

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

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

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil.

Par :

- DJABALLAH Islam.

- ZIAD Housseyn.

Sujet:

Etude du comportement d'un béton compacté au rouleau

à haute performance (BCRHP)

Soutenu publiquement, le : 30 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Dr. KHANNOUF Abdelaziz	MAB	Univ-BBA	President
Dr. MAAFI Nabil	MCA	Univ-BBA	Examination
Dr. BENAMMAR Abdelhafid	MCB	Univ-BBA	Examination
Dr. HAMLIA Wafa	MAB	Univ-BBA	Encadrante
Dr. BENOUDAHA Abdelatif	MCB	Univ-BBA	Co-Encadrant

Année universitaire 2023/2024





REMERCIEMENTS

Nous remercions le dieu qui nous a donné le pouvoir et nous a aidé à terminer ce modeste travail.

JE remercie également ma mère et mon père pour leur soutien tout au long de mon parcours académique.

Nous adressons nos profonds remerciements à notre encadreur de mémoire

Dr HAMLIA WAFA et BENOUDAH ABDELATIF qui m'a proposé ce thème et m'a initié dans cette voie de recherche pour avoir accepté nous encadrer, pour ses directions et ses conseils avisés.

Enfin, Nos remerciements à l'ensemble des personnes ayant, contribué de loin ou de près au bon déroulement de mes travaux.



Dédicace

*Je dédie ce projet de fin d'étude
en premier lieu à mes parents
surtout ma chère mère qui
m'ont aidé et soutenu durant
toutes ces longues années
d'étude. A mes chers frères et
sœurs, et à toute ma famille, à
tous mes amis surtout A mon
binôme ZIAD HOUSSEYN*

ISLAM





Dédicace

Je dédie avec grand plaisir, ce modeste travail à :

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu Tout
puissant ;*

Je puisse les honorés ;

A mon père ;

A ma chère mère ;

*A ma femme et mes enfants (waeil, Alaa, Amina
Meriem)*

A mes frères et chères sœurs ;

A toute ma famille ;

A mon binôme : DJABALLAH Islam;

*A tous les enseignants du département de génie
civil ;*

Et tous mes amis proches;

ZIAD HOUSSEYN



Résumé

La recherche sur l'innovation du béton et l'amélioration de ses propriétés est d'une importance capitale pour le domaine de la construction. En développant des formulations de béton plus résistantes, durables et écologiques, les chercheurs peuvent répondre aux défis croissants posés par les exigences modernes en matière de construction durable et performante. Les innovations, telles que le béton compacté au rouleau haute performance (BCRHP), permettent d'augmenter la longévité des structures tout en réduisant l'empreinte écologique.

L'objectif de cette étude c'est la caractérisation et la formulation d'un béton compacté au rouleau haute performance (BCRHP). La méthodologie de conception de mélange va être développée en modifiant la teneur en ciment par l'ajout (fumée de silice). Les résultats de cette étude montrent que le BCRHP développe des propriétés physique et mécanique acceptables pour une utilisation dans les chaussées des aires d'entreposage et aéroports.

La résistance à la compression et de la flexion de mélange contenant 5% de fumée de silice présente une meilleure résistance par rapport au mélange témoin. Le retrait de mélange 10% donne un meilleur résultat.

Mots clés : béton compacté au rouleau, haute performance, fumée de silice, performance mécanique et physique.

Abstract

Research into concrete innovation and improvement of its properties is of paramount importance to the construction field. By developing stronger, more durable and environmentally friendly concrete formulations, researchers can meet the growing challenges posed by modern demands for sustainable and high-performance construction. Innovations, such as high-performance roller compacted concrete (BCRHP), make it possible to increase the longevity of structures while reducing the ecological footprint.

The objective of this study is the characterization and formulation of a high-performance roller compacted concrete (BCRHP). The mix design methodology will be developed by modifying the cement content by adding (silica fume). The results of this study show that BCRHP develops physical and mechanical properties acceptable for use in storage airways and aerodromes.

The compressive and flexural strength of the mixture containing 5% silica fume presents better resistance compared to the control mixture. Removing the mixture 10% gives a better result.

Keywords: roller compacted concrete, high performance, fly ash, mechanical and physical behaviour.

ملخص

يعد البحث في ابتكار الخرسانة وتحسين خصائصها ذا أهمية قصوى في مجال البناء. ومن خلال تطوير تركيبات خرسانية أقوى وأكثر متانة وصديقة للبيئة، يمكن للباحثين مواجهة التحديات المتزايدة التي تفرضها المتطلبات الحديثة للبناء المستدام وعالي الأداء. تتيح الابتكارات، مثل الخرسانة المضغوطة عالية الأداء (BCRHP)، إمكانية زيادة عمر الهياكل مع تقليل البصمة البيئية.

الهدف من هذه الدراسة هو توصيف وصياغة الخرسانة المضغوطة ذات الأداء العالي (BCRHP) سيتم تطوير منهجية تصميم الخلطة من خلال تعديل محتوى الأسمنت بإضافة (دخان السيليكا). تظهر نتائج هذه الدراسة أن BCRHP يطور خواص فيزيائية وميكانيكية مقبولة للاستخدام في الممرات الجوية والمطارات.

مقاومة الضغط والانتشاء لمحتوى الخليط بنسبة 5% من دخان السيليكا تمثل مقاومة أفضل مقارنة بالخليط في ذلك الوقت. الاسترداد النقدي هو 10% بدون نتيجة أفضل.

كلمات البحث: الخرسانة المضغوطة بالأسطوانة، أداء عالي، غبار السيليكا، الأداء الميكانيكي والبدني.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
1.PRÉAMBULE.....	
2.Problématique.....	2
3.Objectif	3
4.Structure du mémoire	3

CHAPITRE I : Béton compacté au rouleau

I.1 Introduction.....	4
I.2.Historique.....	5
I.3. Définition du BCR.....	6
I.4. Les composants.....	7
I.4.1. Les granulats.....	7
I.4.2. Le liant.....	9
I.4.3. Adjuvant.....	10
I.4.4 Additions	11
I.4.5 l'eau de gâchage.....	12
I.5. les avantages.....	12
I.6. les inconvénients	13
I.7 Méthode de formation.....	13
I.7.1 Méthodes empiriques.....	14
I.7.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique.....	15
I.7.3 Autres méthodes	18
I.8 .Préparation et mise en place du BCR.....	19
I.9 Comportement mécanique du BCR	20

I.9.1. Résistance à la compression.....	21
I.9.2. Résistance à la traction.....	22
I.8.4 La résistance à la flexion	23
I.9. Conclusion.....	23

CHAPITRE II : Béton haute Performance

II.1.Introduction	24
II.2Historique du BHP	24
II.3. Définition du BHP	25
II.4 Composition du BHP	26
II.4.1 Le ciment	27
II.4.2. Les granulats	27
II.4.3. Les additions.....	27
II.4.4. Les adjuvants.....	27
II.4.5. Fumée de silice.....	28
II.5 La formulation du BHP	28
II.5.1 Méthode du Sherbrooke.....	28
II.5.1.1 Rapport eau/liant	28
II.5.1.2 Le dosage de l'eau	29
II.5.2 Dosage du super plastifiant	30
II.5.3 Dosage de fumée de silice	30
II.5.4 La teneur en air	30
II.6 Les avantages des BHP	30
II.7 Caractéristiques des BHP	31
II.7.1. caractéristique physique	31
II.7.2 Caractéristiques mécaniques	32

II.7.2.1 Résistance à la compression.....	32
II.7.2.2 le retrait	33
II.8 Conclusion.....	34

CHAPITRE III : Caractérisation Des Matériaux utilisés du BCR

III.1.Introdction	35
III.2.Matériau utilisé	35
III.2.1 Caractéristique de sable	35
III.2.1.1.1 Module de finesse	37
III.3 Propreté «équivalent de sable» (NF EN 933-8).....	38
Interprétation des résultats et qualité du sable:	39
III.3.1. Essais pour détermination de la masse volumique en vrac	39
III.3.2 Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.....	40
III.3.3 Essais au bleu de méthylène (NF EN 933-9)	41
III.4 Caractéristique granulats	42
III.4.1 Analyse granulométrique (NFEN 933-1(Version mai 2012)).....	43
III.4.2. Déterminations de la forme des granulats coefficient d'Aplatissement.....	44
III.4.3 La masse volumique en vrac (Apparente) et la masse volumique absolue	45
III.4.4 La résistance a la fragmentation par chocs .essai los angles.....	46
Principe de l'essai.....	46
Classification.....	47
III.5: Caractéristique de ciment utilisé	47
Caractéristique	48
III.6 Le finesse de la fumée de silice.....	48
Conclusion.....	49

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.1.Introduction.....	50
IV.2 Formulation du BCRHP.....	50
IV.2.1 Fuseau granulométrique	50

