compacité virtuelle d'une classe granulaire.....	27
2.1.4	Compacité virtuelle d'un mélange granulaire	28
2.1.5	Compacité réelle d'un mélange granulaire (ϕ) : notion d'indice de serrage (k)	29
2.1.6	Le logiciel René-LCPC.....	30
2.2	Méthodes empiriques	31
2.2.1	Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	31
2.2.2	Méthode de formulation basée sur le compactage des sols.....	33
2.3	Méthodes semi-empiriques	33
	<i>Étape 1: Sélection d'une granulométrie optimale et calcul du volume des vides.....</i>	<i>34</i>
	<i>Étape 2: Sélection du volume de pâte pour une maniabilité désirée.....</i>	<i>35</i>
	<i>Étape 3 : Sélection du rapport E/C selon la résistance à la compression requise.....</i>	<i>36</i>
3	CONCLUSION.....	38

Chapitre 3

1	INTRODUCTION	40
2	PROPRIÉTÉS DU BCR A L'ETAT FRAIS.....	40
2.1	Maniabilité.....	40
2.2	Masse volumique.....	43
2.3	Teneur en air.....	44
2.4	Ségrégation.....	44
3	PROPRIÉTÉS DU BCR A L'ETAT DURCI.....	45
3.1	Propriétés mécaniques.....	45
3.1.1	Résistances à la compression.....	45

3.1.2	Résistance à la traction.....	46
3.1.3	Résistance à la flexion.....	47
3.1.4	Comparaison entre les résistances mécaniques d'un BCR et un BC.....	48
3.1.5	Effets des adjuvants sur le comportement mécaniquesde BCR.....	49
3.1.6	Effets des ajouts sur le comportement mécaniques de BCR.....	49
3.2	Modulé de d'élasticité.....	52
3.3	Le retrait et le gonflement	53
3.4	La durabilité.....	54
4	CONCLUSION.....	56

Chapitre 4

1	LES PROCÉDÉS DE RÉALISATIONS DU BCR.....	60
2	PRODUCTIONDU BCR	60
3	TRANSPORT DU BCR.....	61
4	MISE EN PLACE DU BCR.....	62
	4.1 Préparation de l'infrastructure	63
	4.2 Répandage et réglage	63
5	COMPACTAGE DU BCR.....	64
	5.1 Opération de compactage	64
6	MÛRISSEMENT.....	67
7	L'EXÉCUTION DES JOINTS.....	67
8	CONTRÔLE DE QUALITÉ.....	67
9	CONCLUSION.....	68
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	70

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le sujet entre dans le cadre des travaux de recherche bibliographique que nous avons effectué sur une technologie considérée comme évolutive en utilisant un nouveau matériau qui est le Béton Compacté au Rouleau.

Qu'est-ce qu'un béton compacté au rouleau « BCR » ?

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

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

Un BCR bien formulé et bien compacté est en mesure de développer des propriétés mécaniques semblables à celles d'un béton conventionnel fabriqué avec le même rapport E/L. Mais le problème majeur du BCR est que ce type de béton, comme les autres types des bétons, peut se fissurer aux effets des actions venant du milieu environnant (t°C, hygrométrie). Ceci va influencer sur la résistance et la durabilité finale du béton élaborer même avec un compactage puissant.

L'utilisation de ce type de matériau ne cesse de croître dans le monde. Le BCR est utilisé pour la première fois pour la construction de barrage de Horseshoe Bend Dam en **Nouvelle Zélande** en 1960. Et en 1970 sont utilisation est élargi pour la construction des routes. En Algérie, le BCR est utilisé pour la

construction du barrage de Koudiat Acerdoune. Son utilisation pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée.

STRUCTUREDUMÉMOIRE

Ce mémoire est devisé en quatre chapitres. Le premier chapitre comporte la définition du BCR, son historique, 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 qui contient les méthodes de formulation de béton compacté au rouleau. Pour préparer des mélanges de BCR, plusieurs méthodes de formulations ont été présentés telles que les méthodes graphiques classiques, la méthode semi empirique et une méthode théorique en adoptant le Modèle d'Empilement Compressible (MEC).

Par la suite le troisième chapitre est consacré au comportement physicomécanique des bétons compactés au rouleau. Les résultats présentés dans cette section ont été tirés d'études expérimentales en laboratoire de certains chercheurs dans ce domaine.

Pour le dernier chapitre comporte différents procédés et techniques de mise en place du BCR pour pavages et pour barrage.

En fin, ce travail est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LE BCR

1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente une revue de la documentation sur la technologie du Béton Compacté au Rouleau (BCR). Il parcourt en premier lieu la notion du BCR puis son historique. Par la suite, les techniques d'utilisation du BCR en corps de barrage et en routes sont couvertes. Les intérêts du BCR selon le domaine d'utilisation sont aussi traités. Enfin, Une description est consacrée aux différents composants du BCR sont présentés.

2 DEFINITION DU BCR

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un béton sec (mélange d'eau, de ciment, de granulats, d'adjuvants et d'ajouts cimentaires si requis) qui nécessite l'apport d'une énergie de compactage externe pour être bien consolidé. Un mélange de BCR contient plus de granulats et moins de pâte que le béton plastique. Ce béton n'est pas armé et sa mise en place se fait sans coffrage. Le BCR possède une consistance nettement moins plastique que le béton conventionnel. Du point de vue structural, un revêtement en BCR est un ouvrage rigide au même titre que toute autre dalle de béton et est soumis aux mêmes critères de conception. Le BCR s'est développé selon deux types: le BCR pour les structures de contrôle des eaux (barrages) et ouvrages massifs ; et BCR pour pavages (routes, dépôts de stockage...).

Correctement formulé, un mélange de BCR permet de développer rapidement des résistances mécaniques élevées et possède une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges très lourdes. À titre d'exemple, un mélange de BCR avec une teneur en liant de l'ordre de 300 kg/m^3 et un rapport eau/liant de $0,35$ peut développer une résistance à la compression de 40 MPa et une résistance à la flexion de 5 MPa après 3 jours de mûrissement [6]. Ces mélanges de BCR à haute performance possèdent également une bonne durabilité aux conditions sévères d'utilisation sur le plan de la résistance à la fatigue, de la durabilité aux chocs thermiques et à l'abrasion. Outre leur faible teneur en pâte, les mélanges de BCR se caractérisent aussi par leur faible susceptibilité à la

fissuration due au retrait de séchage. Le suivi du comportement des revêtements construits ces dernières années montre que l'espacement moyen de la fissuration est en général supérieur à celui normalement rencontré pour les bétons usuels.

Le BCR est produit en centrale fixe ou mobile. Il est transporté au chantier à l'aide de camions à benne basculante. La mise en œuvre du BCR est réalisée à l'aide d'équipements de construction conventionnels. La mise en place est effectuée par des finisseurs à enrobé bitumineux ou à haut pouvoir de compactage, tandis que le compactage est réalisé par des rouleaux tandems à cylindres d'acier lisses. Une fois consolidé, le BCR possède une telle capacité portante qu'il permet la circulation de véhicules sur sa surface au jeune âge. La figure 1.1 montre le processus de production, de déchargement, de mise en place et de compactage du BCR. À l'échelle du matériau, le volume de pâte étant inférieur à celui des bétons plastiques, le BCR se caractérise par un squelette granulaire plus compact. La formulation du mélange doit limiter au maximum le volume de vide. Étant donné leurs faibles teneurs en liant, les gros granulats sont, en général, enrobés d'une mince couche de pâte. Dans certains cas, il arrive même qu'ils se touchent les uns aux autres.



Figure 1.1 : *Production et mise en œuvre du BCR*

La figure 1.2 présente une comparaison entre le BCR et d'autres matériaux selon la teneur en liant et la teneur en eau. Tel qu'il est montré sur cette figure,

le BCR est utilisé comme couche de roulement en milieu industriel et routier. Pour certaines applications, il est possible, et même quelques fois requis, d'appliquer un enrobé bitumineux sur la surface de BCR.

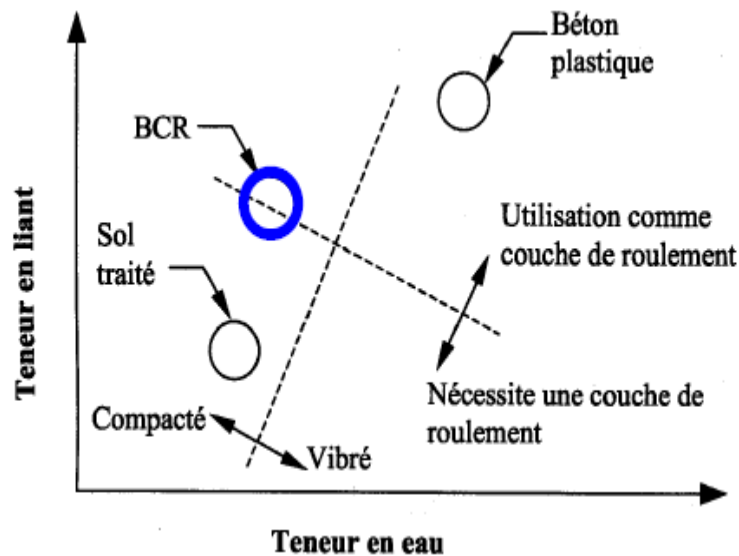


Figure 1.2 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau [6]

3 HISTORIQUE

Les premières utilisations du BCR sous forme de Bétons très maigres et compactes au rouleau pour la construction de barrages reviennent à 1960.

Des chercheurs tels que Jouffroy et Sauterey [1] ont considéré que l'emploi des liants hydrauliques ou pouzzolaniques dans les structures de chaussées a commencé dès le 1er siècle avant J-C par les Romains, puisqu'une proportion de liant (2 parties de pouzzolane naturelle +1 partie de chaux) a été destinée et utilisée pour lier les pierres des chaussées romaines. Ces chaussées, assurant le roulage des chars, sont composées de dallettes et sont considérées comme les ancêtres des chaussées rigides en béton.

En France, les chaussées en béton ont été réalisées au début du 20^{ème} siècle sur quelques tronçons de routes d'approvisionnement dans la zone de Grenoble entre les cimenteries et les carrières. C'est en 1924 que la direction des Ponts et Chaussées du Pas-de-Calais, a lancé un programme de transformation d'empierrements et d'anciens pavages en béton, notamment sur la route

Nationale N° 43 entre Lillers et Chocques [1]. Après ce succès plusieurs autres projets ont été réalisés dans le département du Nord pour la construction des routes nationales et de voies départementales de longueur totale dépassant 100 km. Le procédé consiste à la récupération des pavés pour construire des bordures et des caniveaux afin de caler la chaussée en béton. Il ont utilisé aussi le sable de pavage de l'ancienne chaussée comme une couche de base. Cette couche a été d'abord étalé puis compacté, sur laquelle un béton relativement sec était mis en place et cylindré. Ce procédé peut être considéré comme l'ancêtre du Béton Compacté. La chaussée ainsi construite, est composée de deux couches, une couche inférieure réalisée avec des matériaux roulés et un faible dosage en ciment (250 kg/m^3), alors que la couche supérieure est plus mince et plus fortement dosée (400 kg/m^3) et elle est à base de granulats durs concassés. Les deux couches sont exécutées l'une après l'autre sans interruption afin d'assurer une forte adhérence [1]

Plusieurs autres applications ont été réalisées en Europe en général. Jeuffroy et Sauterey [1], ont indiqué que la **Belgique** avait réalisé, à partir de 1912, des routes et des aires bétonnées sur les accès des mines. **L'Allemagne** a réalisé aussi, à partir de 1933, les premiers grands chantiers de construction d'autoroutes avec chaussées rigides.

Dans le **continent Américain**, Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930 [2]. Aux **USA** la première chaussée rigide, d'après Huang [3], a été construite en 1893 à Bellefontaine (Ohio) et la deuxième en 1908 à Michigan. Les statistiques de 2001 montrent que près de 95 000 km au USA ont été construits en béton hydraulique [3]. Selon Gauthier et al. [4, 5], la première construction d'un revêtement en BCR en **Amérique du Nord** date depuis 1942 par le corps des ingénieurs de l'armée américain (US Army Corps of Engineers) qui ont construit une voie à Yakima.

Au **Canada**, Gauthier et Marchand ont précisé [4] que la première application du BCR date depuis 1976, et comporte la réalisation d'une aire de stockage de bois d'une surface de 52 000 m² sur l'Île de Vancouver par British Columbia Forest Company (BCFP). Actuellement on construit des pavages en

BCR avec des épaisseurs variant de 20 cm à un mètre pour la construction de rues, d'aires industrielles et d'aires d'entrepôts. Le plus important projet réalisé à ce jour est la construction d'un pavage de 543 500 m² à l'usine Saturn au Tennessee.

La figure 1.3 présente l'ampleur en termes de superficie (exprimée en m²) et de volume (exprimé en m³) des projets de BCR réalisés au Québec au cours des dernières années. Le premier projet d'importance a été la construction, en 1995, d'un revêtement de 25 000 m² (8 750 m³) à la Fonderie Horne de Métallurgie Noranda inc. pour l'entreposage de scories de laitier concassé. Le revêtement de BCR à haute performance de 350 mm d'épaisseur devait résister à de grandes sollicitations, aux charges d'impact causées par le concassage de même qu'à de forts gradients thermiques. À 7 jours de mûrissement, le mélange de BCR a développé une résistance moyenne à la compression de 55 MPa et une résistance moyenne à la flexion de 5 MPa.

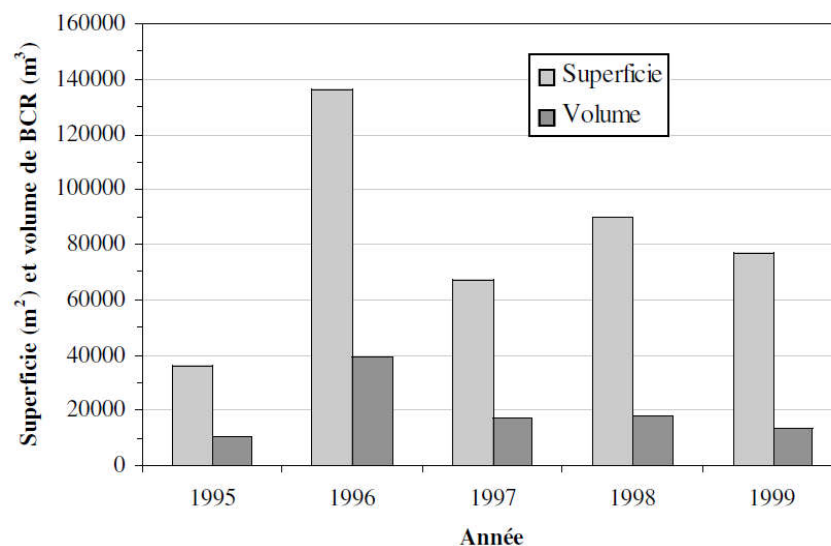


Figure 1.3 : Historique de la construction de revêtement en BCR au Québec

Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en **Amérique, Espagne, Australie** et d'autres pays. On remarque aussi, d'après Gauthier, la majorité des revêtements en BCR construits dans le monde (USA, Canada, Espagne...) ont été fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale compris entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs.

On constate aussi une grande utilisation des ciments ternaires composés de ciment, de laitiers et de fumée de silice ou composés de ciment, de cendres volantes et de fumée de silice.[6]

En Afrique, le BCR reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est développée que pour la construction des barrages et son utilisation dans le domaine des routes n'est pas encore répandue. [7].

Au Maroc, le BCR est utilisé, en 1989, pour la construction du barrage d'El Koreima près de la capitale Rabat. D'une hauteur de 26 m, il a consommé un volume de 25 000 m³. C'est un exemple intéressant car le projet a été délibérément abordé dans une optique de petit barrage. L'approche utilisée (moyens réduits en matériel, main d'œuvre abondante) s'apparente en effet aux méthodes de construction des barrages en maçonnerie, telles qu'on peut les pratiquer par exemple dans les Monts Mandara au Nord Cameroun. Une comparaison de coûts effectués par les services de l'hydraulique marocains a démontré que la solution B.C.R. a conduit à des économies d'environ 40 % par rapport à des ouvrages classiques en maçonnerie

En Tunisie, le BCR ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que le barrage d'Errmil à Bouarada, Barrage Fom Elkhanga à Tozeur, Barrage ElFar à Hammamet, Barrage El Moula à Tabarka.