IV.3 Déterminer la Teneur en eau.....	51
IV.4 Formulation finale et Préparation des mélanges	54
IV.4.1 malaxage de mélange	55
IV.4.2 compactage de mélange	56
IV.4.1 Confection des éprouvette.....	57
IV.5. Résultat et discussion	58
IV.5.1 Résultats de la résistance à la compression	58
IV.5.2. Résultats de la résistance à la flexion	59
IV.5.3 Retrait	61
IV.6 Conclusion générale	62

Liste des figures

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Fig.I.1 : Piste d'aéroport de béton abandonné [4]	2
Fig.I.2 : Parc à conteneurs pour le stockage extérieur de marchandises [5]	3

CHAPITRE I

Fig. I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau[6].....	4
Fig. I.2. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930[8]....	5
Fig. I.3. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique [10].....	6
Fig. I.4. Détermination du volume de pâte minimal [28].....	15
Fig.I.5. Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR [29].....	16
Fig.I.6. Courbes de Proctor [29].....	17
Fig.I.7. Mise en place de BCR par bandes [32].....	20
Fig.I.8. Effet du caoutchouc sur la résistance en compression à 28 jours [34].....	21
Fig. I.9 Effet du caoutchouc sur la résistance en traction par fendage.[34].....	22
Fig. I.10.Variation de la résistance en flexion contre la teneur en caoutchouc[36]...	23

CHAPITRE II

Fig.II.1. Relation E/L proposée par rapport à la résistance à la compression [45] ...	29
Fig. II.2. Détermination du dosage minimal d'eau [45].....	29
Fig. II.3. Evolution de la résistance à la compression dans le temps [53].....	33
Fig.II.4. Évolution des retraits des différents bétons [53].....	34

CHAPITRE III

Fig.III.1. Une balance et une tamiseuse vibrante.....	36
Fig.III.2. L'Analyse granulométrique du sable de Carrière (BETONEX).....	37
Fig.II.3. Essais d'équivalent de sable.....	38
Fig.III.4. Masse volumique de sable	40
Fig. III.5. Essais au bleu de méthylène.....	42
Fig..III.6. Courbe granulométrique des granulats (3/8),(8/15).....	44
Fig..III.7. Appareil de l'essai Los Anglos.....	46
Fig.III.8. Fumée de silice	48
Fig.III.9 Perméabilimètre de Blaine	49

CHAPITRE IV

Fig. IV.1. La courbe du fuseau granulaire.....	51
Fig. IV.2. Variation de densité sèche en fonction de teneur en eau (14% ciment...)	52
Fig. IV.3. Variation de densité sèche en fonction de teneur en eau (15% ciment)...	53
Fig. IV.4. Variation de densité sèche en fonction de teneur en eau (16% ciment)...	54
Fig. IV.5. Malaxage sec des constituants.....	55
Fig. IV.6. Malaxage du mélange du BCR (eau + constituant sec).....	55
Fig.IV.7. a/ marteau piqueur utilisé pour le compactage ; b/ compactage de l'éprouvette..	56
Fig. IV.8. Eprouvettes (10*10*10) réalise pour l'essai de compression.....	56
Fig. IV.9. Éprouvettes (7*7*28) réalise pour l'essai de flexion et retrait.....	57
Fig.IV.10. résistance à la compression des mélanges de BCRHP.....	57
Fig. IV.11. Encrassement des éprouvettes de compression.....	58
Fig. IV.12. Résistance à la flexion des mélanges de BCRHP.....	59
Fig. IV.13. Encrassement des éprouvettes de flexion.....	59
Fig.IV.14. Retrait des BCR.....	60

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1. Distribution granulométrique idéal de granulats grossiers d'après [15]	8
Tableau I.2. Distribution granulométrique idéal de granulats fins d'après [15].....	9

CHAPITRE II

Tableau II .1. Classes du Béton à haute performance (BHP) [52].....	32
---	----

CHAPITRE III

Tableau III.1. Analyse granulométrique du sable de carrière BETONEX.....	36
Tableaux III.2 Grosseur ou finesse de sable mesurée à partir du module de finesse.....	37
Tableau III.3. Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable carrière BETONEX.....	38
Tableau III.4: Masse volumique en vrac (apparente)	40
Tableau III.5: Masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.....	41
Tableau III.6 : Teneur en eau de sable utilisé.....	42
Tableau.III.7 : Analyse granulométrique de gravier par tamisage.....	43
Tableau III.8 : essai de aplatissement.....	45
Tableau.III.9. La masse volumique des graviers.....	45
Tableau III.10. Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	46
Tableau.III.11. Classification des roches en fraction du coefficient L_a	47

CHAPITER IV

Tableau IV.1 Résultats essai Analyse granulométrique.....	50
Tableau IV. 2 : Résultats essai Proctor (14%ciment).....	51
Tableau IV.3 des résultats des mesures.....	52
Tableau IV.4 : Résultats essai Proctor (15%ciment).....	52
Tableau IV.5 des résultats des mesures.....	53
Tableau IV.6: Résultats essai Proctor (16%ciment).....	53
Tableau IV.7 des résultats des mesures.....	54
Tableau IV.8. Les différentes proportions de mélange.....	55

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. PRÉAMBULE :

Le béton est aujourd'hui l'un des matériaux de construction les plus répandus à travers le monde. Pendant de nombreuses décennies après sa découverte, ce matériau a connu peu d'évolutions. Cependant, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées, diversifiant considérablement ses applications. Les recherches approfondies sur ses composants granulaires ont notamment permis d'améliorer ses propriétés, notamment avec l'introduction des bétons à hautes performances (BHP). Par la suite, d'autres types de bétons ont vu le jour pour répondre à des besoins spécifiques, tels que béton compacté au rouleau BCR. [1].

Les BHP se distinguent par leurs résistances mécaniques élevées, dépassant souvent les 60 MPa. Cette performance est obtenue en réduisant la porosité du matériau, notamment grâce à l'incorporation de superplastifiants, qui permettent de diminuer la teneur en eau nécessaire tout en maintenant une maniabilité adéquate. De plus, l'utilisation d'éléments ultrafins élargit le spectre granulaire du mélange, favorisant une haute compacité. Ces caractéristiques confèrent aux BHP une durabilité accrue, résultant d'une perméabilité réduite et d'une meilleure résistance aux agressions environnementales. [1].

Cependant, malgré les avantages qu'ils offrent, notamment une résistance mécanique très élevée, les BHP nécessitent une attention particulière lors de leurs mises en place et de leur finition, qui diffère de celles des bétons conventionnels. Même s'ils présentent généralement un affaissement élevé, il est impératif de prévoir une vibration interne ou externe afin de faciliter la mise en place et d'améliorer la performance ainsi que l'aspect des surfaces du béton. [1].

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un matériau rigide caractérisé par un affaissement nul, composé d'un mélange précis de granulats, de ciment, d'eau et d'adjuvants, éventuellement avec l'incorporation de matériaux cimentaires supplémentaires. Ce matériau est mis en place sur le site de construction et compacté à l'aide d'équipements spécialisés, tels que les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou les rouleaux compresseurs conventionnellement utilisés dans les travaux publics. [2].

La formulation du BCR implique une attention particulière à la proportion des composants pour garantir des propriétés mécaniques optimales, notamment en termes de résistance à la compression, de durabilité et de résistance aux contraintes environnementales. Les adjuvants sont souvent ajoutés pour ajuster les propriétés du mélange frais ou durcis, améliorant ainsi sa maniabilité, son temps de prise ou d'autres caractéristiques spécifiques en fonction des exigences du projet. La compaction du BCR est une étape cruciale qui assure son homogénéité et sa densité, permettant ainsi d'atteindre les performances requises une fois durcies. Les rouleaux compresseurs, adaptés à la taille et à la configuration du chantier, sont utilisés pour cette tâche, appliquant une pression contrôlée sur la surface du béton pour éliminer les vides d'air et garantir une liaison efficace entre les particules constitutives. [3]

L'idée principale de travail c'est de fabrication BCRHP c'est-à-dire on va passer d'un BCR a un BCR haute performance afin d'amélioré certaines propriétés mécaniques qui nous aide a amélioré la durabilité et augmenté la durée de vie du béton

Ce travail présente une étude détaillée en laboratoire sur l'évolution de la conception du mélange d'un béton compacté au rouleau haute performance, destiné à la l'utilisation dans les airs d'entreposage et aérodromes.

Les constituants du BCRHP sont similaires au béton conventionnel, mais la teneur en granulats est plus élevée, d'environ 10 % en volume. La méthodologie de conception de mélange va être développée en modifiant la teneur en ciment et en ajout (fumée de silice).

La portée principale de cette recherche est d'étudier les propriétés physiques (le retrait), et mécaniques (résistance à la compression, à la flexion), L e compactage des éprouvettes à était effectué suivant le procédé du vibro-compactage.

2. Problématique :

La dégradation du béton utilisé dans les aires d'entreposage et les aérodromes est un problème critique qui peut compromettre la sécurité et l'efficacité des opérations aériennes. Exposés à des conditions environnementales sévères, telles que les cycles de gel-dégel, l'humidité, les produits chimiques dégivrants et les charges lourdes des avions, ces bétons subissent des fissures, de l'écaillage et une corrosion accélérée des armatures. La pénétration de l'eau et des sels dégivrants dans les microfissures exacerbe la détérioration, entraînant une réduction de la résistance structurelle et une augmentation des coûts de maintenance.



Figure 1 : Piste d'aéroport de béton abandonné [4]



Figure 2 : Parc à conteneurs pour le stockage extérieur de marchandises [5]

Pour prolonger la durée de vie des infrastructures aéronautiques, il est essentiel de mettre en œuvre des techniques de renforcement adaptées, telles que l'utilisation de bétons à haute performance, l'application de revêtements protecteurs et la maintenance régulière.

C'est à partir de ces points qu'on a réfléchi pour proposer un béton innovant (BCRHP) afin de répondre aux exigences demandées.

3. Objectif :

L'objectif de cette étude est donc de déterminer le taux optimal de substitution du ciment par fumée de silice, en prenant en compte à la fois des considérations économiques et des exigences de performance mécanique. Des tests expérimentaux rigoureux seront menés pour évaluer les propriétés du BCR modifié (BCRHP), notamment sa résistance à la compression, sa résistance à la flexion.

4. Structure du mémoire :

Cette mémoire est divisée en quatre chapitres les deux premiers chapitres présentent une revue bibliographique sur le BCR et le BHP dans le chapitre I on a donné une idée générale sur BCR pour le chapitre II nous avons à présenter le béton à haute performance (Les composants, formulation). Le chapitre III est résumé tous les essais réalisés dans laboratoire et le dernier chapitre représenté à la fois formulation de BCRHP suivi dans cette étude et le parti du résultat et discussion.

Tout cela est enfin clôturé par une conclusion générale regroupant une synthèse générale de l'ensemble des résultats obtenus, suivie d'une présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

CHAPITRE I : Béton compacté au Rouleau.

I.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter le béton compacté au rouleau ses caractéristiques, ses avantages et inconvénient ainsi que dans les différents domaines dans lesquels il est appliqué et les diverses méthodes de formulation de ce dernier.

Le Béton compacté au Rouleau (BCR) est un mélange rigide, composé de granulats inertes, de ciment, et d'eau, éventuellement agrémenté d'additifs. Son installation s'effectue par compactage au moyen d'engins de travaux publics tels que la finisseuse, le rouleau compresseur vibrant, ou les plaques vibrantes. Le spectre d'applications du BCR s'étend à des domaines variés tels que la construction de barrages, les voies de transport, les rues, et les aires de stationnement. La polyvalence du BCR en fait un choix privilégié dans des contextes où la durabilité, la résistance et l'efficacité opérationnelle sont des critères essentiels. [6]

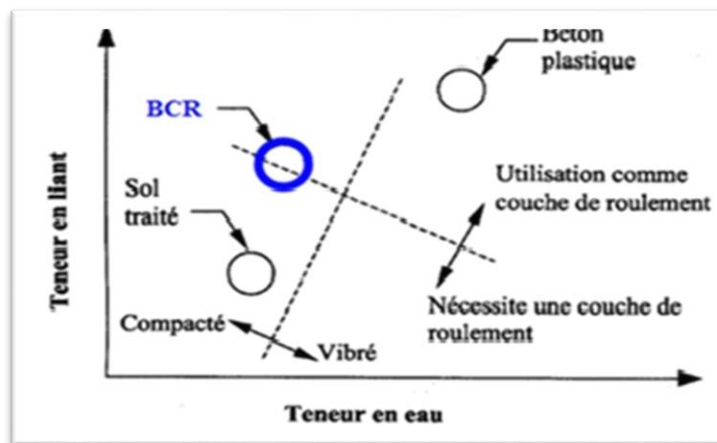


Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau. [6]

I.2.Historique :

Le Béton compacté au Rouleau (BCR) a rencontré un succès considérable dans les secteurs des routes et des barrages, tirant profit des avantages significatifs qu'il offre aux concepteurs et producteurs, tant sur le plan technique qu'économique. Ses atouts notables incluent son coût modéré, sa rapidité de mise en œuvre, ainsi que ses performances mécaniques remarquables. Sur le plan historique, le concept du BCR a fait ses débuts aux États-Unis en 1942, lors de la construction d'une route à Yakima, dans l'État de Washington, sous l'égide des U.S. Army Corps of Engineers. [7]

La technologie du gravier-traité a fait son apparition en Suède dans les années 1930. Comme le Béton compacté au Rouleau (BCR), le gravier-traité utilise les mêmes composants que le béton ordinaire et est mis en place et compacté de manière similaire au BCR (Fig. I.2). Le gravier-traité a trouvé des applications diverses dans la construction routière, l'amélioration des

fondations, la stabilisation des pentes, et la création de couches imperméables. Cependant, une distinction fondamentale entre le BCR et le gravier-traité réside dans la teneur en matériaux cimentaires et la granulométrie des agrégats. Certains ouvrages de la littérature considèrent néanmoins le matériau gravier-traité comme une variante du BCR. [8]

L'un des projets routiers les plus significatifs à ce jour a été la construction de 543 464 m² de Béton compacté au Rouleau (BCR) avec une épaisseur variant entre 203 et 254 mm à l'Usine de General Motors Saturn au Tennessee. Dans le cadre de ce projet, une décision stratégique a été prise pour substituer l'asphalte par du gravier traité au ciment, avec une teneur en liant relativement élevée, soit 13%, visant à améliorer la résistance au gel/dégel et à l'usure.

Au Canada, les premières utilisations de la technologie BCR dans des projets routiers remontent à 1976, avec la création d'une aire de triage de billes de bois de 52 000 m² en Colombie-Britannique sur l'île de Vancouver (Fig. 1.4). À la suite du succès du projet de Caycuse, d'autres surfaces de stockage de billes de bois ont été réalisées entre 1976 et 1978 sur l'île de la Reine-Charlotte, en face de la côte de Colombie-Britannique, demeurant opérationnelles avec des travaux d'entretien minimes. En 1980, les ingénieurs de l'U.S. Army Corps of Engineers ont étudié l'utilisation potentielle du BCR pour des applications militaires, concrétisées par deux projets routiers expérimentaux en 1983, destinés aux véhicules à chenilles et aux chars, à Fort Gordon (Géorgie) et à Fort Lewis (Washington).

Le premier projet à grande échelle, réalisé par l'U.S. Army of Engineers en 1984 sur une superficie de 15 175 m², a été conçu comme une surface rigide pour les équipements tactiques, atteignant une résistance à la flexion d'environ 5,5 MPa pour une épaisseur de 254 mm de BCR. Durant les années quatre-vingt, le BCR a également été employé avec succès pour des installations intermodales où les charges sont particulièrement élevées. Des aires de 44 313 m² et 107 021 m² ont ainsi été construites à Houston (Texas) et Denver (Colorado) respectivement. Une vaste surface de BCR a également vu le jour entre 1986 et 1988 au port de Conley et à la Marine de Moran à Boston.[9]



Figure . I.2. Une technique de pavage considérée comme BCR en Suède en 1930 [8]



Figure. I.3. Surface de tri de bois, Colombie-Britannique [10]

I.3. Définition Du BCR :

Le terme béton compacté au Rouleau (BCR) désigne un matériau de construction rigide et non armé, caractérisé par une consistance ferme et un affaissement nul, composé de ciment, de granulats, d'eau, et d'adjuvants. Sa mise en place nécessite un compactage externe afin d'assurer une consolidation optimale. Sur le plan structural, le BCR se comporte analogiquement à une dalle de béton, relevant ainsi des mêmes critères de conception. Les couches de support et de roulement élaborées à partir de ce matériau démontrent une portance remarquable et une résistance à la déformation, les rendant aptes à supporter des charges générées par un trafic intense.