En Algérie, l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée. Par contre, il est utilisé pour la construction du barrage de Koudiat Acerdoune qui est un barrage de type poids arqué en béton compacté au rouleau (BCR), projeté sur l'oued Isser au niveau de la commune de Maala, dans la wilaya de Bouira en Algérie. Il est construit entre 2002 et 2008, il mesure 121 mètres de haut, 425 mètres de longueur de crête et retient un volume de 640 millions m³ d'eau. Il est classé comme le deuxième plus grand barrage en Algérie, après celui de Beni Haroun [6]. Ce projet est estimé à 242M€, il est mis en service le début 2009.



Figure 1.4 : Barrage en BCR de koudiat acerdoune wilaya de Bouira en Algérie

4 INTERET DU BCR SELON DOMAINES D'UTILISATION

4.1 BCR pour les barrages

Pour faire des économies et résoudre le problème d'utilisation des grandes quantités de terre dans les digues de retenue, le BCR présente une alternative en

tant qu'un matériau utilisé dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces. L'avantage de cette technique est que ce matériau permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval.

L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du Barrage. Ce matériau, caractérisé par un affaissement nul, est produit dans des centrales de malaxage implantées à proximité du site, puis il est transporté à pied d'œuvre par des convoyeurs ou des camions. Le liant utilisé est généralement le ciment alors que le dosage est nettement plus faible comparé à celui d'un BCR.

Pour ces ouvrages, la dimension maximale du granulat varie de 40 à 150 mm [5]. Pratiquement et après être déversé, le mélange de BCR est étalé au moyen de niveleuses ou de bulldozers mécaniques puis il est compacté au moyen de rouleaux compacteurs vibrants. Après durcissement, la résistance à la compression du BCR pour barrage varie de 7 à 20 MPa. [8].

Pour la réalisation d'ouvrages de masse comme les barrages, il est recommandé l'utilisation d'ajouts minéraux tels que les cendres volantes puisque la quantité de ciment utilisée est faible. Cette substitution de ciment permet de réduire le dégagement de chaleur d'hydratation lors du coulage et de durcissement [8]. 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 la Figures 1.5





Figure 1.5 : Les techniques de réalisation utilisées dans la construction de barrages en BCR

4.1.1 Intérêt du BCR pour barrage

On considère en général que le coût du m³ de B.C.R. mis en œuvre dans un barrage poids est en moyenne deux fois inférieur à celui d'un béton classique (non compris des traitements particuliers entre couches). Cette proportion tend à augmenter avec les quantités mises en œuvre. Mais ce rapport est évidemment moins élevé si l'on considère l'ensemble de l'ouvrage incluant le traitement de la fondation, le déversoir et les ouvrages annexes. La comparaison entre le barrage poids classique et le barrage poids en B.C.R. est facilitée par un certain nombre de constantes entre ces deux solutions : provenance souvent identique des matériaux, travaux de fondation semblables déversoir identique ; profils voisins. Par contre la comparaison avec d'autres solutions telles que barrages en terre ou en enrochements, à zones ou à masques, nécessite une étude approfondie de la qualité, de la quantité et de la provenance des matériaux, ainsi que des conditions de fondation. Les ouvrages récents réalisés en B.C.R. ont souvent fait apparaître que l'adoption de ce procédé permet d'espérer une économie globale de 10 à 20 % par rapport à des solutions terre ou enrochements, pour autant que les fondations soient favorables à la réalisation d'un barrage poids.

Un des atouts majeurs du B.C.R. est de permettre des cadences élevées pour la réalisation du barrage, le facteur limitant étant en général la centrale à béton. On atteint couramment des rythmes d'élévation de l'ouvrage de 1m par jour. Cet atout peut donc s'avérer primordial dans certains cas de contraintes climatiques particulières ou de périodes d'étiage courtes. De plus l'expérience a

montré que les barrages en B.C.R. pouvaient, sans grands dommages, supporter un déversement en cas de crue importante survenant pendant la construction.

Le BCR possède des avantages incontestables liés aux gains de temps et d'argent. On estime que le coût approximatif du BCR est 20% à 30% plus faible que celui du béton de masse conventionnel. Cette différence dans les coûts s'explique par :

- le faible volume des matériaux cimentaires par rapport à celui des granulats, qui constituent environ 85% du volume du BCR;
- les faibles coûts de production, de mise en place et de compactage (pas ou peu de coffrage)
- le rythme de construction rapide (taux de mise en place élevé)

Le taux de mise en place élevé du BCR permet, comme dans le cas de certains grands projets, de réduire le temps de construction d'une à deux années comparativement à la solution en remblai. D'autres avantages liés à une construction rapide incluent aussi les coûts administratifs réduits ainsi que les bénéfices découlant d'une mise en service plus rapide de l'ouvrage. En somme, l'utilisation du BCR pour la construction d'un ouvrage confie des avantages économiques sur tous les aspects liés au temps.

4.1.2 Inconvénients du BCR pour barrage

Comme il y a des avantages pour le BCR, il a aussi des inconvénients. Le principal inconvénient pour les BCR est le débit de production qu'il est possible d'obtenir avec des équipements de production conventionnels. Dans la plupart des projets réalisés jusqu'à maintenant, les malaxeurs à béton conventionnel utilisés pour la production des BCR ne semblent pas nécessairement conçus pour malaxer des BCR qui ont une consistance beaucoup plus sèche. Donc, pour obtenir un mélange homogène, les volumes des BCR à malaxer doivent être moindres ce qui rallonge le temps de malaxage et diminue le taux de production.

Dans les grands projets de construction en BCR, on utilise de plus en plus des installations de production en continu (similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux) qui ont des taux de production beaucoup plus importants.

4.2 BCR pour pavages

Par définition, le BCR pour pavages tient son nom de la technique de compactage employée pour son serrage et sa densification. Les chercheurs expliquent la différence entre les techniques de BCR en barrage et pavages par le fait que les procédures pour la construction d'un pavage en BCR exigent des contrôles plus rigoureux que dans le cas des barrages. Ce matériau contient les mêmes constituants de base que ceux employés pour le BC tel que ciment, granulats (sable et gravier) et eau. Les techniques de mise en œuvre utilisent, pour l'épandage, le même matériel utilisé pour les revêtements en Béton Bitumineux (*BB*) à haute densité. Le mélange employé est raide et ferme et il faut le compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques. De plus, une fois durci, La résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPa. L'utilisation du BCR pour les pavages varie d'une épaisseur de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts (Figure 1.6). [6].

La dimension maximum du granulat utilisé pour les BCR des pavages est limitée à 20 mm dont l'objectif de résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse [8].



Figure 1.6 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA [8]

Du point de vue durabilité, le revêtement en BCR a montré des 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.

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 chaussée en BCR est plus forte comparativement à celle de la chaussée en BB. 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 1.7). 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 [8, 9]. En outre, selon Saucier et al [10] et d'après une étude du coût du cycle de vie faite en 1998 par ERES Consultants [11], 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 34 ans.

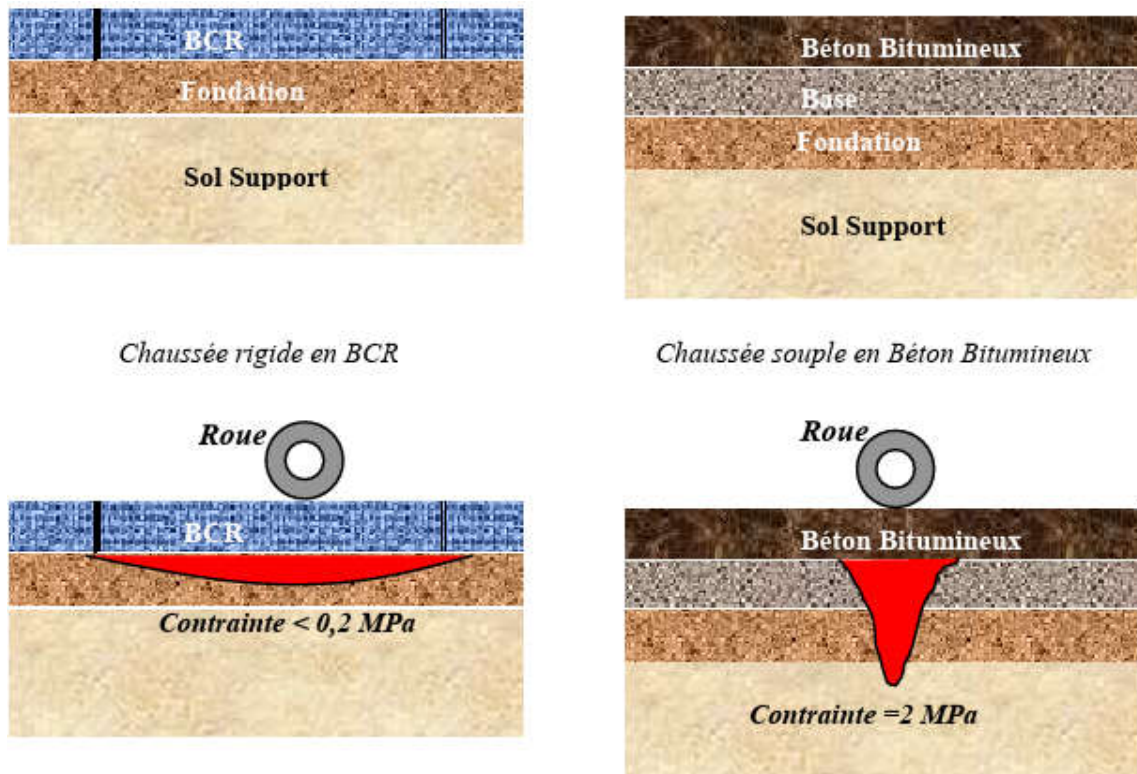


Figure 1.7: Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB [11]

4.2.1 Intérêt du BCR pour pavage

Selon la classification, le pavage en BCR est considéré comme étant une chaussée rigide.

D'après Gagné [12], ce matériau présente des bonnes performances (résistance et durabilité) et il est employé pour supporter des lourdes charges puisque sa résistance en flexion est élevée. Pour sa réalisation, il nécessite beaucoup moins de travaux préparatifs tels que les terrassements, le compactage et la préparation de fondation. En service, il présente une bonne rigidité. Le revêtement en BCR, pour les voies d'accès et les routes, offre un certain nombre d'avantages comme son prix de revient en considérant les frais d'entretiens, son revêtement en béton de bonne résistance ainsi que sa forte capacité portante. Comparés aux mélanges de BC et à résistance mécanique égale, les mélanges de BCR ont une teneur en liant plus faible. Les travaux cités dans les références [4-12, 8, 10-13], font apparaître plusieurs avantages du BCR, qui sont résumés comme suit:

- 👉 Bonne résistance à la compression: pour supporter les charges concentrées lourdes,
- 👉 Bonne résistance à la flexion: pour supporter les lourdes charges répétées sans affaissement et répartir uniformément les charges sur la couche de fondation.
- 👉 Bonne résistance au cisaillement: pour résoudre le problème d'orniérage.
- 👉 Haute densité et faible absorption: donnant lieu à une bonne durabilité,
- 👉 Faible teneur en eau: permettant d'augmenter les résistances mécaniques et de réduire le retrait (Figure 1.8).
- 👉 Ne nécessite pas d'armature de résistance, ni goujons, ni tirants: permettant des économies de temps pour la mise en place et réduisant ainsi le coût de construction.
- 👉 Ne nécessite ni coffrages ni travaux de finition: permet d'accélérer la mise en œuvre et réduit le coût et la main-d'œuvre (Figure 1.8).
- 👉 Technologie peu complexe comparée au dallage en béton armé.
- 👉 Surface claire et rigide: La clarté de la surface permet des économies d'énergies d'éclairage et la rigidité permet une résistance à l'abrasion.
- 👉 Les procédés de confection et de transport avec des usines en continu ou des convoyeurs et les techniques de mise en place permettent d'enregistrer des économies sur le coût global de la construction (Figure 1.9)
- 👉 Moins de travaux d'entretien: L'organisme ERES [10] indique dans son rapport 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.
- 👉 Peu de déformation: La rigidité du BCR empêche la formation de déformations d'autre part, le BCR ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur.
- 👉 Une bonne adhérence: Les études ont démontré que le BCR permet en général une bonne adhérence qui réduit la distance d'arrêt pour être plus

courte comparée à celle du BB, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.

- ☛ Des économies de carburant: La chaussée souple augmente, jusqu'à 20 %, la consommation de carburant puisqu'elle fléchit plus que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à déduire qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple.



Figure 1.8: Aire d'entreposage du bois en BCR - Papeterie DOMTAR Québec [8]



Figure 1.9 : Zone d'arrêt d'autobus - Ville de Sherbrooke Québec [12]

4.2.2 Inconvénients du BCR

Une étude bibliographique basée sur les références [4–12–10], a révélé les inconvénients du BCR, qui sont résumés par les insuffisances des paramètres suivants :

- ☛ La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR représentent le majeur inconvénient de cette technique. Puisqu'il assure le confort au roulage sur un revêtement en BCR, l'uni a présenté un problème permanent limitant les applications du BCR sur des routes à fortes vitesses. L'uni d'un pavage en BCR est exprimé par la variation positive ou négative de la forme de la surface d'une chaussée par rapport à un plan horizontal. Cet uni n'est pas tout à fait uniforme, dont on peut sentir des ondulations longitudinales et transversales légères.
- ☛ Malgré l'effort puissant de compactage, la texture de la surface d'un revêtement en BCR est relativement ouverte comparée à celle du BB. Elle

peut être mesurée à l'aide de l'essai de tache de sable. Selon l'ASTM E 965, cet essai permet de déterminer, moyennant la quantité de sable déversée, la profondeur moyenne de la macrotecture de la surface. Du point de vue équipement, on peut appliquer d'autres méthodes pour mesurer la texture d'un revêtement telles que le laser, le texturomètre et la stéréoscopie

5 LES COMPOSANTS DU BCR

L'analyse des composants du BCR montre que c'est un mélange de liant (ciment et d'eau), de granulats (de graviers et de sables) et des additions éventuelles d'adjuvants[7].

5.1 Le liant

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

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

- 1) Le ciment Portland : CPA-CEM J, CPI-CEM II dont la classe varie en fonction des performances voulues.
- 2) Les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre : CHF-CEM III, CLK-CEM III, CPZCEM IV, CLC-CEM V. Ces ciments présentent un début de prise plus lent et un durcissement plus progressif et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du BCR.

Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m³, soit une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs.

Il faut noter qu'une teneur trop élevée de ciment favorise les fissures, augmente le coût de production et ne permet pas nécessairement une augmentation des performances [7].

5.2 Les granulats

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

Les granulats peuvent être roulés (sable siliceux) ou concassés (sable calcaire, gravier, Grave...).

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, Le fuseau granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions (exemple : 0/3 - 3/8 - 8/16).

Toutes les fractions granulométriques doivent avoir un indice de concassage supérieur à 30% dans le cas d'un trafic trop faible et environ 100% dans le cas d'un trafic élevé. • Ces granulats ont un indice de plasticité non mesurable et une teneur en matière organique inférieure à 0.2 %. Il faut noter que le choix d'un diamètre élevé a comme avantages :

- Une économie d'énergie à la préparation des matériaux ;
- Une résistance mécanique plus élevée à dosage de liant constant ;
- Une amélioration du transfert de charges aux joints en l'absence de dispositif particulier.

Quant aux granulats fins, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc une bonne compacité à l'état durci. Toutefois, un pourcentage élevé de fines entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place. [7]. Pour cela, le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires (comme les cendres volantes, filler calcaire, le fumet de silice....) permet de diminuer la chaleur d'hydratation et par conséquent défavorise l'apparition des fissures, de faire d'économie sur le coût du projet et permet parfois une augmentation des performances du BCR.

5.3 L'eau de gâchage

Le BCR étant un béton sec à affaissement nul. Sa teneur en eau doit donc être faible. Elle est de l'ordre de 4 à 6%, fixé par le laboratoire lors de l'essai Proctor modifié. Quant à la teneur en eau au chantier, on doit tenir compte des conditions atmosphériques et de transport. L'eau est de qualité potable avec une teneur en sels dissous inférieurs à 1g/l et une teneur en matière de suspension inférieure à 0.5%.

5.4 Les adjuvants

Un adjuvant est défini comme étant un produit chimique qui est additionné au béton selon une proportion n'excédant pas 5% de la masse totale du ciment et ceci dans le but d'améliorer ou de modifier certaines de ses propriétés. Il est incorporé au cours du malaxage ou au cours d'un malaxage complémentaire avant la mise en œuvre du béton. Les adjuvants sont distingués par leur caractère chimique, différent de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du BCR. Ils sont organiques ou inorganiques selon leur composition chimique.

Gauthier et Marchand [4], ont indiqué que la plupart des adjuvants chimiques employés pour la fabrication des BC peuvent être employés pour le BCR. Le dosage des adjuvants nécessaire à la fabrication des BCR est largement supérieur à celui du BC afin d'améliorer ces performances. En effet, puisque les revêtements en BCR ne contiennent pas d'armatures alors les faibles teneurs en ions chlorures en solution dans certains adjuvants chimiques n'ont pas d'effets néfastes. Cependant, il faut prendre des précautions car certains des adjuvants accélèrent ou retardent la prise du BCR comme c'est le cas pour les plastifiants et les super-plastifiants. [6].

Les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

5.4.1 Les adjuvants retardateurs de prise

En général, les retardateurs ralentissent l'action de prise de la pâte. Ils n'altèrent ni la nature ni la composition des éléments et des produits d'hydratations. Ces agents permettent d'allonger le délai de prise afin de

procéder à la mise en œuvre du BCR. Ainsi, les délais normalement spécifiés pour la fabrication, la mise en œuvre et la réalisation des joints horizontaux et verticaux peuvent être prolongés aussi [6].

5.4.2 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.

5.4.3 Les entraîneurs d'air

On opte couramment à l'utilisation des entraîneurs d'air malgré que la formation de vides d'air sphériques par l'emploi de ces agents dans les mélanges de BCR soit plus difficile à produire que dans le cas des BC. Cette difficulté est expliquée par l'insuffisance de la quantité d'eau nécessaire pour entourer les bulles d'air formées dans un mélange de BCR. L'action recherchée par des agents entraîneurs d'air est de faciliter la formation des bulles en diminuant la tension de surface de l'eau et en fixant les bulles d'air formées durant le malaxage. Par analogie avec l'idée de Baron et Olivier, un BCR courant sans ajouts d'agents

Les entraîneurs d'air, contient couramment une quantité de bulles d'air dont le diamètre est généralement supérieur à un millimètre. Ces bulles d'air formées dans le BCR durci constituent le phénomène d'air occlus. En effet l'air occlus formé n'est pas comparable aux petites bulles qui sont fixées par l'ajout des entraîneurs d'air. Généralement, un BCR à air Entraîné contient un volume de 5 à 6% d'air.

5.4.4 Les super-plastifiants

Les super plastifiants, tels que définis par Baron et Olivier, sont des produits défloculants qui dispersent très efficacement les grains de ciment, ainsi que les autres éléments fins et ultrafins. Les superplastifiants peuvent agir comme des réducteurs d'eau alors ses effets sont plus forts et très différents des réducteurs d'eau usuels.

5.4.5 Les accélérateurs de durcissement

Les agents accélérateurs de durcissement sont à base des sels minéraux. Le plus employé est le chlorure de calcium (CaCl_2). Ce produit favorise la formation et la croissance du silicate de calcium hydraté C-S-H. D'autres produits comme les sels de magnésium agissent comme des accélérateurs dont leurs effets sont identiques à ceux du chlorure de calcium. Ce dernier demeure l'accélérateur de durcissement le plus employé car il est le plus puissant et le plus économique. Par contre, pour des zones connues par des températures élevées, ces accélérateurs sont caractérisés par un dégagement de chaleur d'hydratation très important qui peut faire fissurer le BCR.

Cependant, ces adjuvants employés à fort dosage peuvent avoir un effet retardateur de prise. L'utilisation de certains adjuvants comme les accélérateurs de prise et les fluidifiants dans un chantier de BCR n'est pas courante, car ils 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...). [7].

6 CONCLUSION

La technologie des BCR est éprouvée et de plus en plus utilisée dans la construction des barrages et routes.

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les BCR comportant la définition des BCR ; son historique et ses composants. Les intérêts du BCR, selon domaine d'utilisation, de point de vue économique et technique sont aussi présentés dans ce chapitre.

Ce chapitre nous a permis de conclure que :

- les BCR sont particulièrement bien adaptés pour la construction de pavages très sollicités.
- Durée de vie plus longue que celle d'un pavage en asphalte-
- Plus économique qu'un pavage conventionnel en béton
- Rapidité de construction

- Coûts d'entretien plus faibles (par rapport à BB)
- Technologie de production et de mise en place simple et rapide (ni coffrage ni armature)

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	2
2	DEFINITION DU BCR.....	2
3	HISTORIQUE.....	4
4	INTERET DU BCR SELON DOMAINES D'UTILISATION	8
4.1	BCR pour les barrages	8
4.1.1	Intérêt du BCR pour barrage	10
4.1.2	Inconvénients du BCR pour barrage	11
4.2	BCR pour pavages.....	12
4.2.1	Intérêt du BCR pour pavage.....	14
4.2.2	Inconvénients du BCR	16
5	LES COMPOSANTS DU BCR.....	17
5.1	Le liant	17
5.2	Les granulats	18
5.3	L'eau de gâchage	19
5.4	Les adjuvants.....	19
5.4.1	Les adjuvants retardateurs de prise.....	19
5.4.2	Les adjuvants réducteurs d'eau	20
5.4.3	Les entraîneurs d'air	20
5.4.4	Les super-plastifiants.....	20
5.4.5	Les accélérateurs de durcissement.....	21
6	CONCLUSION	21

CHAPITRE 2

METHODES DE FORMULATIONS DU BCR

1 INTRODUCTION

L'étude de la formulation du BCR consiste à définir les proportions massiques ou volumiques optimales des mélanges des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, pour pouvoir réaliser un béton dont les propriétés soient celles recherchées pour la construction routière ou des barrages ; Peu importe la méthode de formulation utilisée, un mélange de BCR doit généralement se conformer à certaines exigences, parmi lesquelles, on peut citer :

- la teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimum.
- le rapport E/C du mélange doit aussi être ajusté de manière à permettre une maniabilité optimale menant à l'obtention d'une densité in situ optimale avec le rouleau compacteur.
- la teneur en eau du mélange doit être maintenue juste en dessous d'une certaine valeur laquelle le passage du rouleau provoque des ondulations du béton à l'état frais, et juste au-dessus d'un seuil où une consistance plus sèche du mélange produirait un accroissement de la ségrégation.
- les proportions entre les différentes classes granulaires doivent être fixées de sorte à atteindre la densité requise et à produire une surface fermée.

Indépendamment de la méthode de formulation employée, les propriétés du mélange de BCR doivent être mesurées en laboratoire avant le début des travaux. La mesure des propriétés du BCR à l'état frais (maniabilité, masse volumique) et durci (résistance à la compression et à la traction) permet de vérifier si les exigences techniques ou celles du devis sont respectées.

2 MÉTHODES DE FORMULATION

La plupart des méthodes de formulation généralement utilisées pour le béton conventionnel ne sont pas directement applicables au BCR. Nous pouvons distinguer trois grandes catégories de méthodes de formulation du BCR: théoriques, semi-empiriques et empiriques.

2.1 Méthodes théoriques

L'une des percées majeures dans le domaine de la formulation des mélanges de béton fut l'introduction des méthodes théoriques. En effet, elles permettent de minimiser la porosité (ou maximiser la compacité) du squelette granulaire en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, gravier, ciment, ajouts minéraux).

La faible porosité permettra un bon enrobage des granulats par la très faible quantité de pâte ciment, ainsi que des propriétés mécaniques optimisées.

Parmi les méthodes théoriques de prévision de la compacité d'un empilement granulaire, le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) anciennement appelé Modèle de Suspension Solide (MSS), développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France, fut adapté par le Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) de l'université de Laval à la formulation de mélange de BCR [14].

Le MEC permet le calcul de la compacité d'un mélange granulaire à partir de la compacité et de la granulométrie des constituants, des proportions du mélange et d'un paramètre k , nommé indice de serrage et qualifiant l'intensité du compactage.

Le MEC est basé sur l'optimisation de la compacité d'un empilement de grains de tailles différentes. La combinaison des constituants par cette méthode permet de produire un mélange sec à compacité optimale pour une maniabilité donnée.

La compacité d'un mélange granulaire dépend de la granulométrie des particules, de leur forme et de l'interaction entre les grains.

2.1.1 Viscosité de référence

Le MEC s'appuie sur l'hypothèse que la viscosité relative de référence $\eta_{r,i}$ d'un arrangement de grains consolidé est une valeur finie. La viscosité de référence est définie comme étant l'indice de l'énergie requise pour bien consolider le béton.

On appelle par convention classe monodimensionnelle un ensemble homogène de grains dont la grosseur est comprise entre deux tamis successifs de la

série normalisée (série de Renard). Pour un arrangement monodimensionnel de grains de diamètre d_i , la viscosité de référence peut être calculée par l'équation suivante :

$$\eta_{r,i} = \exp \left[\frac{2,5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}} \right] \quad (2.1)$$

Où:

β_i : représente la compacité virtuelle d'une classe de grains (i)

α_i : représente la compacité réelle d'une classe de grains (i).

Plus la technique de mise en place est énergétique, plus le mélange est serré et plus la viscosité de référence η est élevée, étant donné que la compacité réelle α_i tend vers la compacité virtuelle β_i

2.1.2 Détermination de la compacité réelle d'une classe granulaire

En pratique, la compacité réelle de chaque classe granulaire se détermine facilement par une mesure expérimentale.

2.1.2.1 Pour la fraction granulaire (gravier et sable)

On se sert d'un échantillon de masse M que l'on dépose dans un cylindre métallique de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm. Ce dernier, fixé à une table vibrante, sera fermé par un piston exerçant une pression de 10 kPa. On soumet l'échantillon à une vibration de 150 Hz pendant une minute. La compacité est alors donnée par la moyenne (sur un minimum de deux échantillons) de l'expression :

$$C = \frac{M}{\rho \cdot V} \quad (2.2)$$

Avec :

M : la masse de la fraction granulaire en kg (3 kg pour le sable et 7,5 kg pour le gravier)

ρ : est la masse volumique de la fraction granulaire (sable ou gravier). (kg/m^3)

V : le volume total final en m^3 .

2.1.2.2 Pour la fraction fine (les poudres)

Pour la fraction fine : le ciment, les cendres volantes, les fines du sable ou les filler, il s'agira d'un essai de demande en eau dont le principe est le suivant: on malaxe une masse de poudre P_p (de masse volumique ρ_p) avec une quantité d'eau croissante. La masse d'eau P_e juste nécessaire pour faire passer le mélange de l'état sec à celui plastique, est considéré comme la quantité remplissant la porosité de l'empilement des grains de la poudre. Dans ce cas, la compacité (représentée par le volume d'eau ajouté) de la poudre est déterminée par l'équation suivante:

$$C = \frac{1000}{1000 + \rho_p \cdot \frac{P_e}{P_p}} \quad (2.3)$$

Remarque: dans le cas d'un mélange binaire (ciment + ajout) :

$$\rho = \gamma_c \cdot \rho_c + \gamma_a \cdot \rho_a \quad (2.4)$$

Avec :

γ_c et γ_a , sont les proportions de ciment et d'ajout respectivement ($\gamma_c + \gamma_a = 1$).

La difficulté avec cette méthode réside dans la reconnaissance visuelle du passage à l'état plastique.

2.1.3 Détermination de la compacité virtuelle d'une classe granulaire

On se base sur le principe que le maximum que peut atteindre une viscosité de référence est celle obtenue avec un empilement de particules sphériques de même dimension.

Théoriquement, la compacité virtuelle de cet empilement est de 0,74; en pratique, la compacité maximale atteinte par ce même empilement est de 0,64. Donc, la valeur maximale de la viscosité de référence, calculée avec l'équation 2.1, pour les valeurs ci-dessous, est de 136 000. Ainsi, la compacité virtuelle d'une classe de grains en fonction de sa compacité réelle, est donnée par l'équation 2.5, en fixant la viscosité de référence à sa valeur maximale.

$$136000 = \exp \frac{2.5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}} \quad (2.5)$$

2.1.4 Compacité virtuelle d'un mélange granulaire

La compacité virtuelle γ se définit comme étant la compacité maximale que l'on peut atteindre pour un mélange granulaire donné, si l'on considère que les particules sont indéformables et sont placées une par une afin d'occuper le moins d'espace possible. Le modèle peut être utilisé pour prédire la compacité virtuelle d'un mélange granulaire à partir de sa distribution granulométrique et de la compacité virtuelle β_i de chaque classe de grains le composant.

Pour calculer la compacité virtuelle d'un mélange à n classes monodimensionnelles, on commence par distinguer la classe dominante, qui forme une phase continue dans le mélange et qui en assure le serrage.

L'équation (2.6) générale du modèle représente la compacité virtuelle d'un mélange de n classes lorsque la classe i est dominante:

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum \left[1 - \beta_i + b_{ij} \cdot \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_i} \right) \right] \gamma_i - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \cdot \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] * \gamma_j} \quad (2.6)$$

Avec :

γ_i = compacité virtuelle du mélange atteinte lorsque la classe i est dominante;

β_i = compacité virtuelle propre de la classe i empilée isolément;

β_j = compacité virtuelle propre de la classe j empilée isolément;

γ_j = fraction volumique d'une classe par rapport au volume total du mélange solide

La compacité virtuelle du mélange granulaire sera alors la valeur minimale de tout γ_i . Les coefficients a_{ij} et b_{ij} représentent respectivement l'effet de desserrement et l'effet de paroi exercée par les grains. Ces coefficients ont été déterminés par étalonnage des mélanges granulaires binaires.

Les équations (2.7) et (2.8), obtenues sont les suivantes:

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad (2.7)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,5} \quad (2.8)$$

Avec:

d_i : diamètre moyen de classe i

d_j : diamètre moyen de classe j

La figure 2.1 présente les effets de desserrement et de parois sur les grains. L'effet de desserrement (ou d'interférence) traduit le fait que lorsque un grain de taille inférieure n'est pas suffisamment fin pour s'introduire dans la porosité de l'empilement des grains de taille supérieure, déstructure ce dernier (sur ce schéma, par exemple, le grain n°3 n'est pas assez fin, c'est pourquoi, il déstabilise l'empilement des grains n°2 en essayant d'introduire entre eux).

L'effet de paroi traduit au contraire le fait qu'à la proximité d'un grain de taille supérieure, l'empilement de grains de taille inférieure est relâché (sur le schéma, les grains 2 perdent de leur solidarité quand ils sont proches du grain 1 beaucoup plus gros. De même, au niveau de la paroi, l'empilement des grains 2 est déstabilisé).