Le BCR se distingue par sa robustesse et sa durabilité, le rendant particulièrement adapté aux sollicitations engendrées par des équipements lourds. Des études ont démontré qu'un mélange de BCR, avec une teneur en liant de l'ordre de 300 kg/m^3 et un rapport E/C d'environ 0,35, peut atteindre une résistance en compression à 28 jours de l'ordre de 40 MPa, ainsi qu'une résistance en flexion à 3 jours de 5 MPa. Dans le contexte routier, le BCR trouve deux applications distinctes : tout d'abord, en tant que couche-support d'une chaussée revêtue de liant hydrocarboné, puis en tant que couche de roulement traitée en surface pour supporter directement les charges du trafic. Ces propriétés font du BCR un choix stratégique pour des applications où la résistance structurelle, la durabilité et la capacité à supporter des charges importantes sont des impératifs. [11]

L'application ultime du Béton compacté au Rouleau (BCR), distinguée par une mise en œuvre rapide, présente l'avantage substantiel d'une réduction des coûts de construction. Le processus de réalisation du BCR est exécuté au moyen des mêmes équipements communément employés pour la construction des chaussées en béton. Ce matériau est manufacturé au sein de centrales fixes ou mobiles, puis acheminé par des camions à benne basculante avant d'être déployé à l'aide d'épandeurs et de finisseurs. Le compactage final est méticuleusement assuré par le rouleau compacteur. Il convient de noter que l'épaisseur minimale préconisée d'une dalle de BCR est de 15 cm, un paramètre crucial assurant une robustesse structurelle adéquate. Une vigilance particulière doit être exercée à chaque étape du processus pour garantir que la couche sous-jacente à la dalle a atteint un degré de compactage suffisant. Cette précaution vise à garantir une intégrité structurelle optimale et à optimiser la résistance du BCR face aux contraintes résultantes du trafic intense. En somme, la célérité du déploiement du BCR, associée à sa compatibilité avec les équipements conventionnels, positionne ce matériau comme une option privilégiée pour les projets exigeant une mise en œuvre rapide et économique, sans compromettre la qualité et la durabilité des infrastructures routières. [12]

I.4. Composition du BCR :

I.4.1. Granulats :

Dans un mélange de Béton compacté au Rouleau (BCR), les granulats occupent généralement entre 75% et 85% de son volume total. Le choix des granulats revêt une importance primordiale pour le concepteur, car ils influent significativement sur les propriétés physico-mécaniques du BCR, tant à l'état frais qu'à l'état durci. À l'état frais, la manipulabilité, la propension à la ségrégation, et la capacité du mélange à s'adapter sous l'action des rouleaux compacteurs dépendent largement de la nature et du type des granulats utilisés. À l'état durci, la résistance mécanique, le module d'élasticité, et les propriétés thermiques du BCR sont fortement conditionnés par les caractéristiques intrinsèques des granulats. De plus, la compacité, la densité in situ, et par conséquent, l'état final de la surface de la chaussée (surface de roulement) sont également influencées par la distribution granulométrique des granulats. [13]

Les granulats sont exposés à des sollicitations d'ordres mécanique, climatique et chimique, que ce soit lors du malaxage et du compactage, lors des variations climatiques telles que le gel-dégel et le mouillage/séchage, ainsi que face à des réactions chimiques telles que la dissolution, la sulfatation et la réaction alcali-agrégat. Par conséquent, un choix judicieux de la qualité des granulats permet non seulement une optimisation des coûts, mais garantit également une durabilité accrue en service.

Le Béton compacté au Rouleau (BCR) se distingue du béton ordinaire par la distribution granulométrique des granulats, étant donné que le squelette granulaire se consolide sous l'effet des pressions appliquées par les paveuses et les rouleaux compacteurs. Les proportions variées des granulats doivent être sélectionnées dans le but de réaliser plusieurs objectifs : (i) assurer une consistance optimale, (ii) obtenir une bonne compatibilité (iii) répondre aux spécifications techniques requises, et (iv) obtenir une finition de surface satisfaisante.[14]

La sélection judicieuse de la distribution granulométrique combinée des granulats est cruciale afin de minimiser le risque de ségrégation lors du malaxage et de la mise en place du Béton compacté au Rouleau (BCR). Le squelette granulaire d'un mélange de BCR est constitué de granulats fins (80 µm - 5 mm) comprenant du sable naturel ou artificiel, ou une combinaison des deux, ainsi que de granulats grossiers (> 5 mm) concassés ou roulés, ou une combinaison des deux. Dans le cas de projets d'envergure, les différentes fractions granulaires peuvent être pré malaxé et stockers ensemble en une seule fraction. Le choix du type de granulats, incluant la forme, le diamètre et l'origine, dépend principalement des exigences techniques liées à la résistance, à la durabilité, ainsi que de la disponibilité des matériaux. Pour un mélange de BCR, il est impératif de restreindre le diamètre maximal nominal des granulats grossiers afin de minimiser le risque de ségrégation et de faciliter les conditions de mise en œuvre. Selon la destination spécifique du projet, le diamètre maximal des granulats est généralement limité à 20 mm pour les projets routiers et à 50 mm pour les barrages. Cette démarche contribue à garantir la cohésion et l'uniformité du mélange, tout en répondant aux exigences spécifiques de chaque application.[15].

L'emploi de granulats fins dans le BCR permet de remplir les vides inter- granulaires et facilite donc le compactage, pour avoir un squelette aussi dense que possible. En effet, et pour arriver à une graduation optimale, il est préférable que la graduation de granulats grossiers et fins se situe entre les limites présentées dans les Tableaux I.1 et I.2 [15]

Tableau I.1. Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après [15]

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)		
	4,75 à 75 mm	4,75 à 50 mm	4,75 à 19 mm
75	100		
63	88		
50	76	100	
37,5	61	81	
25	44	58	
19	33	44	100
12,5	21	28	63
9,5	14	18	41
4,75	-	-	-

Tableau I.2. Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après [15]

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)
9,5	100
4,75	95-100
2,36	75-95
1,18	55-80
0,6	35-60
0,3	24-40
0,15	12-28
0,075	6-18
Module de finesse	2.1-2.75

I.4.2 Liant :

En fonction des spécifications requises et de la finalité du projet, le choix du type et du dosage de ciment revêt une importance capitale dans la formulation des mélanges de Béton compacté au Rouleau (BCR). Généralement, la proportion de ciment représente entre 12% et 16% de la masse totale des constituants secs du mélange. Cette sélection méticuleuse du type et de la quantité de ciment est cruciale pour atteindre les caractéristiques mécaniques et durables souhaitées du BCR, tout en tenant compte des contraintes spécifiques liées à la nature du projet [16]

En complément de ses avantages techniques, l'incorporation d'ajouts cimentaires dans le Béton compacté au Rouleau (BCR) permet une réduction significative des coûts du projet, notamment par la diminution de la quantité de ciment nécessaire dans le mélange. Dans certaines situations, l'utilisation de cendres volantes a démontré la capacité d'améliorer la compactibilité et l'aspect de la surface de roulement, notamment la finition, en augmentant le pourcentage de fines dans le mélange. Bien que l'argument en faveur de l'utilisation de ces ajouts minéraux soit souvent évoqué pour ses bénéfices économiques et environnementaux, la principale justification de leur incorporation dans le béton réside en réalité dans les avantages techniques qu'ils apportent.

En effet, dans de nombreux cas, ces ajouts sont préférés au ciment Portland indépendamment des considérations économiques ou environnementales. Bien que l'économie d'énergie et la préservation des ressources naturelles soient des aspects positifs associés à l'utilisation d'ajouts cimentaires, leur intégration dans le béton est principalement motivée par les améliorations qu'ils apportent aux propriétés mécaniques et durables du matériau. Ainsi, leur adoption est guidée par le souci de maximiser les performances du BCR tout en optimisant les aspects économiques et environnementaux de la construction.[17]

I.4.3 Adjuvants :

L'utilisation d'adjuvants dans le béton à compacter au rouleau (BCR) constitue une pratique courante visant à améliorer ou modifier des caractéristiques spécifiques du matériau. Ces produits chimiques sont incorporés dans le BCR, avec une proportion généralement inférieure à 5% de la masse totale du ciment. Les adjuvants conventionnels, tels que les réducteurs de prise, les entraîneurs d'air, les accélérateurs de durcissement et les superplastifiants, qui sont couramment utilisés dans la fabrication de bétons traditionnels, sont également applicables aux BCR s.

En raison de la nature sèche du BCR, il est essentiel d'ajuster les dosages des adjuvants par rapport aux proportions généralement utilisées dans le béton ordinaire. En effet, les adjuvants doivent être introduits en quantités supérieures pour garantir leur efficacité optimale dans les BCR s.

Il convient de noter que le choix et le dosage appropriés des adjuvants revêtent une importance cruciale dans la formulation des BCRs, en vue d'obtenir des performances mécaniques et physiques optimales. Par conséquent, une approche soigneuse et précise dans la manipulation des adjuvants est nécessaire pour garantir le succès de la production de béton à base de cendres volantes, répondant ainsi aux exigences spécifiques des applications visées.[18]

L'absence de matériaux de renforcement, tels que l'armature, dans les revêtements à base de cendres volantes (BCR) simplifie le scénario en termes d'effets potentiels des ions chlorure présents dans certains adjuvants. Les faibles dosages de ces ions chlorure, inhérents à certains additifs, ne semblent pas avoir d'effets néfastes significatifs sur les BCRs. Néanmoins, une prudence accrue est nécessaire dans la manipulation de ces additifs, car certains d'entre eux, tels que les plastifiants et les superplastifiants, peuvent exercer une influence notable sur les propriétés de prise du BCR.

Les plastifiants et les superplastifiants, bien que conçus pour améliorer la maniabilité du béton en réduisant la quantité d'eau nécessaire, peuvent également induire des variations dans le temps de prise du BCR. Certains additifs accélèrent la prise, tandis que d'autres la retardent, et ces effets doivent être soigneusement évalués en fonction des exigences spécifiques du projet. Dans ce contexte, des précautions doivent être prises lors de la sélection et de l'utilisation de ces additifs, en veillant à maintenir un équilibre approprié entre les performances recherchées du BCR et les contraintes temporelles associées à son durcissement.