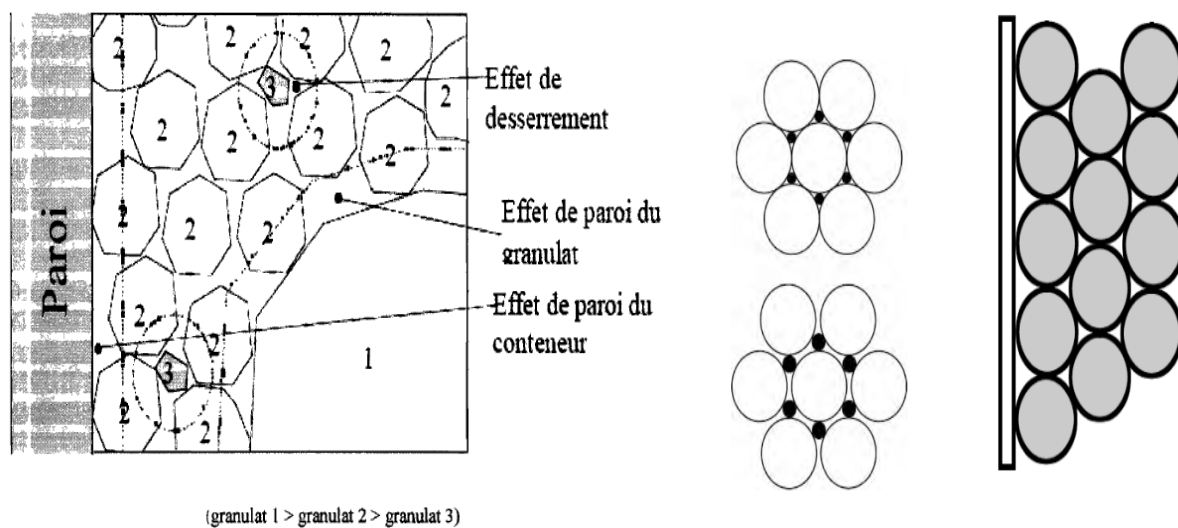


Figure 2.1: Effets de desserrement et de paroi

2.1.5 Compacité réelle d'un mélange granulaire (ϕ) : notion d'indice de serrage (k)

Le Modèle d'Empilement Compressible (*MEC*) permet de passer de la compacité virtuelle, qu'on ne peut atteindre en pratique, à la compacité réelle du mélange granulaire qui est fonction de l'énergie déployée lors de sa mise en place.

Un paramètre, l'indice de serrage k , permet de relier la compacité virtuelle γ à la compacité réelle φ

Le scalaire k dépend uniquement du protocole de mise en place du mélange granulaire. Il qualifié l'intensité de compactage, et se définit comme étant la somme d'indices partiels k_i de chaque classe granulaire i ,

La formule (2.9) générale de l'indice de serrage est la suivante, pour n classes:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\gamma^i}{\beta^i}}{\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\gamma^i}} \quad (2.9)$$

Ainsi, à partir de cette formule, on sort la valeur de la compacité réelle du béton. Le tableau 2.1 présente quelques valeurs courantes de k pour différents procédés de mise en place.

Tableau 2.1 : valeur de l'indice de serrage K pour procédés de mise en place

Procédés de mise en place	Indices de serrage K
Simple versement	4,1
Piquage	4,5
Vibration	4,75
Vibration + Compression 10 KPa	9
Demande en eau pour poudre	6,7

2.1.6 Le logiciel René-LCPC

Le logiciel René-LCPC met en œuvre le modèle d'empilement compressible. Il permet d'accéder avec une bonne précision, aux proportions optimales des constituants d'un mélange granulaire. Il a été développé par Thierry SEDRAN et François de LARRARD.

Les données d'entrée sont les suivantes:

- les masses volumiques réelles des différents constituants (ciment, sable, gravillons, fines, etc.) ;
- la granulométrie des différents constituants;
- la compacité de l'empilement individuel de chaque constituant;

- l'indice de compaction du constituant et l'effet de paroi associée à la mesure de ces compacités.

A l'issue d'un calcul pour un squelette granulaire donné, le logiciel fournit les grandeurs suivantes:

- l'indice de compaction du mélange;
- la porosité du mélange :
- la masse volumique à sec du mélange (en kg/m^3) : c'est le poids solide contenu dans un volume unité du mélange; la masse volumique à l'état saturé: c'est le poids d'un volume unité du mélange en supposant que le liquide suspendant est de l'eau.

Le Modèle d'Empilement Compressible est important dans la mesure où elle rend possible l'obtention d'excellentes propriétés mécaniques à court et à long terme et la réduction de la quantité de liant, d'où une réduction de la fissuration de retrait. Il a également l'avantage de prendre en considération l'influence de plusieurs paramètres sur le BCR à l'état frais et à l'état durci.

De plus, le *MEC* ne nécessite pas beaucoup d'essais au laboratoire pour l'obtention d'un *BCR* optimal. Cependant, cette méthode requiert beaucoup de calculs mathématiques et un logiciel spécialisé.

2.2 Méthodes empiriques

Ce sont les plus anciennes utilisées dans la formulation du BCR. Elles requièrent la réalisation d'un certain nombre de gâchées en laboratoire avant d'obtenir le mélange ayant les caractéristiques voulues.

De plus, des gâchées sont souvent requises en chantier pour ajuster la maniabilité du mélange. L'American Concrete Institute (*ACI*) propose deux méthodes:

- méthode de formulation respectant des limites de maniabilité;
- méthode de formulation basée sur le compactage des sols.

2.2.1 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité

Cette méthode de formulation de l'*ACI* s'applique à produire des mélanges de BCR visant à atteindre une limite de maniabilité. Elle donne généralement de bons résultats en pratique et permet de réaliser des mélanges optimisés.

Les proportions du mélange de BCR sont déterminées en suivant une procédure en trois étapes:

➤ étape 1 : Il s'agira de réaliser une série de gâchées d'essais de mélanges de mortier à différents rapports Eau/Ciment et à différents rapports Sable/Ciment afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chacun des mélanges, la masse volumique est mesurée. La figure 2.2 montre qu'un rapport E/C donné correspond à un rapport S/C qui conduit à une masse volumique optimale.

➤ étape 2: Elle consiste à choisir le rapport E/C selon les propriétés mécaniques requises. Ce choix se fera à l'aide de la courbe de la figure 2.5 donnant la relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné).

➤ étape 3 : Il s'agira de tracer la droite des optimums. L'intersection de cette dernière avec E/C choisie dans l'étape 2 donne le rapport S/C adéquat. Ainsi, le mortier optimal étant obtenu, il faudra ajouter sur ce dernier progressivement le gravier jusqu'à obtenir la maniabilité voulue.

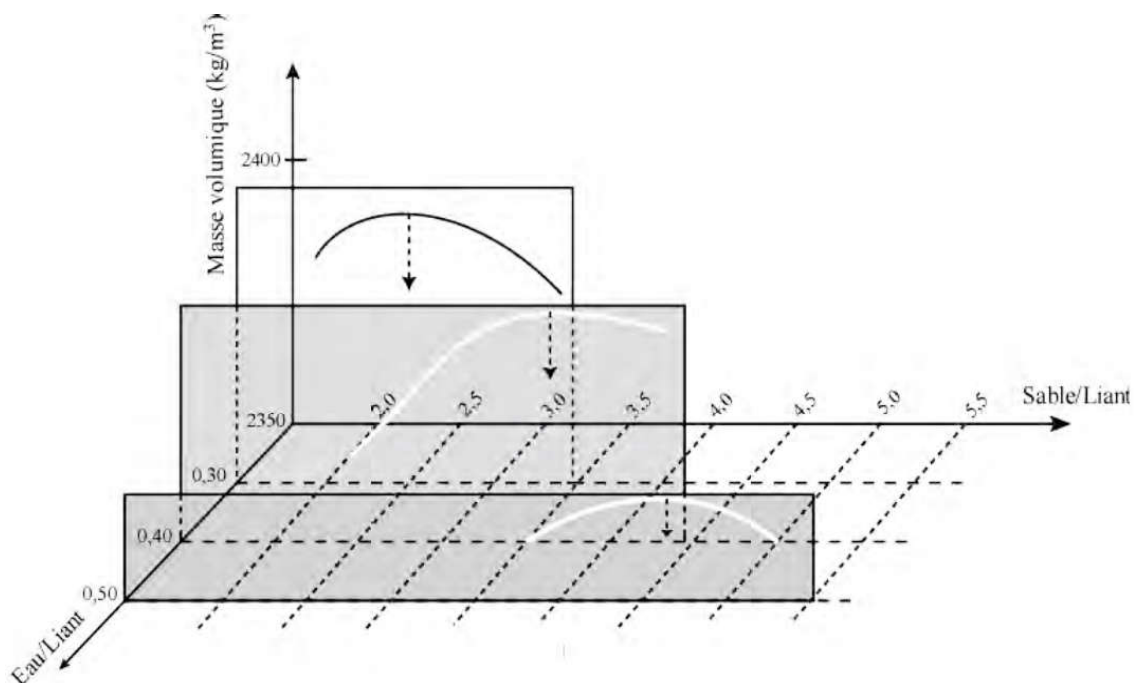


Figure 2.2 : Paramètres optimum d'un mortier pour BCR [14]

2.2.2 Méthode de formulation basée sur le compactage des sols

Cette méthode est basée sur la relation entre la densité sèche et la teneur en eau du BCR. Elle consiste à :

- déterminer les proportions des différentes classes granulaires (sable, gravier) par des courbes de référence établies à partir de résultats d'un grand nombre de mesures faites avec plusieurs granulats ;
- faire une série de mélanges à dosages en ciment différents (teneur variant entre 10 et 15%) : on détermine alors, pour chaque mélange, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche correspondante par l'essai Proctor modifié;
- réaliser les essais de résistance à la compression sur les mélanges à teneur en eau optimale.

Cette méthode n'est pas préférable puisque nécessitant beaucoup de travail de laboratoire. De plus, lors de l'impact du marteau Proctor sur les granulats, ceux-ci sont fragmentés, ce qui modifie la courbe granulométrique, et modifie par ce fait même les résultats obtenus.

C'est ainsi que parmi les méthodes proposées par l'ACI, celle basée sur les limites de maniabilité est meilleure vu qu'elle fournit des résultats plus fiables.

Dans tous les cas, les méthodes empiriques ne sont pas très flexibles et demandent beaucoup de temps et d'énergie.

2.3 Méthodes semi-empiriques

Ce sont des méthodes basées à la fois sur des données expérimentales et sur quelques formules empiriques. Un exemple de méthode semi-empirique est celle du volume de pâte optimal développée par Richard GAGNE [15]. La méthode du volume optimal se base sur l'hypothèse que la quantité de pâte contenue dans le mélange de BCR est celle nécessaire pour combler les vides inter-granulaires subsistant après un bon compactage.

D'autre part, l'approche volumétrique de cette méthode de formulation s'explique par le fait que si la quantité de pâte est en deçà de sa valeur optimale, alors les vides restant après compactage vont diminuer les propriétés mécaniques du béton tout en augmentant sa perméabilité. Par contre, un excès de pâte

augmentera la chaleur d'hydratation, et par conséquent le coût de fabrication, sans une amélioration notable des propriétés physiques ou une réduction de la perméabilité.

Cette méthode de formulation de BCR comporte trois étapes :

- choix d'une granulométrie optimale;
- choix du dosage volumique en pâte pour obtenir la maniabilité souhaitée;
- choix du rapport E/C de la pâte pour atteindre les caractéristiques mécaniques et la durabilité requises.

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

Cette étape consiste à choisir les proportions des différentes classes granulaires en vue de créer un squelette granulaire avec le minimum de vides après compactage. On utilise les courbes de référence de type Talbot-Fuller-Thompson (T-F-T) dont l'équation (2.10) générale est donnée par :

$$P = 100\left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (2.10)$$

Avec:

P : pourcentage passant le tamis d'ouverture d ;

d : ouverture d'un tamis (mm) ;

D : diamètre maximal du granulat (mm)

n : paramètre variable compris entre $0,25$ et $0,45$. Pour le BCR, on prend en général, $n = 0,45$ [16].

La figure 2.3 montre les courbes granulométriques typiques de Talbot-Fuller-Thompson pour différentes grosseurs nominales maximales de granulats. Dans la pratique, si l'on dispose d'un sable et d'un gravier, il s'agira de tracer sur le même graphe, les courbes granulométriques du sable et du gravier ainsi que celle de Fuller-Thompson pour D donné. Pour déterminer la proportion des différents granulats, on trace la ligne de partage entre les différents granulats en joignant le point à 95% de la courbe de sable au point à 5% de la courbe de gravier. Le point de rencontre de la ligne de partage avec la courbe typique de Fuller-Thompson nous fournit les pourcentages de chaque classe granulaire.

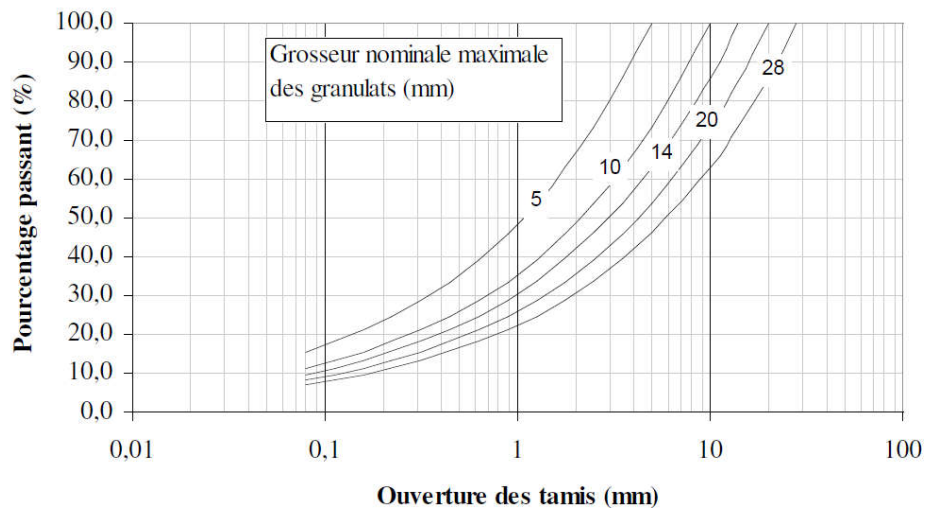


Figure 2.3 : *Courbes de Fuller-Thompson modifiées pour différentes grosseurs de granulats [17]*

Après avoir fixé les proportions relatives des différents granulats fins et grossiers de façon à se rapprocher de la distribution granulométrique idéale, la mesure des vides du squelette granulaire compacté doit être réalisée (V_{vc}).

Ce volume (exprimé en L/m^3 de granulat compacté) est obtenu en compactant, à l'aide d'une surcharge, un échantillon du mélange granulaire dans le récipient cylindrique fixé à une table vibrante (l'appareil Vebe peut être employé). Le volume des vides après compactage est calculé à partir du volume final apparent des granulats compactés, de la proportion et de la masse volumique sèche des grains solides de chaque type de granulat utilisé dans le squelette granulaire. Généralement la valeur de V_{vc} se situe entre 180 et $200 L/m^3$.

Des granulats grossiers avec une faible proportion de particules plates et allongées et un sable naturel avec des particules arrondies permettent de réduire le volume des vides du squelette granulaire [18].

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

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

On désigne par :

V_p : Le volume de pâte dans 1m^3 de BCR ($1/\text{m}^3$)

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

Pour un mélange de BCR sans air entraîné, le volume de pâte V_p (2.11) est égal à :

$$V_p = V_{eau} + V_{ciment} + V_{ajouts\ min\ éreux} \quad (2.11)$$

La figure 2.4, exprime la relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport V_p/V_{vc} .

Cette relation demeure approximative dans la mesure où la relation exacte est fonction de la méthode utilisée pour déterminer V_{vc} et des propriétés rhéologiques de la pâte. A partir de cette courbe, on détermine le volume de pâte (L/m^3) requis pour une maniabilité désirée.

Cependant, une ou deux gâchées de vérification sont par ailleurs requises pour déterminer le dosage précis du volume de pâte nécessaire pour obtenir la maniabilité désirée.

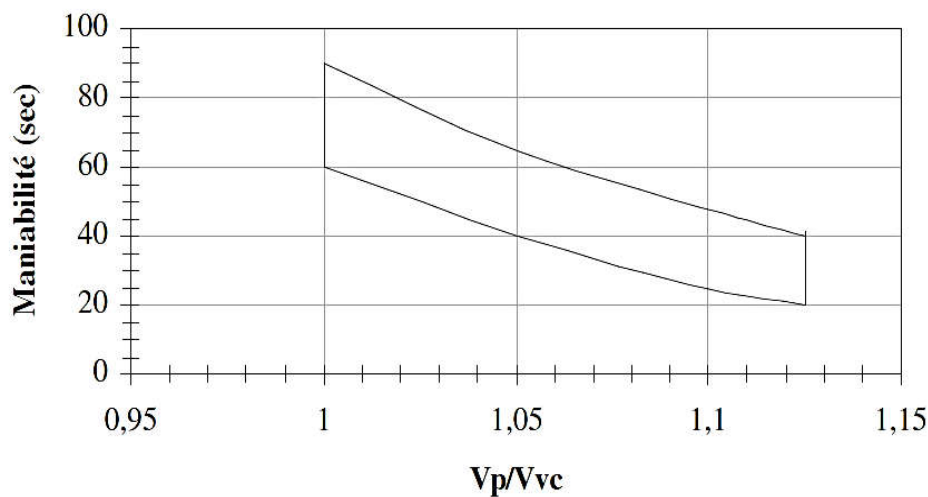


Figure 2.4 : Relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport V_p/V_{vc} pour des mélanges de BCR sans air entraîné (rapport eau/liant $< 0,50$) [17]

Étape 3 : Sélection du rapport E/C selon la résistance à la compression requise

Après avoir déterminé le volume de pâte requis pour obtenir la maniabilité voulue, ils'agit finalement de choisir le rapport E/C et le type de liant afin d'obtenir la résistance mécanique spécifiée.

Les courbes présentées sur la figure 2.5 présentent des relations entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E/C pour des mélanges de BCR avec des ajouts cimentaires (fumées de silice et cendres volantes).

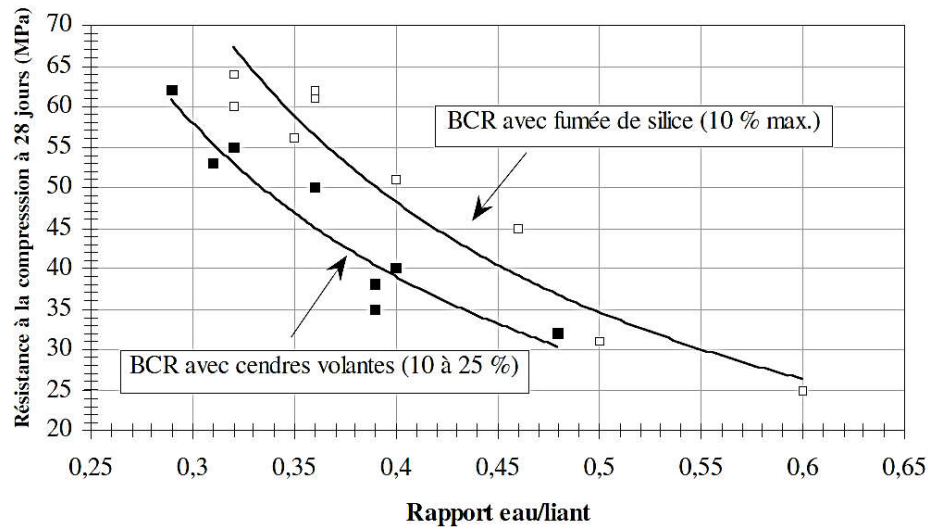


Figure 2.5 : Relation entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné) [17]

Comme décrit à la référence [17] et montré à la figure 2.5, la sélection du rapport eau/liant du mélange de BCR est fonction de la résistance à la compression. Par contre, c'est la résistance à la flexion du BCR qui est utilisée pour calculer l'épaisseur d'un revêtement en BCR. À cet effet, des courbes expérimentales illustrant la relation entre le rapport eau/liant et la résistance à la flexion de différents mélanges de BCR devraient être tracées. On pourrait également estimer, à partir de la résistance à la compression, la résistance à la flexion d'un mélange avec un rapport E/L donné.

A la fin de la troisième étape, on connaît les caractéristiques du liant, le volume de pâte V_p et le rapport E/C ; on peut alors calculer les proportions massiques approximatives du BCR à partir des densités des matériaux cimentaires et des granulats. L'une des limites de la méthode du volume optimal est qu'actuellement, elle n'est utilisable que pour des mélanges de BCR sans air entraîné. En effet, la grande influence du réseau de vides d'air sur la maniabilité et les propriétés mécaniques du béton rend complexe l'utilisation de cette méthode pour des mélanges de BCR avec air entraîné. L'utilisation de particules plates et allongées est à éviter puisqu'augmentant le volume des vides.

3 CONCLUSION

Ce chapitre consistait à présenter les différentes méthodes de formulation utilisé pour les BCR. Parmi les méthodes empiriques de formulation, celles de l'ACI ont été développées. Cependant, ces dernières nécessitent plus d'essais et présentent des résultats moins fiables que les méthodes semi-empiriques dont celle de Richard GAGNE utilisées dans pas mal de projets de BCR dans le monde.

Le modèle d'empilement compressible (MEC) optimise les proportions des différents constituants, par la connaissance de leurs caractéristiques. Elle présente généralement de bons résultats mais nécessite beaucoup de calculs mathématiques.

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	24
2	MÉTHODES DE FORMULATION.....	24
2.1	Méthodes théoriques.....	25
2.1.1	Viscosité de référence.....	25
2.1.2	Détermination de la compacité réelle d'une classe granulaire	26
2.1.3	Détermination de la compacité virtuelle d'une classe granulaire	27
2.1.4	Compacité virtuelle d'un mélange granulaire	28
2.1.5	Compacité réelle d'un mélange granulaire (ϕ) : notion d'indice de serrage (k)	29
2.1.6	Le logiciel René-LCPC	30
2.2	Méthodes empiriques	31
2.2.1	Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	31
2.2.2	Méthode de formulation basée sur le compactage des sols	33
2.3	Méthodes semi-empiriques	33
	<i>Étape 1: Sélection d'une granulométrie optimale et calcul du volume des vides.....</i>	<i>34</i>
	<i>Étape 2: Sélection du volume de pâte pour une maniabilité désirée</i>	<i>35</i>
	<i>Étape 3 : Sélection du rapport E/C selon la résistante à la compression requise</i>	<i>36</i>
3	CONCLUSION	38

CHAPITRE 3

PROPRIETES

PHYSICOMECHANIQUE DU BCR

1 INTRODUCTION

L'objectif des méthodes de formulations c'est l'optimisation des dosages des constituants. En effet l'optimisation des proportions des matériaux secs des mélanges de BCR permet d'obtenir des bonnes caractéristiques mécaniques malgré les faibles teneurs en ciment de ces bétons. Du point de vue rhéologie, le comportement mécanique du BCR est fortement influencé par le faible volume de pâte. On constate sur la structure granulaire que le squelette compact des mélanges de BCR contribue grandement aux améliorations des performances mécaniques comparées à celles des BC. La réduction de la porosité du squelette granulaire par densification permet la réduction de la demande en particules fines, telle que ciment, cendres volantes, laitiers, fumée de silice et autres matériaux fins [14, 15].

Les résultats présentés dans cette section ont été tirés d'études expérimentales en laboratoire et ne sont donnés qu'à titre indicatif. Dans l'état actuel des connaissances, les conclusions de ces travaux de recherche doivent être considérées avec prudence.

2 PROPRIÉTÉS DU BCR A L'ETAT FRAIS

Les principales propriétés du BCR à l'état frais sont la maniabilité, la masse volumique, la ségrégation et la sensibilité élevée aux variations de la teneur en eau du mélange. Nécessairement, les méthodes d'essais couramment employées pour la mesure des propriétés à l'état frais du béton plastique ne sont pas applicables au BCR.

2.1 Maniabilité

A l'état frais, la maniabilité est la principale propriété du BCR, elle est définie comme étant l'indice de l'effort qui doit être fourni pour bien consolider un matériau frais. Elle représente aussi l'énergie de compactage nécessaire pour consolider adéquatement le matériau frais.

Expérimentalement, la maniabilité d'un mélange de BCR, du fait de sa consistance trop sèche, est mesurée, selon la norme NF EN 12350-3 (figure 3.1), en déterminant le temps requis pour compacter avec une énergie normalisée une certaine quantité de BCR.

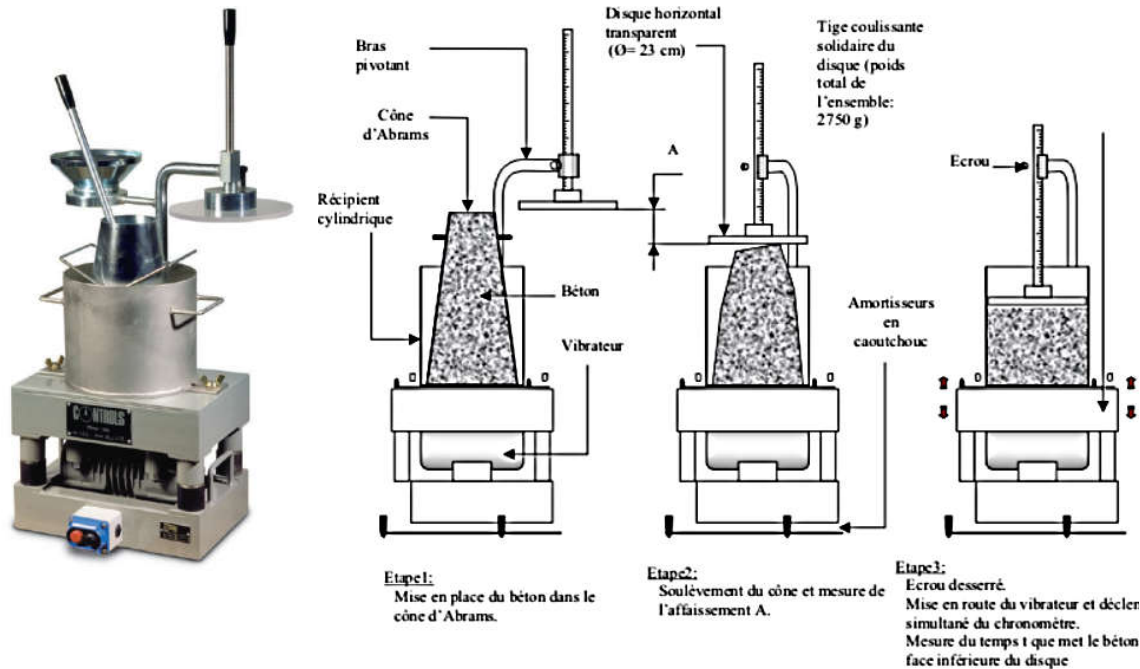


Figure 3.1 : Dispositif et schéma de mesure de la consistance (Essai VÉBÉ)

La caractéristique de maniabilité du BCR est principalement fonction du dosage en pâte (eau/ciment). La bibliographie montre que la maniabilité du BCR doit être généralement comprise entre 40 et 90 secondes (temps VEBE) au moment de la mise en place. Le délai maximal pour la mise en place du béton, depuis le contact initial eau/liant, est de 60 minutes. Le tableau 3.1 suivant donne le classement de la consistance des bétons selon le temps.

Tableau 3.1 : Classe de consistance de bétons en fonction du temps VEBE

Temps Vebe « t » en secondes	Consistance de bétons
$t > 31$	Béton très sec
$21 < t < 31$	Béton sec
$11 < t < 20$	Béton plastique
$5 < t < 10$	Béton fluide
$t < 4$	Béton très fluide

La maniabilité d'un mélange de BCR est influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels nous pouvons citer:

- le volume et la fluidité de la pâte: la maniabilité augmente avec ces deux facteurs;
- la proportion des fines dans le fuseau granulométrique: plus cette proportion est élevée plus la maniabilité augmente puisque les points de discontinuité deviennent plus nombreux et il y a plus de mobilité de l'ensemble;
- la forme, la texture et l'absorptivité des granulats: la maniabilité est plus importante dans le cas de particules rondes que plates. Les granulats poreux absorbent l'eau et réduisent la maniabilité, tandis que les granulats rugueux exigent une plus grande quantité de pâte de ciment pour une même maniabilité du fait des irrégularités de surface qu'ils comportent.

La qualité du BCR est étroitement liée à sa maniabilité à l'état frais; elle ne doit être ni trop faible, ni trop élevée.

Une maniabilité trop élevée, donc une augmentation du rapport E/C, a pour effet une diminution des propriétés mécaniques du BCR et de la durabilité. Aussi, lors de la mise en place, il y a création de pressions interstitielles dans le matériau compacté, ce qui entraîne une déformation excessive lors du passage des équipements de compactage d'où une formation d'ondulations à la surface du revêtement. L'adhérence accrue de la pâte avec le rouleau du compacteur entraîne dans le même sens une mauvaise qualité de surface [20].

Une maniabilité trop faible, a comme conséquence une augmentation importante du volume des vides de compactage d'où une diminution des propriétés mécaniques et de la durabilité du BCR. Il y a aussi une augmentation de la ségrégation, une diminution de l'adhérence entre les couches et une mauvaise qualité de surface due à un uni grossier ouvert [20].

2.2 Masse volumique

La mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais permet de vérifier l'uniformité de la production et sert de valeur de référence pour évaluer le niveau de compactage du matériau en place. Elle permet également de comparer la valeur de la masse volumique humide expérimentale à la valeur théorique. La méthode d'essai doit permettre une consolidation adéquate du BCR. Elle doit aussi représenter le degré de compactage atteint in-situ et être facilement réalisable et reproductible. Elle est déterminée au laboratoire au cours de l'essai Proctor modifié selon différentes méthodes (NF EN 12350-6, NT21.109-7) [20].

En laboratoire et en chantier, cette valeur de la masse volumique humide de référence du BCR frais est considérée lors de la confection d'éprouvettes. En chantier, la mesure de la masse volumique humide du BCR mis en place est réalisée par nucléo-densimétrie (figure 3.2) en mode de transmission directe (ASTM C 1040). Le rapport entre la masse volumique humide en place (mesurée avec le nucléo-densimètre) et la masse volumique humide de référence (déterminée avec l'énergie de l'essai Proctor modifié) est égal au degré de compactage du BCR.

De plus, une attention particulière doit toutefois être portée aux opérations de compactage. Le compactage du matériau à l'aide du marteau peut fracturer les granulats et modifier la granulométrie. Par ailleurs, lors du réglage de la surface de la couche supérieure, la qualité de la finition doit être semblable à celle des surfaces obtenues lors du compactage final du BCR en chantier. Des particules fines (inférieures à 5mm) provenant du mélange du BCR sont souvent ajoutées lors du réglage afin de fermer la surface et ainsi obtenir une masse volumique humide de référence représentative.

Le Tableau 3.2 résume les résultats des essais Proctor réalisés par Zdiri [6], pour différents mélanges de BCR.

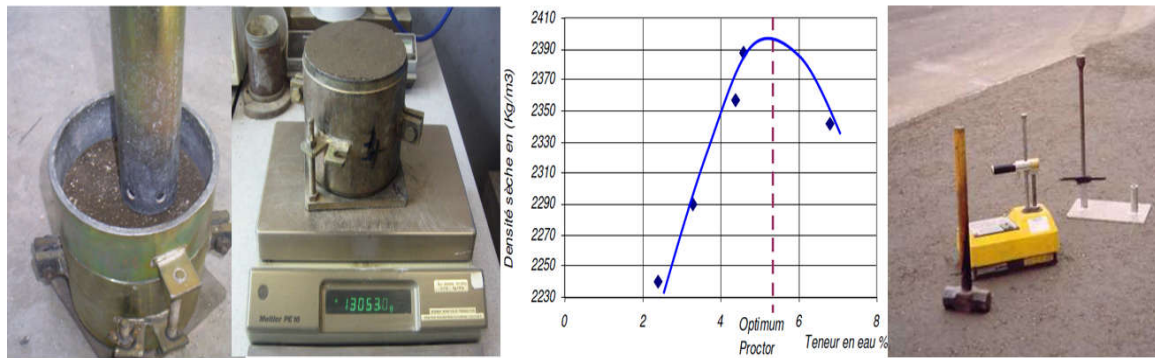


Figure 3.2. La mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais, en laboratoire et en chantier

Tableau 3.2. Valeurs de l'Optimum Proctor modifié et des masses volumiques à l'état humides et à l'état sec pour différents mélanges de BCR.

Mélange	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Teneur en eau optimale (%)	5,7	5,6	6,2	5,8	5,6	5,3	5,4	5,7
Masses volumiques sèche (kg/m ³)	2389	2410	2430	2405	2395	2408	2335	2310
Masses volumiques humides (kg/m ³)	2525,2	2545,0	2580,7	2544,5	2529,1	2535,6	2461,1	2441,7

2.3 Teneur en air

La détermination de la teneur en air du BC est réalisée à l'aide d'un appareil appelé aréomètre-pressiométrique. D'après Gauthier et Marchand [30], cette méthode d'essai n'est pas généralement employée pour le BCR qui est relativement plus sec à l'état frais.