Cette approche méticuleuse dans le choix des additifs, combinée à une gestion précise des dosages, est cruciale pour garantir que les revêtements à base de cendres volantes répondent aux normes de qualité requises, tout en minimisant les effets potentiellement indésirables liés à la prise du matériau.[19]

I.4.4 Additions :

Les additions, matériaux minéraux finement broyés, jouent un rôle crucial dans l'amélioration des propriétés du béton à base de cendres volantes (BCR). Ces matériaux, tels que le laitier, la pouzzolane, la fumée de silice et les cendres volantes, sont incorporés au BCR pour conférer des propriétés spécifiques et améliorer des caractéristiques essentielles telles que la maniabilité à l'état frais, la durabilité à l'état durci et la compacité du matériau.

L'utilisation d'additions dans le BCR offre également l'avantage substantiel de réduire les coûts du projet en diminuant la quantité de ciment nécessaire dans le mélange. Plusieurs chercheurs ont démontré que le laitier de haut fourneau granulé broyé, en combinaison avec le ciment, exerce une influence positive sur les propriétés mécaniques et certaines propriétés de durabilité du BCR. Ce composant renforce l'adhérence et comble les pores du matériau.

La recommandation judicieuse d'incorporer jusqu'à 20% de pouzzolanes dans le BCR est soutenue par des considérations techniques et économiques. L'ajout de pouzzolanes à cette proportion contribue de manière significative à l'amélioration des caractéristiques du BCR tout en offrant des avantages économiques appréciables. Cette pratique s'aligne sur les efforts continus visant à optimiser les formulations de béton à base de cendres volantes, en vue d'obtenir des performances mécaniques et durables supérieures, tout en assurant une gestion économique efficace des ressources du projet.[20],

car les pouzzolanes permettent d'augmenter la résistance à long terme de la chaussée en BCR.[21] .Les résultats obtenus par ont révélé que la fumée de silice représente un additif minéral efficace dans le contexte des bétons à base de cendres volantes (BCR). L'introduction de 10% de fumée de silice dans les bétons compactés au rouleau destinés aux chaussées a été observée comme un moyen significatif d'améliorer la durabilité au gel de ces matériaux.

Par ailleurs, la fumée de silice démontre un effet desséchant sur le mélange frais du BCR. Cette caractéristique particulière en fait un choix pertinent en combinaison avec un adjuvant réducteur d'eau. L'usage conjoint de la fumée de silice et d'un adjuvant réducteur d'eau vise non seulement à améliorer la maniabilité du béton à l'état frais, mais également à optimiser les propriétés mécaniques et durables du matériau à l'état durci.

L'incorporation de la fumée de silice, conjuguée à un adjuvant réducteur d'eau, s'inscrit ainsi dans une approche stratégique visant à obtenir des bétons à base de cendres volantes présentant des normes élevées de durabilité au gel. Cette synergie entre les deux composants représente une avancée significative dans le domaine de la formulation des bétons, offrant des performances améliorées, notamment dans le contexte spécifique des chaussées..[22]

L'addition des cendres volantes donne des résistances, à long terme, plus élevées, car la microstructure du BCR résultant est améliorée par des réactions pouzzolaniques supplémentaires[23] . Le pourcentage maximal des cendres volantes incorporées est limité à 20%. les cendres volantes peuvent apporter des avantages d'ordres chimiques, comme la réduction de chaleur d'hydratation [24]

I.4.5 l'eau de gâchage :

La nature sèche et à affaissement nul du béton à base de cendres volantes (BCR) impose des exigences rigoureuses quant à sa teneur en eau. Cette dernière, établie entre 4 et 6%, est déterminée par le laboratoire lors de l'essai Proctor modifié. Au chantier, la gestion de la teneur en eau doit prendre en considération les conditions atmosphériques et les contraintes liées au transport.

Il est crucial de souligner que l'eau utilisée dans le mélange de BCR doit être de qualité potable, présentant des teneurs en sels dissous inférieures à 1 g/l et en matières en suspension inférieures à 0,5%. Tout excès d'eau dans le mélange peut entraîner une instabilité du matériau, compromettant ainsi l'uniformité et l'intégrité structurelle du béton. En revanche, une insuffisance d'eau peut conduire à des défauts de prise localisés, impactant la qualité globale du BCR.

Ainsi, la maîtrise précise de la teneur en eau en tenant compte des variations atmosphériques et des contraintes logistiques sur le chantier, s'avère essentielle pour garantir la performance optimale du BCR. Cette approche rigoureuse contribue à assurer la stabilité, la durabilité, et la qualité esthétique du béton, répondant ainsi aux normes élevées exigées dans les applications variées de ce matériau spécifique. [25]

I.5 Les avantages de BCR :

- Résistance aux charges lourdes.
- Durabilité de la chaussée pour plusieurs années.
- Performance excellente à l'analyse du cycle de vie.
- Très bonne résistance à l'abrasion.
- Utilisation en tout temps, même en période de dégel.
- Entretien simple.
- Imperméabilité aux liquides (eau, huile, essence, etc.).
- Diminution des coûts d'entretien des équipements, machineries ou véhicules puisque moins de bris causés par une chaussée en mauvais état.
- Rapidité d'exécution et de mise en service lors de sa construction.
- Bonne résistance à la compression et à la flexion.
- Bonne résistance au cycle de gel et de dégel.
- Bonne résistance au cisaillement : pour résoudre le problème d'orniérage

I.6 les inconvénients du BCR :

Bien que le béton à compacter au rouleau (BCR) présente plusieurs avantages, il n'est pas exempt d'inconvénients, lesquels méritent une attention particulière :

1. Texture rugueuse : L'un des inconvénients notables du BCR réside dans sa texture rugueuse, susceptible d'influencer l'esthétique des surfaces finies. Cette rugosité peut présenter des défis

dans des applications où une finition lisse et régulière est requise, nécessitant ainsi des solutions ou des techniques spécifiques pour atténuer cet aspect.

2. Qualité des Parements : La qualité des parements du BCR peut également être affectée, pouvant entraîner des variations dans l'apparence des surfaces exposées. Ceci peut être particulièrement pertinent dans des projets nécessitant des finitions haut de gamme où des ajustements de formulation ou des traitements de surface supplémentaires peuvent être requis.

3. Difficulté d'entraîner de l'Air : Une difficulté potentielle dans l'utilisation du BCR réside dans l'entraînement d'air, ce qui peut impacter la maniabilité du matériau. Ceci nécessite une attention particulière lors de la formulation du mélange et de la mise en œuvre sur le chantier pour garantir la performance souhaitée du béton.

4. Coût de Transport des Matières cimentaires en régions Éloignées : Les coûts de transport des matières cimentaires, notamment en régions éloignées, représentent un inconvénient économique. Le transport de grandes quantités de cendres volantes peut entraîner des coûts logistiques significatifs, impactant la rentabilité globale du projet.

Dans le contexte des grands projets de construction utilisant le BCR, une solution adoptée consiste en l'utilisation d'installations de production en continu, similaire à celles employées pour les enrobés bitumineux. Ces installations offrent des taux de production plus élevés, permettant une gestion plus efficace des matériaux et contribuant à répondre à la demande croissante dans le cadre de projets d'envergure. Cette approche s'inscrit dans une perspective d'optimisation des processus pour maximiser l'efficacité tout en minimisant les inconvénients associés à l'utilisation du BCR.[26].

I.7 Méthode de Formation:

La formulation du béton, en général, implique la détermination des proportions optimales pour obtenir une composition répondant aux exigences techniques relatives à la résistance, la durabilité, et la maniabilité. Cependant, en raison de la spécificité du béton à base de cendres volantes (BCR) caractérisé par un affaissement nul, une consistance ferme, une proportion élevée de granulats, et une faible teneur en ciment, les méthodes traditionnelles de formulation du béton ne sont pas directement applicables au BCR. Diverses méthodes mentionnées dans la littérature, exposées dans les paragraphes suivants, permettent de déterminer les proportions adéquates pour le BCR. Le choix entre ces méthodes dépend du type de projet (routes ou barrages) et des ressources disponibles.

Le rapport ACI 325 propose deux procédures pour formuler les mélanges de BCR destinés aux chaussées. La première méthode repose sur la recherche d'une limite de maniabilité, tandis que la seconde s'appuie sur le concept de définir l'état le plus dense du mélange en utilisant les principes de la Géotechnique. Ces deux approches peuvent être employées de manière distincte, adaptées aux besoins spécifiques des projets routiers et des barrages.

La première méthode, axée sur la recherche de la limite de maniabilité, vise à déterminer les proportions optimales pour le BCR en garantissant une consistance appropriée pour les

opérations de mise en place sur les routes. La seconde méthode, basée sur la densité maximale du mélange, s'inspire des concepts géotechniques pour obtenir un BCR compact et résistant, particulièrement pertinent pour les applications routières et les projets de barrages.