Sous cette forme, le BCR ne possède pas la déformabilité et la plasticité nécessaire à la réalisation de cet essai. Le faible dosage en eau et l'état sec obtenu limite la plasticité de la matrice et favorise un contact étroit entre les granulats.

2.4 Ségrégation

C'est la ségrégation des différents composants lors de la mise en place et elle a pour conséquence une perte d'homogénéité et de résistance. A cause du faible volume d'eau, le BCR est très sensible à la ségrégation. Cette dernière est fonction de la granulométrie, de la grosseur maximale du gros granulat et des caractéristiques de la pâte.

Lors de la mise en place, les zones sensibles à la ségrégation comme les joints frais et les joints de reprises doivent être réalisées avec précaution.

Le passage des équipements de compactage sur les zones de ségrégation figure 3.3 (b) doit être précédé de l'ajout de matériaux de dimension inférieure à 5 mm tamisés à partir du BCR frais.



(a) Texture fermée

(b) Texture ouverte

Figure 3.3 : L'état de surface d'un pavage en BCR

(a) sans ségrégation, (b) avec ségrégation

3 PROPRIÉTÉS DU BCR A L'ETAT DURCI

3.1 Propriétés mécaniques

Le comportement mécanique du BCR est principalement influencé par le faible volume de pâte. Le squelette granulaire compact des mélanges de BCR contribue grandement aux excellentes performances mécaniques par rapport aux bétons plastiques.

3.1.1 Résistances à la compression

La résistance à la compression du BCR est généralement considérée comme sa plus importante propriété. Elle nous donne une image globale sur la qualité de ce béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, cette résistance représente un élément principal pour la conception et le dimensionnement des structures de pavages en BCR [21].

Tableau 3.3 : Ordre de grandeur typique de béton plastique et de BCR

[23]

Béton plastique ²		BCR ³
Résistance a la compression 45 MPa ¹ – ciment de type 10		
Quantité de liant (kg/m ³)	350	270
Rapporte E/L	0,40	0,40
Résistance a la compression 60 MPa ¹ – ciment de type 10E–SF		
Quantité de liant (kg/m ³)	420	300
Rapporte E/L	0,34	0,35

¹ : 28 jours de murissement après le contact initial E/L. ² : mélanges avec air entraîné. ³ : mélanges sans air en trainé

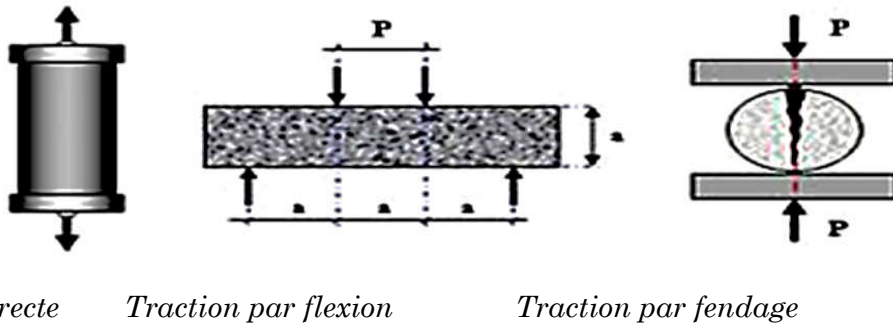
3.1.2 Résistance à la traction

Concernant l'essai de traction, il ya plusieurs modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction (figure 3.4), parmi ces essais nous citons:

- Traction directe ;
- Traction par flexion ;
- Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale (NF P 98-232-3).

Vu que les chaussées en BCR sont sollicitées par des efforts de compression conduisant à la traction indirecte, l'essai le plus proche à ce phénomène est l'essai de traction par fendage (essai brésilien).

La figure 3.5 montre la propagation des fissures lors de l'essai de traction par fendage sur des éprouvettes de BCR.



Traction directe

Traction par flexion

Traction par fendage

Figure 3.4 : Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction.

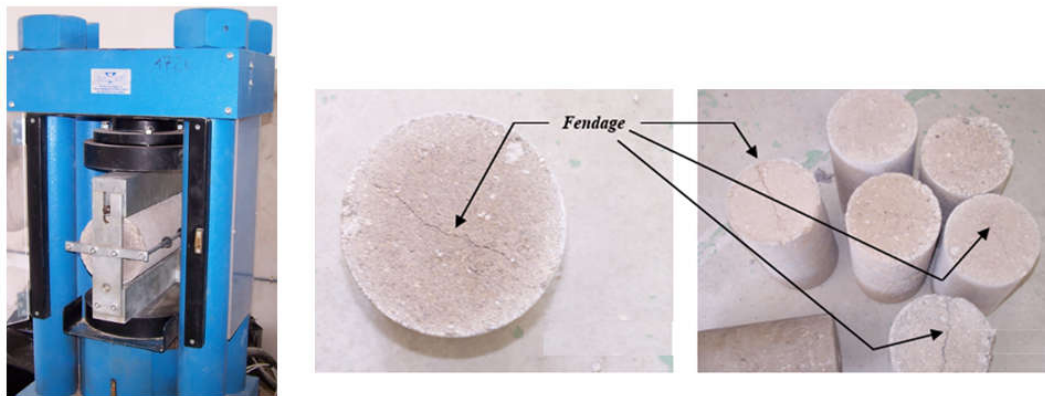


Figure 3.5 : Propagation des fissures lors de l'essai de traction par fendage sur cylindre de BCR

3.1.3 Résistance à la flexion

L'évaluation du module de rupture d'une éprouvette de BCR consiste à mesurer, sous l'effet d'une charge, la contrainte maximale atteinte à la base de l'éprouvette. C'est pourquoi la résistance à la flexion du BCR est importante lors de la conception de dalles de revêtement. Elle joue un rôle déterminant dans le calcul de l'épaisseur du revêtement

Dans cet essai (NF P18-407, NT 21.109-5), un prisme de BCR est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge au milieu de la poutre. La contrainte théorique maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspond au module de rupture [34].

Pour la préparation des éprouvettes nécessaires à l'essai de résistance à la flexion du BCR, Zdiri a conçu un moule spéciale permettant de fabriquer des éprouvettes prismatiques de dimension 7x7x28 cm en développant la technique de

vibro-compactage. La méthode comporte une charge appliquée simultanément avec la vibration au lieu de la vibration seulement pour le BC (Figure 3.6).[6]

Un BCR correctement formulé avec une teneur en liant de $300\text{kg}/\text{m}^3$ et un rapport d'E/C de $0,35$ développe une résistance en flexion de 5 à 6.5MPa à 7 jours et 7MPa à 28 jours de mûrissement [22].

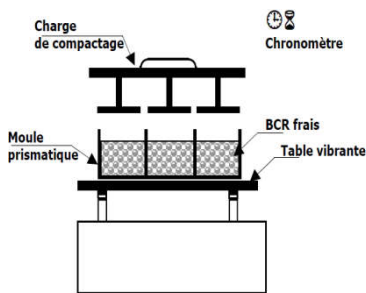


Figure 3.6 : Moule et charge conçu pour la confection des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) de BCR

Figure 3.7 : Mode de rupture des éprouvettes prismatiques de BCR en flexion

3.1.4 Comparaison entre les résistances mécaniques d'un BCR et un BC

Zdiri [6], a pu faire une comparaison entre les résistances mécaniques d'un BCR et un BC, il a conclu que :

- En diminuant la teneur en eau dans les mélanges de BCR, les résistances mécaniques augmentent contrairement à ceux du BC, qui risquent de baisser en ajoutant la quantité d'eau de gâchage.
- A égale résistance à la compression, les mélanges de BCR nécessite une quantité de ciment inférieur à celle usuellement utilisée pour la fabrication des mélanges de BC et ceci grâce à la forte compacité du squelette granulaire obtenu par compactage et ce en analogie avec l'idée développée par Nanni et al. [35].
- Une formulation rationnelle et adéquate des constituants secs est nécessaire pour une optimisation du squelette granulaire. A travers cette optimisation, nous arrivons à réduire les coûts des matériaux et de la fabrication d'une façon appréciable.

- La compacité du squelette granulaire fait que la résistance en flexion du BCR est plus élevée que celle du BC.

3.1.5 Effets des adjuvants sur le comportement mécaniques de BCR

Les effets des adjuvants sur les propriétés mécaniques de BCR ont l'objectif de plusieurs études. Dans ce travail nous discutons seulement les travaux réalisés par Zdiri[6]. Zdiri, a introduit l'utilisation des adjuvants conformément aux dosages suivants :

- Pour les entraîneurs d'air (EA): dosage variant de 1 à 3%.
- Pour les superplastifiants (SP): dosage variant de 1 à 3%.
- Pour les accélérateurs de durcissement (AD): dosage variant de 1-3%.
- Pour les retardateurs de prise (R): dosage variant de 0,4 à 1%.

La figure 3.8 représente l'évolution de la résistance à la compression de mélanges de BCR avec et sans Adjuvants. Il a remarqué que résistances enregistrées pour les mélanges de BCR avec adjuvants sont supérieures à celles des mélanges sans adjuvants. D'autre part les résistances des mélanges avec adjuvants dépassent entre 10% et 70% fois les résistances des mélanges sans adjuvants.

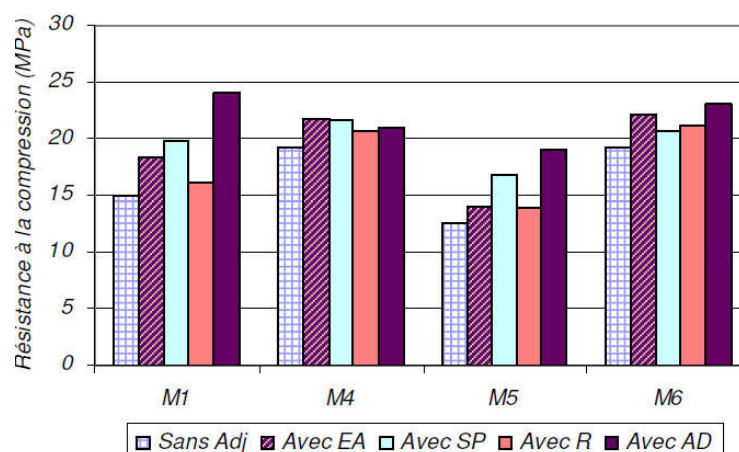


Figure 3.8 : Évolution de la résistance à la compression de mélanges de BCR avec et sans Adjuvants

3.1.6 Effets des ajouts sur le comportement mécaniques de BCR

Des études réalisées par Pierre Gauthier et Jacques Marchand, ont pour objectif de voir l'effet de la substitution du ciment par la cendre volante ou filler calcaire. [23]

Pour les cas de la substitution avec la cendre volante (taux de remplacement supérieur à 40% par rapport au ciment), Ils ont pu remarquer que :

- Les résistances mécaniques des mélanges de BCR fabriqués avec cendres volantes diminuent avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes.
- Malgré leurs faibles résistances à court terme, l'hydratation des mélanges avec cendres volantes fait en sorte que ces bétons développent des résistances à long terme presque équivalentes et même supérieures au mélange sans cendres volantes.
- Après 90 jours de mûrissement, la résistance à la compression du mélange fabriqué avec cendres volantes est près de 35 % supérieure au mélange de BCR sans cendres volantes.
- Les résistances à la flexion de tous les mélanges avec ajout de cendres volantes, sont supérieures à celles du mélange sans cendres volantes après 91 jours de mûrissement

Les résultats de résistance à la compression et de résistance à la flexion en fonction des différentes teneurs en cendres volantes sont résumés aux figures 3.9 et 3.10 respectivement :

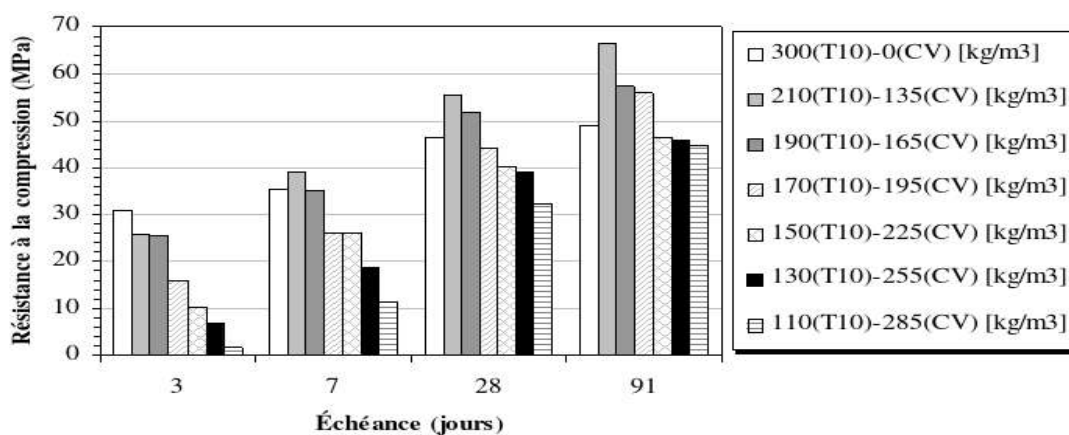


Figure 3.9: Influence de la teneur en cendres volantes sur la résistance à la compression [23]

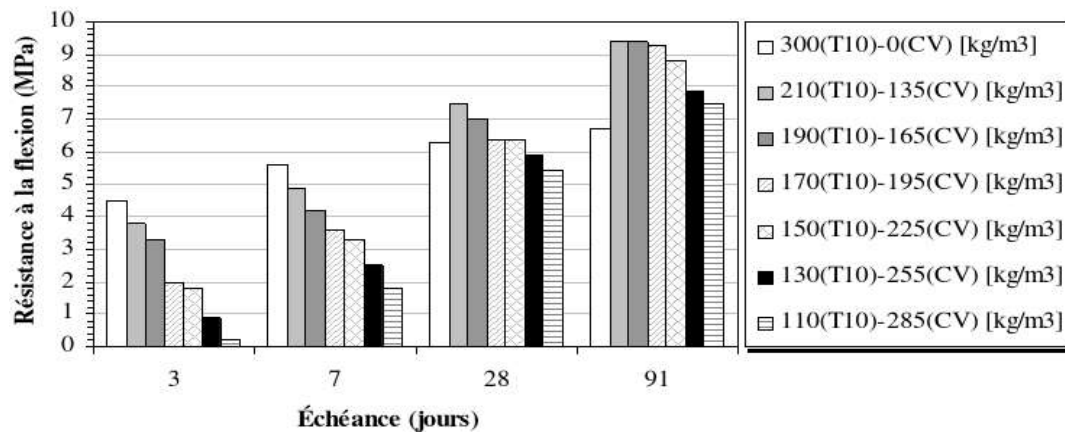


Figure 3.10 :Influence de la teneur en cendres volantes sur la résistance à la flexion du BCR [23]
Concernant la substitution par les filler calcaires pour dosage en ciment

inférieure à 250kg/m^3 . Ils ont remarqué que :

- l'ajout d'environ 7% de filler calcaire par rapport à la masse totale des matériaux secs dans des mélanges de BCR peut généralement contribuer à améliorer les propriétés physicomécaniques du béton [25].
- L'ajout de 7% de filler calcaire a donc permis une réduction de 12% de la porosité. Cette compacité accrue des mélanges de BCR favorise une légère diminution du rapport eau/liant.
- le rapport E/L d'un mélange formulé avec et sans filler calcaire est passé de 0,47 à 0,44 pour une teneur en liant de 225 kg/m^3 , et de 0,65 à 0,59 avec une teneur en liant de 175kg/m^3 sans pour autant réduire la maniabilité du mélange.

L'influence bénéfique des fines sur le squelette granulaire relativement aux propriétés mécaniques compression et flexion de ces bétons est montrée au tableau 3.4. Les résistances à la compression et à la flexion des mélanges avec ajout de filler calcaire sont supérieures à celles des mélanges sans ajout de fines. En outre, l'incorporation de fines dans les mélanges de BCR améliore aussi la texture de surface du revêtement. Cependant, des teneurs élevées en particules inférieures à $80\text{ }\mu\text{m}$, soit plus de 15 %, peut réduire significativement la résistance à l'écaillage du BCR [36].