En fonction de la destination du projet et des ressources disponibles, l'ingénieur peut choisir la méthode la mieux adaptée, soulignant l'importance de prendre en compte les spécificités du BCR dans le processus de formulation pour assurer le succès du projet de construction.[27]

I.7.1 Méthodes empiriques :

I.7.1.1 Méthode basée sur les limites de maniable :

La méthode basée sur les limites de maniable du béton compacté au rouleau (BCR), vise à déterminer les proportions du mélange afin d'atteindre une maniabilité optimale en adéquation avec les exigences techniques. Mesurée en secondes à l'aide de l'appareil Vébé, la maniabilité du béton est un paramètre essentiel. La procédure de formulation comprend plusieurs étapes clés, dont la détermination du volume de pâte minimal, le choix du rapport eau/liant, et enfin l'ajustement des proportions des granulats.

Dans la première étape, une série de mélanges de mortiers est élaborée, explorant différentes combinaisons de rapports eau/ciment et sable/ciment. Cette étape vise à déterminer le volume de pâte minimal nécessaire. Pour chaque rapport eau/sable, des mélanges sont préparés à différents rapports eau/ciment, et la masse volumique est mesurée (voir Figure I.4).

La deuxième étape se concentre sur la détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges correspondant aux masses volumiques optimales, à des rapports eau/ciment variés. Le choix final du rapport eau/ciment est effectué en fonction des propriétés mécaniques requises pour le BCR, garantissant ainsi des performances mécaniques adaptées à l'application envisagée.

La troisième et dernière étape consiste à optimiser les proportions des granulats fins et grossiers en fonction de la maniabilité souhaitée. Cette étape finale permet d'ajuster les paramètres du mélange pour obtenir une consistance optimale tout en maintenant les performances mécaniques du BCR.

En intégrant ces étapes de manière méthodique, la méthode Vébé offre une approche systématique pour formuler le BCR, en prenant en compte la maniabilité, les propriétés mécaniques, et les caractéristiques des granulats. Cette méthodologie permet d'atteindre des performances optimales du BCR dans diverses applications [28]

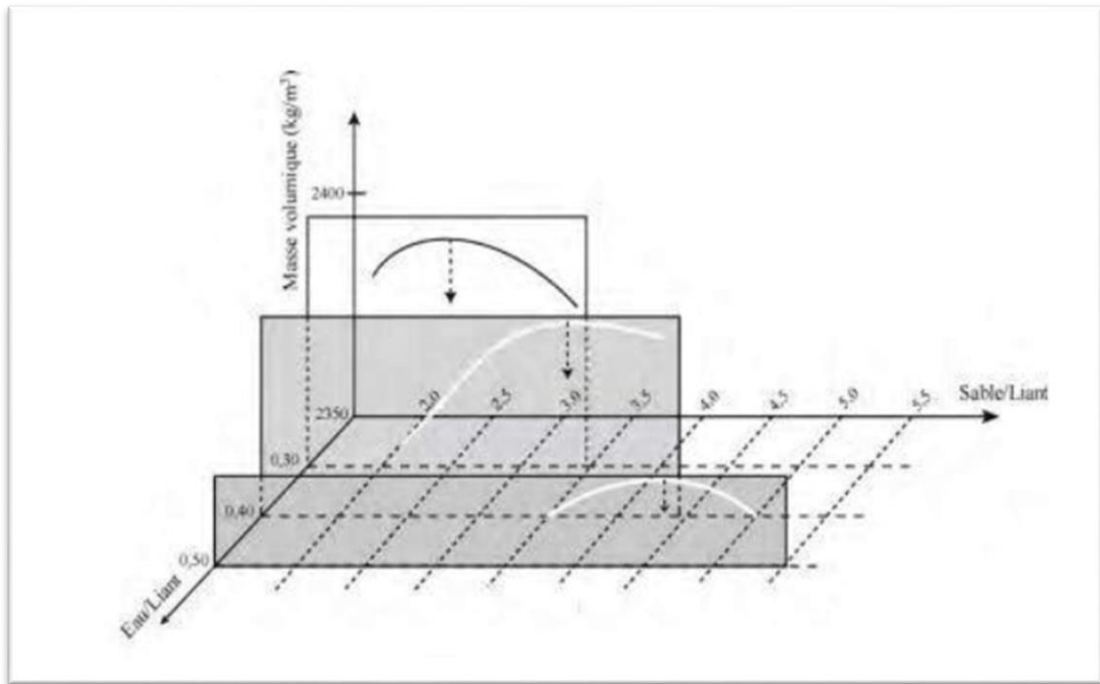


Figure I.4 : Détermination du volume de pâte minimal [28]

I.7.1.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique :

Cette méthode de formulation repose sur le principe du compactage des sols en laboratoire, en utilisant l'essai Proctor modifié selon la norme ASTM D1557. L'objectif est d'obtenir la relation entre la densité et la teneur en eau, s'inspirant du concept de compactage des sols. La teneur en ciment est fixée en fonction des caractéristiques mécaniques requises, généralement entre 200 et 350 kg/m³. La teneur en eau optimale est ensuite estimée à partir des essais de compactage du béton frais.

Cette approche est particulièrement adaptée lorsqu'on utilise des granulats de petites dimensions et qu'une forte teneur en matériaux cimentaires est nécessaire, ce qui est fréquent dans les mélanges de béton compacté au rouleau. Les proportions des granulats fins et grossiers sont déterminées en fonction d'un fuseau granulométrique (voir Figure I.10).

Une série de mélanges de béton est ensuite préparée en variant la teneur en matériaux cimentaires, habituellement entre 12 et 14% de la masse totale des matériaux secs. Pour chaque teneur en liant, des éprouvettes sont fabriquées avec différents teneurs en eau, puis compactées dans le moule Proctor modifié à une énergie spécifique. Les éprouvettes sont constituées de cinq couches d'épaisseur égale, compactées de manière uniforme avec 56 coups par couche.

La masse volumique du moule compacté est ensuite mesurée, et la densité sèche est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{100 \cdot \omega \cdot \rho_h}{100 + \omega}$$

- ρ_d : est la densité sèche.
- ρ_h : est la densité humide maximale mesurée.
- ω : est la teneur en eau réelle (la moyenne calculée à partir des pesées de prélèvement de béton frais, avant et après étuvage).

Cette méthode offre une approche systématique et précise pour la formulation du BCR, en tenant compte des caractéristiques des matériaux et des propriétés mécaniques requises pour des projets routiers spécifiques.

La courbe de variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est représentée graphiquement (voir Figure I.5). La teneur en eau correspondant au sommet de la courbe, qui représente la densité sèche maximale, est identifiée comme la teneur en eau optimale. Des essais de résistance en compression sont ensuite effectués sur des éprouvettes préparées à différentes teneurs en eau optimales.

Le mélange ayant la teneur en liant minimale et présentant les propriétés mécaniques requises est alors sélectionné. Cette approche permet de choisir le mélange optimal en termes de densité sèche maximale et de résistance mécanique, tout en respectant les contraintes de teneur en liant minimale. Cette méthode offre ainsi une procédure systématique et rigoureuse pour la sélection des proportions idéales dans le béton compacté au rouleau (BCR), en se basant sur des critères de densité sèche et de résistance mécanique.

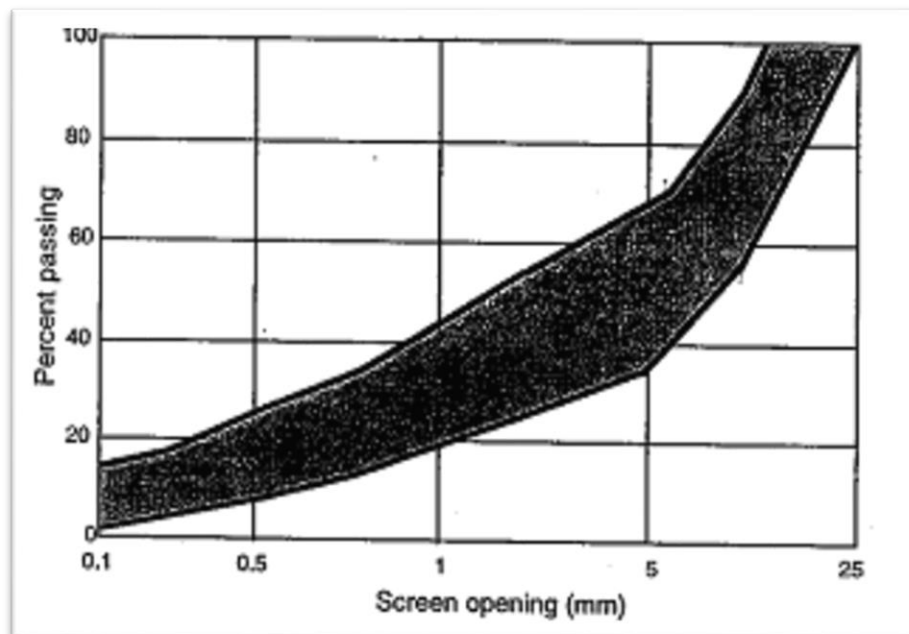


Figure.I.5 .Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR [29]

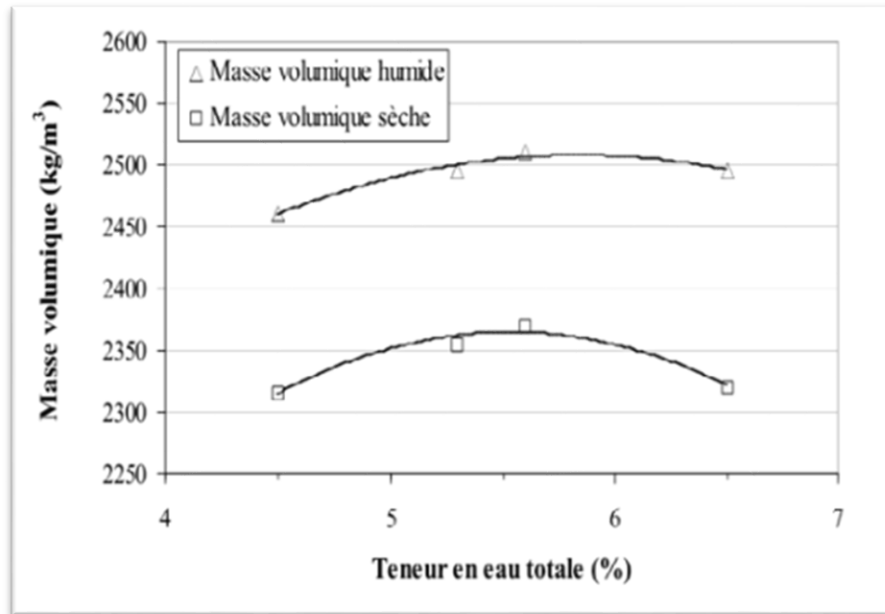


Figure.I.6.Courbes de Proctor [29]

I.7.2 Méthodes semi-empiriques :

Les méthodes semi-empiriques, comme décrites, reposent sur des données expérimentales et des formules empiriques pour la formulation des mélanges de béton à compacté au rouleau (BCR). Ces approches semi-empiriques se basent sur le calcul du rapport "volume de pâte" sur "volume de vide". La mise en œuvre de cette méthode nécessite la réalisation de plusieurs essais en laboratoire.

L'hypothèse fondamentale de cette méthode repose sur l'idée que le mélange de BCR optimal devrait contenir la quantité juste nécessaire de pâte pour remplir les espaces intergranulaires restants après que le squelette granulaire a atteint sa densité maximale par un processus de compactage. Cette approche est essentiellement volumétrique.

Pour des faibles dosages en ciment, le volume de pâte est insuffisant, ce qui entraîne la présence de vides après le compactage. Ces vides affaiblissent les caractéristiques mécaniques du BCR et augmentent sa perméabilité. En revanche, avec des dosages élevés en ciment, le volume de pâte devient excessif. Cela peut conduire à une augmentation de la chaleur d'hydratation et des coûts de fabrication, sans apporter d'améliorations significatives aux propriétés physiques du matériau ou à son imperméabilité.

L'approche semi-empirique se révèle donc comme une méthode pragmatique, tirant profit des observations expérimentales pour établir des relations empiriques. Cette approche offre une flexibilité dans la formulation des mélanges de BCR en ajustant le rapport pâte/vides pour optimiser les caractéristiques mécaniques et la perméabilité, tout en prenant en compte les coûts associés à la production.[19]

La méthode semi-empirique, centrée sur le volume de pâte optimal, est limitée à la formulation de mélanges de béton compacté au rouleau (BCR) sans air entraîné. Cela s'explique par la

complexité de la composition des mélanges de BCR avec air entraîné, en raison des effets du réseau de vides d'air sur les propriétés mécaniques [30]. La formulation du BCR selon cette méthode implique trois étapes successives :

1. Détermination des Proportions des Granulats : La première étape vise à définir les proportions des granulats de manière à obtenir un mélange granulaire aussi compact que possible. Le volume de vides des granulats est calculé en mètre cube après le compactage. Cette étape est cruciale pour garantir une structure granulaire optimale.

2. Ajustement du Dosage de la Pâte : La deuxième étape consiste à ajuster le dosage de la pâte afin d'atteindre une maniabilité spécifique. Cette manipulation permet de moduler la consistance du BCR pour répondre aux exigences du projet ou aux préférences spécifiques tout en maintenant la compacité du mélange granulaire.

3. Fixation du Rapport Eau/Liant : Enfin, la dernière étape implique la fixation du rapport entre l'eau et le liant de manière à obtenir une pâte répondant aux exigences mécaniques du projet. Ce rapport est crucial pour garantir la résistance et les propriétés mécaniques du BCR.

Ces étapes successives, fondées sur des principes semi-empiriques, permettent une formulation adaptée des mélanges de BCR sans air entraîné. La méthode offre une approche pratique en ajustant les proportions des composants du mélange pour optimiser la compacité, la maniabilité et les propriétés mécaniques du béton, en tenant compte des particularités du matériau.

I.7.3 Autres méthodes :

Outre les approches discutées précédemment, le rapport ACI 207 présente d'autres procédures qui semblent plus appropriées pour la formulation de béton compacté au rouleau (BCR) destiné aux barrages. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de l'U.S. Corps of Engineers et la méthode du volume optimal. La procédure de formulation selon l'approche de l'U.S. Army Corps of Engineers se déroule en plusieurs étapes.

Dans une première étape, les proportions des granulats sont sélectionnées. Des distributions granulométriques idéales sont proposées, permettant ainsi de choisir les proportions les plus adaptées. Le rapport du granulats fin au granulats grossier peut également être déterminé à partir de valeurs tabulées, en fonction du diamètre maximal du granulats et du type de granulats grossier.

Il est à noter que ces procédures semblent être plus spécifiques et adaptées aux mélanges de BCR destinés aux barrages, où les exigences peuvent différer de celles des projets routiers. Ces approches offrent une méthodologie structurée pour la formulation des mélanges de BCR, en prenant en compte les caractéristiques spécifiques des granulats et les exigences du projet, notamment en termes de résistance mécanique et de durabilité [31].

Parmi les méthodes de formulation du béton compacté au rouleau (BCR), certaines se distinguent par leur approche théorique, s'éloignant des bases empiriques ou semi-empiriques. Une de ces méthodes a été développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par de

Larrard, s'appuyant sur le modèle d'empilement compressible, également connu sous le nom de modèle de suspension solide.

Le principe fondamental de cette méthode réside dans l'optimisation de la compacité (ou porosité) d'un empilement de grains de différentes dimensions. Ce modèle trouve son origine dans les travaux sur la viscosité des suspensions concentrées de particules solides. En suivant cette approche théorique, la méthode de de Larrard vise à atteindre une structure granulaire optimale en maximisant la compacité de l'empilement des grains dans le mélange de BCR.

Cette méthode offre une perspective différente, plus fondée sur des principes théoriques de la science des matériaux, et elle peut constituer une alternative précieuse aux approches plus empiriques. L'utilisation de modèles théoriques peut permettre une optimisation plus fine des propriétés du BCR en comprenant mieux les interactions au niveau des particules et des forces qui agissent dans le matériau.[31]

I.8 .Préparation et mise en place du BCR:

La formulation du béton compacté au rouleau (BCR) doit être soigneusement déterminée par les essais de convenance, visant à optimiser ses propriétés pour le compactage à l'aide des engins disponibles tels que finisseuses et rouleaux. Plusieurs critères doivent être pris en compte pour garantir le succès du processus. Par exemple, la masse totale des fines inertes (farines et sable fin) $< 0,25$ mm dans le béton compacté devrait atteindre environ 500 kg/m³.

Il est essentiel de veiller à ce que la part de sable soit adéquate pour obtenir une surface bien fermée, sans bullage. Le malaxage en centrale doit durer au moins 60 secondes. Durant le transport et les éventuelles attentes, des précautions doivent être prises pour protéger le béton frais en fonction des conditions météorologiques. Le transport, la mise en place et le compactage doivent être planifiés de manière à ce que le compactage soit terminé au plus tard 90 minutes après le gâchage.

La mise en place est idéalement effectuée avec une finisseuse équipée d'une poutre à haut pouvoir de compactage et d'un dispositif de nivellement automatique. Le compactage final doit viser une densité selon l'essai Proctor modifié d'au moins 96%. Cela s'effectue en passant le béton au rouleau lisse de 8 tonnes, d'abord deux fois sans vibrer, puis plusieurs fois en vibrant. Si la surface est importante, la mise en place doit être réalisée au moyen de finisseuses opérant de manière décalée.