Tableau3.5 : propriétés mécanique de mélanges de BCR formulés avec et sans ajout de filler calcaire [23]

Age(jour)	Mélange avec 175kg/m ³ de ciment		Mélange avec 225kg/m ³ de ciment	
	Sans filler calcaire	Avec filler calcaire	Sans filler calcaire	Avec filler calcaire
	Résistance à la compression (MPa)			
1	10,0	14,8	18,6	26,4
7	27,6	34,8	37,8	49,5
28	41,0	44,9	58,2	64,1
Résistance à la flexion (MPa)				
1	2,5	2,8	4,1	4,4
7	4,0	4,8	5,0	5,7
28	5,3	6,0	5,7	7,0

3.2 Modulé de d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young caractérise la rigidité du matériau c'est-à-dire la propriété de se déformer de façon élastique, réversible sous l'action d'une charge.

La constante de proportionnalité, E, exprime le rapport entre une contrainte appliquée et la déformation qui correspond au module élastique ou au module d'Young comme montré à la relation (2).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Avec :

E : module de Young, en MPa

σ : Contrainte en MPa

ε : Déformation en mm/mm

Le module d'élasticité est influencé par la propriété de la pâte de ciment hydratée ainsi que celle des granulats. Dans un mélange de BCR, les granulats occupent un volume important comparativement au volume de la pâte. Généralement, après 28 jours de mûrissement, le module d'élasticité moyen du BCR est de l'ordre de 30GPa (figure 3.11).

Pour le BCR le module d'élasticité est indépendant aux variations de température contrairement au béton bitumineux (BB).

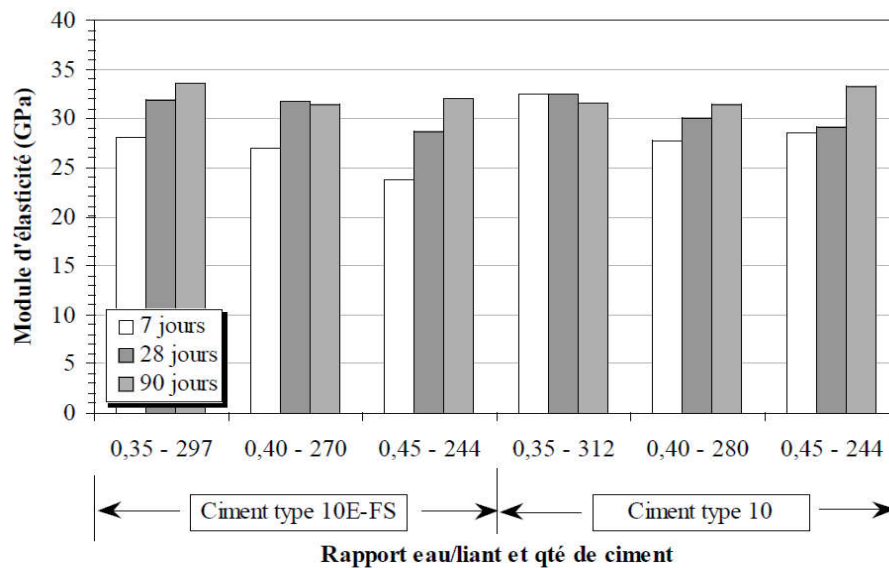


Figure 3.11 : Module d'élasticité de différents mélanges de BCR[24]

3.3 Le retrait et le gonflement

Le retrait correspond à une diminution apparente du volume de béton. On distingue principalement trois types de retraits:

- le retrait avant prise causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton.
- le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment.
- le retrait hydraulique qui est une conséquence de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment.

La première conséquence du retrait est la fissuration; en effet, l'évaporation de l'eau ne se produit pas de façon uniforme dans toute la masse de matériau, mais progressivement par couches successives de la surface vers l'intérieur. Ceci entraîne des efforts supérieurs à la résistance à la traction du matériau fissurable. Ainsi, dans la couche extérieure, prend naissance un effort de traction et dans la couche suivante, un effort de compression. La première couche cédera en premier lieu.

Pour éviter l'évaporation de l'eau de gâchage et réduire les retraites, on a recours à l'épandage d'un produit de cure constituant une membrane de protection superficielle, pulvérisée en une ou deux couches avec un dosage de 0,2 l/m² (Figure 3.12). En outre le BCR frais devra être protégé contre les fortes pluies par des toitures roulantes ou des membranes de matière plastique [37].



Figure 3.12 : Application d'un produit de cure après compactage du BCR

Le gonflement correspond à l'augmentation du volume du béton. Il est dû pour la plupart des cas à une réaction alcalis-silice et alcalis-carbonate du béton. Au cours de la réaction, il se produit un gel qui absorbe l'eau augmentant ainsi le volume. Cette réaction dépend de:

- la réactivité des granulats;
- l'alcalinité de la solution interstitielle du béton;
- l'humidité ambiante du milieu où se trouve la structure;

Différentes méthodes existent pour réduire le risque d'expansion causé par la réaction alcalis-silice dans le béton. Par exemple: remplacer une partie du ciment Portland par un ajout cimentaire (cendres volantes, fumées de silice ...).

3.4 La durabilité

En se basant sur des études faites on peut comprendre que l'évaluation de la durabilité du BCR est notablement très intéressante pour la compétitivité de ce matériau. Cette caractéristique est démontrée par sa robustesse qui est la plus apparente au printemps, pendant le dégel. Le BCR a montré aussi une bonne

résistance au ramollissement que subit sa couche de forme sous l'action du dégel et qui affecte sensiblement les revêtements en BB. Les études faites par AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) a démontré que près de 61 % des revêtements en BB subissent des dommages notables pendant cette période (période de dégel), comparativement à 5,5 % seulement des chaussées rigides en BCR ou en béton [39]. En plus, des travaux d'entretien sont exigés tous les trois à cinq ans pour les routes en BB. Par contre, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en BCR qu'après 12 ans [40, 38].

Du point de vue sécurité, l'expérience a montré que les conducteurs préfèrent la rigidité du BCR sur la souplesse du BB. En outre, les études faites par l'Université de l'Illinois, surtout celle intitulée "Safety Considerations of Rutting and Washboarding Asphalt Road Surfaces", a démontré que la chaussée rigide assure, dans l'ensemble, une bonne adhérence et une distance d'arrêt plus courte que les revêtements en BB, surtout en cas de revêtements mouillés [41] (figure 3.13).

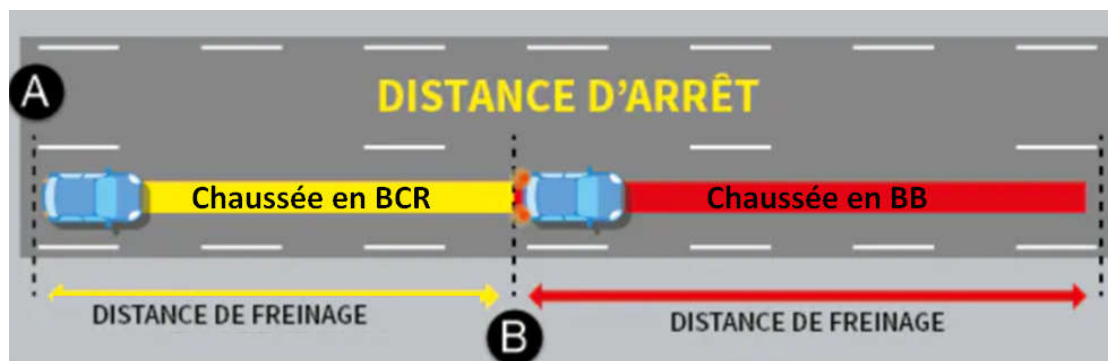


Figure 3.13 : Schéma représentatif de la différence de la distance d'arrêt pour une chaussée en BB et une chaussée en BCR

De point de vue énergie de consommation du carburant, les expériences menées par le motoriste Detroit Diesel [42], ont montré que l'estimation de la consommation de carburant d'un camion, à 100 km/h, dans le cas d'une chaussée rigide en BCR est inférieure de 8% à celle qu'on obtient dans le cas d'une chaussée en BB froid et de 17,5 % à celle d'une chaussée en BB chaud.

En ce qui concerne l'état de surface, elle constitue une des limites d'un revêtement en BCR. En effet, elle n'est pas trop adaptée aux vitesses de

circulation élevées. Toute fois lors de la mise en place, beaucoup de précautions peuvent être prises.

4 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation des principales caractéristiques physicomécaniques d'un BCR nécessaire.

A l'instar du béton plastique, le BCR est constitué de ciment, d'eau et de granulats grossiers et fins. Il possède cependant une structure interne particulière de par sa forte proportion de granulats et sa consistance très sèche. Sa morphologie lui confère une durabilité et une dureté plus importantes que celles du béton plastique. La rapidité de mise en place, les faibles teneurs en ciment et l'utilisation d'ajouts minéraux (cendres volantes, fillers, calcaires, résidus miniers, etc.) en font un matériau économiquement très intéressant pour l'industrie de la construction.

Le choix et la nature des constituants d'un mélange de BCR doivent répondre à des exigences diverses (résistance mécanique, durabilité, etc.) Une attention particulière doit être apportée à la formulation.

A travers des études antérieures sur les caractéristiques du BCR à l'état durci relative aux résistances, module d'élasticité et loi de comportement, les chercheurs ont pu tirer les conclusions suivantes:

- Comme pour les mélanges de BC, les résultats confirment que les propriétés du BCR à l'état durci dépendent essentiellement de la quantité de ciment, de la teneur en eau ainsi que de la qualité des granulats.
- Physiquement, l'empilement est influencé surtout par le volume de ciment et la compacité du mélange. En effet, lorsque l'empilement diminue, alors on donne la chance aux gros granulats de supporter les efforts et, par conséquent, la résistance à la compression augmente.
- La résistance mécanique du BCR dépend, de la quantité de pâte qui entoure les granulats et ce sont les gros granulats serrés des mélanges de

BCR qui doivent supporter les efforts en donnant lieu à des excellentes résistances mécaniques comparées à celles du BC.

- Lors des mesures du module d'élasticité, la courbe contrainte-déformation du BCR présente une pente relativement plus raide dans la zone élastique que celle du BC. En conséquence, une différence importante est enregistrée entre les valeurs de module d'élasticité du BCR et du BC. En outre, le BCR développe un module d'élasticité supérieur de 10 à 58% celui du BC à égale résistance.
- Le module d'élasticité est fortement influencé par la nature bi-phasique du BCR, la composition du mélange et le diamètre maximale de la granulométrie. En effet, les modèles Trisphère et BAEL sont les plus convenables pour la prédiction des modules élastiques.
- Le compactage augmente fortement les modules d'élasticité. Lorsque le volume des vides d'un BCR est important, le matériau sera plus déformable et, par conséquent, le module est plus faible que lorsque l'on a réussi à refermer ces interstices. Cette augmentation du module d'élasticité par compactage se traduit aussi par une augmentation de la résistance.
- La différence entre les valeurs déterminées sur trois facettes différentes (résistances à la compression et modules élastiques), prouve que le BCR est un matériau anisotrope.
- Le phénomène de Vibro-Compactage influence fortement le comportement de BCR. Cela, est dû à la disposition des gros granulats suit une direction privilégiée sous l'effet de la pression de la charge et de la vibration de l'éprouvette.
- Les produits d'hydrocarbures affectent considérablement la résistance à la compression des mélanges du BCR. Ce phénomène montre bien que le BCR est un matériau qui résiste mal aux attaques des hydrocarbures.
- La perte de résistance est fortement influencée par la concentration en CO₂. Les produits qui comportent un taux de CO₂ le plus élevé affectent fortement le BCR et ils font chuter sa résistance jusqu'à une valeur de 82% de sa résistance initiale.

- Les mélanges de BCR présentent une porosité importante qui a favorisé l'infiltration et la pénétration des produits d'hydrocarbures à l'intérieur des éprouvettes. Ces produits ont pour effet de freiner l'opération d'hydratation qui est encore incomplète. De plus, ils détruisent les liaisons d'adhérence entre les granulats et le liant.

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	40
2	PROPRIÉTÉS DU BCR A L'ETAT FRAIS.....	40
2.1	Maniabilité	40
2.2	Masse volumique.....	43
2.3	Teneur en air.....	44
2.4	Ségrégation.....	44
3	PROPRIÉTÉS DU BCR A L'ETAT DURCI	45
3.1	Propriétés mécaniques	45
3.1.1	Résistances à la compression.....	45
3.1.2	Résistance à la traction.....	46
3.1.3	Résistance à la flexion.....	47
3.1.4	Comparaison entre les résistances mécaniques d'un BCR et un BC.....	48
3.1.5	Effets des adjuvants sur le comportement mécanique de BCR	49
3.1.6	Effets des ajouts sur le comportement mécanique de BCR	49
3.2	Modulé de d'élasticité.....	52
3.3	Le retrait et le gonflement	53
3.4	La durabilité.....	54
4	CONCLUSION	56

CHAPITRE 4

MISE EN ŒUVRE DU BCR

1 LES PROCÉDÉS DE RÉALISATIONS DU BCR

La formulation, les méthodes de confection et les méthodes de mise en place diffèrent en fonction du type de BCR (pour pavage ou pour barrage). Pour sa confection, le BCR est produit, suivant la taille du projet, dans des centrales fixes ou mobiles. Le malaxage peut se faire, soit dans un malaxeur conventionnel à axe vertical, un malaxeur à tambour basculant, ou dans le cas des petits projets, dans une bétonnière. Le transport jusqu'au chantier est assuré à l'aide de camions à benne basculante, et par convoyeurs pour certains cas des barrages. On emploie couramment, pour sa mise en œuvre, des finisseurs à haut pouvoir de compactage [14]. Sauf pour des pavages avec des épaisseurs inférieures à 25 cm, le BCR est mis en place avec une paveuse dite à asphalte. Immédiatement après sa mise en place par les finisseurs, le BCR est compacté successivement avec des rouleaux vibrateurs à roues métalliques puis avec des compacteurs pneumatiques. La circulation du faible trafic est ouverte juste après sa mise en place et on ne permet la circulation du fort trafic qu'après 5 à 7 jours de mûrissement [23].

Les techniques de mise en œuvre en BCR comprennent 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.

2 PRODUCTION DU BCR

Fabriquer du béton consiste à reprendre sur stock, doser et malaxer les divers composants, granulats, ciments, eau, adjuvants, approvisionnés sur le chantier.

Le choix du type de centrale à béton dépend des caractéristiques du projet c'est-à-dire de la proximité et la disponibilité des unités de production, de la

quantité de béton à mettre en place et du budget à investir. Il existe deux types d'unités de production :

- les centrales fixes.
- les centrales mobiles.



(a)



(b)

Figure 4.1 : Photographie d'une (a) centrale mobile, (b) centrale fixe[43]

3 TRANSPORT DU BCR

Le transport du BCR depuis la centrale de malaxage doit être réalisé dans des conditions telles qu'à l'arrivée sur le chantier, il réponde aux caractéristiques exigées.

Ces derniers sont couverts de toiles de protection (bâches étanches et opaques) pour minimiser les pertes d'eau par évaporation, dues à l'action des rayons solaires ou du vent.

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

Le transport du BCR se fait généralement à l'aide de camions à bennes basculantes et Délai variable selon mélange et conditions ambiantes pour le

pavage. Pour le cas de barrage, on utilise les convoyeurs pour assurer le transport en élévation.



Figure 4.2 : *Méthode de transport de BCR*

4 MISE EN PLACE DU BCR

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

La mise en place de BCR est fortement liée aux conditions météorologiques. Il est interdit de mettre en œuvre le béton si la probabilité de précipitation est

supérieure à 50%. En cas de pluie, interrompre la mise en œuvre, compléter le plus rapidement possible le compactage du béton déjà mis en place, et protéger les surfaces fraîchement compactées contre la pluie. La température ambiante doit être supérieure à 5°C durant les 24 heures suivant l'exécution.

4.1 Préparation de l'infrastructure

Il s'agira, dans un premier temps, de compacter la fondation granulaire à au moins 95 % de la masse volumique de l'essai Proctor modifié. Après nivellement pour avoir un profil plan, uniforme et lisse, il faudra humidifier la surface de la fondation granulaire immédiatement avant la mise en place du béton. Cependant, l'excès d'eau est à éviter; en effet, 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 plus élevées. Donc un apport d'eau provenant de la fondation dans cette partie critique du revêtement augmenterait localement le rapport E/C et diminuerait par conséquent la résistance mécanique du BCR.

C'est ainsi que les zones humides de la fondation granulaire doivent être excavées et remplacées par du nouveau matériau granulaire. Le cas échéant, un drainage adéquat est requis.

4.2 Répandage et réglage

La mise en place du BCR se fait de préférence au moyen d'un finisseur équipé d'une poutre à haut pouvoir de compactage et d'un dispositif de nivellement automatique.

On pourrait utiliser les finisseurs conventionnels comme ceux utilisés pour le répandage des enrobés bitumineux, mais le degré de pré-compactage du BCR serait plus faible dans ce cas. Lors de la construction, il est primordial de mettre en place le BCR de façon continue afin d'éviter les joints froids tant horizontaux que verticaux.

Par ailleurs, l'ACI recommande qu'il y ait un intervalle maximum d'une heure entre la mise en place de deux couches successives.

D'autre part, il est recommandé de corriger les irrégularités ou inégalités de répannage à l'aide de raclettes.

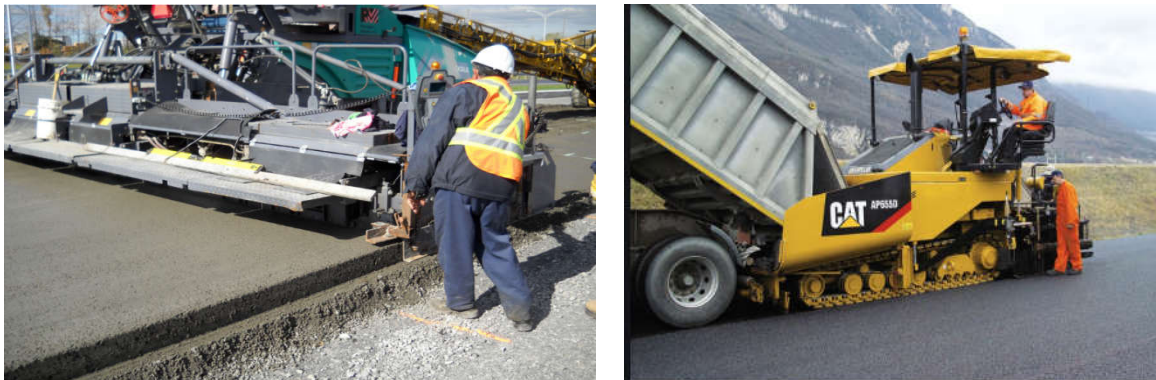


Figure 4.3 : *Mise en place du BCR en pavage*

5 COMPACTAGE DU BCR

Le compactage du BCR est identique au compactage d'un sol ou d'une couche de graves en corps de chaussée, car ce matériau se comporte, lorsqu'il sort du malaxeur, comme un sol légèrement humide et sa consistance relativement "sèche" nécessite obligatoirement l'application d'un effort de compactage qui modifie fortement les caractéristiques mécaniques de ce matériau. Ce compactage peut être réalisé en utilisant les mêmes moyens utilisés pour les travaux publics ou les sols, tels que les finisseurs et les rouleaux compacteurs vibrants ou non. Malgré que ces méthodes de compactage soient nombreuses et différentes, elles mènent toujours au même objectif qui est la densification du BCR. Généralement, le degré minimal de compactage à respecter est de 97 % de l'optimum Proctor modifié.

5.1 Opération de compactage

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

A défaut d'un compacteur à pneus, on peut donner quelques passes finales du compacteur à rouleau sans vibration pour fermer la surface.

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

Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale (figures 4.4 et 4.5).



Figure 4.4 : *Mode de mise en œuvre et de compactages du BCR [6]*

6 MÛRISSEMENT

En raison de la faible teneur en eau du BCR, une cure soignée s'impose, immédiatement après le compactage. Deux cas peuvent se distinguer suivant que le BCR est recouvert ou non.

Ainsi, si le BCR n'est pas recouvert, on applique une cure à l'eau dont la durée est d'environ une semaine. Afin d'éviter un délavage à la surface fraîchement compactée, l'eau ne doit être, au début, que finement vaporisée.

Cependant, si une couche en enrobé ou un enduit superficiel est prévu sur le BCR, on fait recours aux produits de cure comme les émulsions bitumineuses. Et, si, par ailleurs, la circulation est permise sur l'émulsion, celle-ci recevra au préalable un gravillonnage ou un sablage.

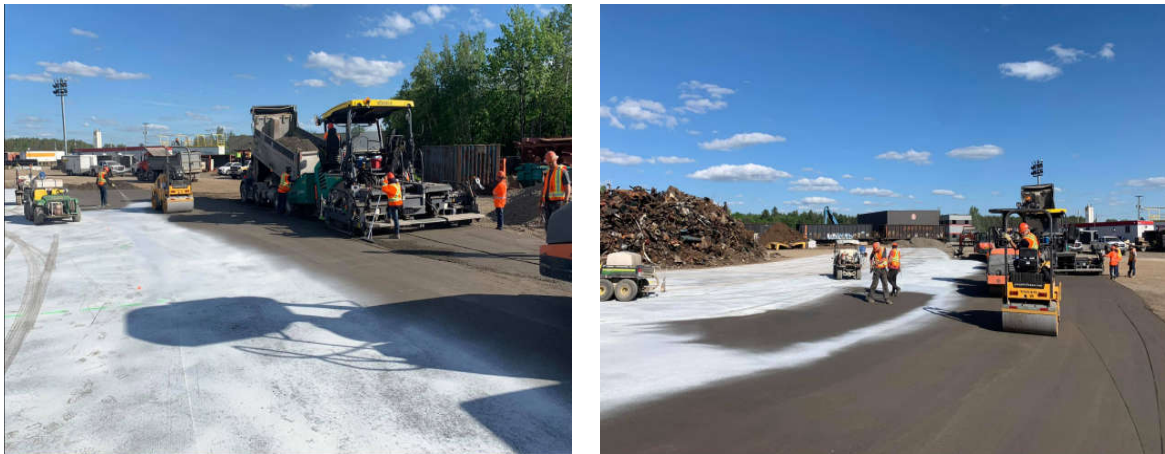


Figure 4.5 : *Transport, mise en place et mûrissement du BCR [44]*

7 L'EXÉCUTION DES JOINTS

Afin de faciliter la dilatation et le retrait des dalles en BCR sous l'effet des conditions climatiques et pour permettre leurs déformations relatives, on réalise des joints entre celles-ci. Mais ces joints constituent eux-mêmes des problèmes pour les chaussées en BCR puisqu'ils représentent, au fil du temps, les points de localisations des épaufrures et de pompages. C'est en ces points que des fissures, plus ou moins importantes, finissent généralement par se reproduire. Sur les chaussées rigides en BCR, on constate que des légères déformations des dalles à

proximité du joint prennent naissance sous l'action des charges et s'accroissent avec le temps, plus vite à l'amont qu'à l'aval. Ce problème connu sous le nom de "marches d'escalier" est très présent sur les chaussées rigides au niveau des joints moulés et même sur des joints sciés [12].

En général, sur les chaussées rigides en BCR, les joints doivent être sciés après durcissement du béton afin d'obtenir un bon uni de chaussée (Figure 4.7). On distingue des joints de construction disposés longitudinalement et parallèles à l'axe de la chaussée. Ils correspondent généralement aux reprises du bétonnage. Les revêtements en BCR comportent aussi des joints de dilatation sous forme de coupures de la dalle sur toute sa hauteur. Ces joints ont des épaisseurs variant de 20 à 30 mm. L'uni est amélioré aussi avec des joints de retrait inclinés par rapport à l'axe de la chaussée (1/6) et irrégulièrement espacés pour éviter la résonance [12].



Figure 4.6 : *Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR - aire Industriel - Montréal*
[12]

8 CONTRÔLE DE QUALITÉ

Le processus de contrôle de la qualité exige un bon contrôle du compactage sur chantier. En effet, un compactage insuffisant (< 97%) influence 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 4.8).



Figure 4.7 :Contrôle du compactage [12]

9 CONCLUSION

Les trois étapes de l'organisation d'un chantier de BCR cités dans ce chapitre sont la fabrication, le transport, et la mise en place. La fabrication est assurée par une centrale fixe ou mobile tandis que le transport est fait généralement à l'aide de camions à bennes basculantes ou convoyeurs pour le cas des barrages.

Au cours des opérations citées précédemment, toutes les précautions adéquates doivent être prises pour éviter la ségrégation du béton. Le revêtement est mis en place à l'aide des mêmes engins utilisés en travaux publics et cette opération requiert une certaine dextérité. Toutefois, la bonne organisation de chantier reste une condition nécessaire de la réussite d'un projet de BCR.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail de recherche c'est une étude bibliographique présentée sous forme d'un état de l'art sur le Béton Compacté au Rouleau (BCR). Le BCR est un béton ferme (mélange d'eau, de ciment, de granulats, d'adjuvants et d'ajouts cimentaires si requis) qui nécessite l'apport d'une énergie de compactage externe pour être bien consolidé en vue d'une application pour barrages ou pour pavages. La formulation du BCR, les méthodes de construction et les méthodes de mise en place diffèrent en fonction du type d'application.

D'après ce travail on a pu tirer certaines conclusions :

- Un BCR correctement formulé, permet de développer rapidement des résistances mécaniques élevées et possède une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges très lourdes.
- Pour la mise en œuvre du BCR, on utilise des finisseurs à haut pouvoir de compactage. Le compactage du BCR est identique au compactage d'un sol ou d'une couche de graves en corps de chaussée. Généralement, le degré minimal de compactage à respecter est de 97 % de l'optimum Proctor modifié. La circulation du faible trafic est ouverte juste après sa mise en place et on ne permet la circulation du fort trafic qu'après 5 à 7 jours de mûrissement.

-
- Du point de vue économique, le BCR possède des avantages incontestables liés aux gains de temps et d'argent. On considère en général que le coût du m³ de B.C.R. mis en œuvre dans un barrage poids est en moyenne deux fois inférieur à celui d'un béton classique. Couramment les rythmes d'élévation de l'ouvrage de 1m par jour sont atteints. On plus, les études ont démontré que près de 61 % des revêtements en BB subissent des dommages notables pendant la période de dégel, comparativement à 5,5 % seulement des chaussées rigides en BCR. En plus, des travaux d'entretien sont exigés tous les trois à cinq ans pour les routes en BB. Par contre, on ne commence qu'après 12 ans à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en BCR.
 - Du point de vue sécurité, les expériences ont montré que les conducteurs préfèrent la rigidité du BCR sur la souplesse du BB. Ainsi que de point de vue énergie de consommation du carburant, dans le cas d'une chaussée rigide en BCR est inférieure de 8% à celle qu'on obtient dans le cas d'une chaussée en BB froid et de 17,5 % à celle d'une chaussée en BB chaud.

En fin, vu les conditions sanitaire (covid-19), on n'a pas pu réaliser une partie expérimentale pour ce sujet qui est avéré très intéressantes. Pour cela, nous recommandons cette partie comme perspectives pour les étudiants avenir.

Références biobibliographiques

- [1]. 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.
- [2]. Anderson R., (1986) Roller Compacted pavements- Physical Properties, CBI report No. Ra 3:86, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, pp. 18-24.
- [3]. Huang Y. H., (2004), Pavement Analysis and Design, seconde édition, Université de Kentucky USA, pp. 5-8.
- [4]. Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.
- [5]. Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M., (2000), Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.
- [6]. ZDIRI, Mustapha. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières-Cas des matériaux de gisements locaux. 2008. PhD Thesis. Artois.
- [7]. Diawoye ND1AYE & Aboubakry SALL, Conception, Formulation et mise en oeuvre d'un Beton Compacté au Rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées : APPLICATION AU TRONCON DIAMNIADIO-MBOUR. projet de en d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception. Ecole supérieure polytechnique, UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR. 2006-2007
- [8]. Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>
- [9]. Site de l'American Concrete Pavement Association, <http://www.pavement.com>

- [10]. ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- [11]. 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.
- [12]. Gagné R., (2004), Le Béton Compacté au Rouleau BCR, présentation PowerPoint, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [13]. Zaniewski, J.P., (1989) Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption, SR289.01P, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- [14]. GAUTHIER, P., MARCHAND, J., BOISVERT, L., OUELLET, E., PIGEON, M. Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtements en béton compacté au rouleau, Formation continue GCI-A2455, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, 2000, pagination multiple.
- [15]. GAGNE, Richard: Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR. CRIB 2004.
- [16]. GAGNE, Richard: Les bétons compactés au rouleau- principes, application et nouveau développement BCR, CRIB 2004.
- [17]. CHENG, C., WEI, S., HONGGEN, Q. The analysis on strength and fly ash effect of roller-
- [18]. GAGNÉ, R. High-performance roller-compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability, International symposium on engineering materials for sustainable development, Okayama, Japon, 2000, 20-21 novembre, pp. 74-88. compacted concrete with high volume fly ash, Cement and Concrete Research, 2000, vol. 30, pp. 71-75.

- [19]. Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, Rapport interne, pagination multiple.
- [20]. Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pp.19-25.
- [21]. Neville A. M., (2000), Propriétés des bétons, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Sherbrooke, Laval, Eyrolles, France, pp. 255-401.
- [22]. ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT: Conception et réalisation des revêtements en BCR 2001.
- [23]. Pouliot N., Sedran T., De Larrard F. et Marchand J., (2001), Prédiction de la compacité de bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 233, Juillet Aout, Ref. 4370, France, pp. 23-36.
- [24]. Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes, Chaussée en béton de ciment, Presse de l'École Nationale des Ponts et chaussées Paris France, pp. 81-107.
- [25]. GAUTHIER, P., MARCHAND, J., BOISVERT, L., OUELLET, E., PIGEON, M. Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtements en béton compacté au rouleau, Formation continue GCI-A2455, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, 2000, pagination multiple.
- [26]. OUELLET, E., MARCHAND, J., REID, E. Comportement mécanique et durabilité au gel de mélanges de béton compacté au rouleau à faible teneur en ciment, Progrès dans le domaine du béton, ACI - section du Québec et de l'Est de l'Ontario, Sherbrooke, Québec, 1998, 24 et 25 novembre, 6 p.
- [27]. SEDRAN, T., De LARRARD, F., ANGOT, D. Préviation de la compacité de mélanges granulaires par le modèle de suspension solide – Partie I : Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées.

- [28]. PIGEON, M., MARCHAND, J. The frost resistance of roller-compacted concrete, *Concrete International*, 1996, vol. 18, no 7, juillet, pp. 22-26.
- [29]. PIGEON, M. La durabilité au gel du béton, *RILEM :Matériaux et Constructions*, 1989, vol. 22, pp. 3-14.
- [30]. Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compact au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.
- [31]. Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>
- [32]. GABRIEL 1. Assaf: Catalogue de dimensionnement des aires de circulations et de chargement en béton compacté au rouleau.
- [33]. BARON, J., OLLIVIER, J-P. La durabilité des bétons, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992, 453 p.
- [34]. Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pp. 25-41.
- [35]. Nanni A., Ludwig D. A. et Shoenberger J. E., (1996), Physico-Mechanical Properties and Load Transfer efficiency of RCC Pavement, *ACI Materials Journal*, N° 93-M40, Juillet Août, pp. 356-361.
- [36]. Gagné R., (2004), présentation PowerPoint, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke Canada.
- [37]. Smith T., Tighe S. et Fung R., (2001), Presentation of the Concrete Pavement Technology Advancements, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia.
- [38]. 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.
- [39]. Site de l'American Concrete Pavement Association, <http://www.pavement.com>.

- [40]. ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- [41]. Site web de Ciment de Québec, <http://www.BCR.CC.html>.
- [42]. Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>.
- [43]. Service d'expertise en matériaux (S.E.M.) inc., Rapport interne, pagination multiple.
- [44]. Gagné R., (2000), High-performance roller compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability, International symposium on engineering materials for sustainable development, Novembre 2000, Okayama, Japon, pp. 74-88.