Dans le contexte spécifique mentionné, où la résistance au gel et au sel de déverglaçage n'est pas une exigence, le BCR peut être revêtu d'un tapis hydrocarboné pour atteindre la planéité requise. Pour les situations où le sel de déverglaçage pourrait poser un problème, la résistance élevée (B35), la teneur en ciment minimale (270 kg), et le compactage pour obtenir une densité Proctor supérieure à 95% sont des paramètres essentiels pour assurer une résistance adéquate au gel et au sel de déverglaçage. Cependant, il est noté que l'utilisation de cendres volantes peut être contre-productive dans certains cas.[32]



Figure.I.7.Mise en place de BCR par bandes [32].

I.9 Comportement mécanique du BCR :

Les propriétés du Béton compacté au Rouleau (B.C.R) sont intrinsèquement liées à la qualité des matériaux utilisés, aux proportions du mélange, ainsi qu'au degré de compaction ou de consolidation appliqué. Les propriétés élastiques et thermiques du B.C.R sont comparables à celles d'un béton conventionnel fabriqué à partir des mêmes constituants.

Les caractéristiques mécaniques du B.C.R, notamment la résistance à la compression, la flexion, et la résistance aux cycles de gel-dégel, dépendent en grande partie de la qualité des matériaux incorporés dans le mélange. Les proportions des différents composants, tels que les granulats, le ciment, et les adjuvants, jouent également un rôle crucial dans la détermination des propriétés finales du B.C.R.

Le degré de compaction, généralement réalisé à l'aide de finisseuses et de rouleaux, influence directement la densité et la résistance du B.C.R. Une compaction adéquate garantit une distribution homogène des matériaux et renforce la cohésion du béton, contribuant ainsi à ses performances mécaniques.

Du point de vue thermique, les propriétés du B.C.R sont analogues à celles d'un béton conventionnel. Les coefficients de dilatation thermique et de conductivité thermique dépendent des matériaux constitutifs du mélange. Ces propriétés thermiques sont importantes à considérer, notamment dans des applications où le béton est exposé à des variations de température significatives.

En somme, la qualité des matériaux, les proportions du mélange, et le degré de compaction sont des facteurs déterminants pour les propriétés du B.C.R. L'approche académique de la formulation de ces mélanges doit intégrer ces considérations pour obtenir des performances optimales du matériau dans des applications spécifiques.[33].

I.9.1. Résistance à la compression:

La résistance à la compression constitue une caractéristique fondamentale dans le processus de caractérisation des matériaux cimentaires. En effet, elle représente un élément crucial dans la conception et le dimensionnement des routes en béton compacté au rouleau (BCR). De plus, cette propriété fournit des informations essentielles sur la qualité du béton, influençant ainsi les décisions relatives à sa production et à son utilisation dans diverses applications de construction.

La Figure I.8 présente les résultats des tests de résistance à la compression à 28 jours en fonction de la teneur en caoutchouc. L'analyse de l'histogramme montre une diminution systématique de la résistance à mesure que le taux d'incorporation de caoutchouc augmente. En particulier, lorsque la teneur en caoutchouc varie de 0 à 30%, la résistance à la compression diminue de 27,12 MPa à 13,58 MPa, soit une réduction d'environ 50% par rapport au mélange de référence. Cette diminution de la résistance corrobore les résultats obtenus dans la littérature concernant les matériaux cimentaires incorporant des granulats d'origine caoutchouteuse. [34]

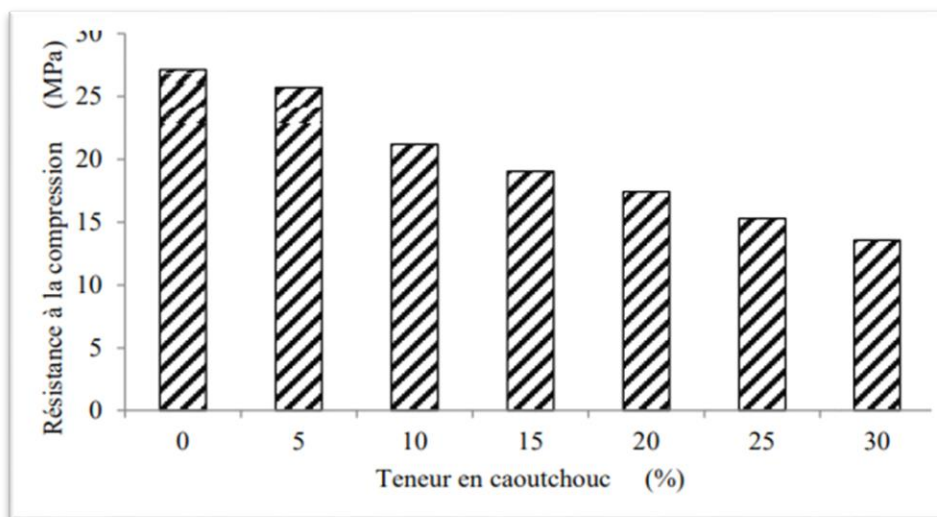


Figure . I.8.. Effet du caoutchouc sur la résistance en compression à 28 jours [34]

I.8.2. Résistance à la traction :

La résistance à la traction est une propriété essentielle pour évaluer la capacité du B.C.R à résister aux contraintes de flexion et de fissuration. La relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression offre des indications importantes sur le comportement mécanique global du matériau. Une compréhension approfondie de ces propriétés contribue à une formulation précise du B.C.R, adaptée aux exigences spécifiques de chaque application [33].

Les résultats de la résistance en traction par fendage, mesurés à 28 jours, sont présentés dans l'histogramme de la Figure I.9, en fonction de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Il est observé que, tout comme pour la résistance en compression, la résistance à la traction diminue également avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. La Figure I.9 illustre l'évolution de la résistance en fonction du temps. Il est important de noter que l'effet du caoutchouc sur la résistance à la traction par fendage est moins prononcé que sur la résistance en compression. Les mêmes explications que celles précédemment évoquées pour justifier la diminution de la résistance en compression, à savoir la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment, demeurent pertinentes [34]

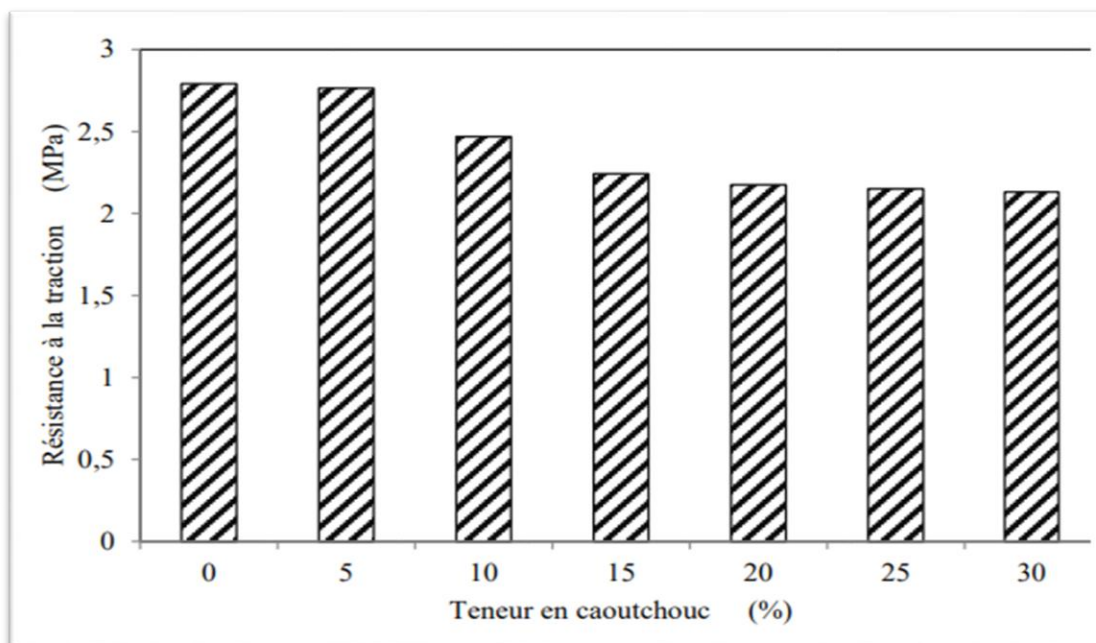


Figure I.9 Effet du caoutchouc sur la résistance en traction par fendage.[34]

I.8.4 La résistance à la flexion :

Dans le contexte du dimensionnement des dalles en Béton compacté au Rouleau (BCR), la résistance à la flexion émerge comme le paramètre prédominant et décisif. La résistance à la flexion d'un matériau, mesurée généralement par des essais tels que le flexionnement en trois points, est cruciale pour évaluer la capacité de la dalle à supporter des charges appliquées et à résister aux contraintes de flexion. [35]

La résistance à la flexion constitue une caractéristique essentielle du béton de caoutchouc renforcé (BCR), étant donné que les ruptures dans les chaussées se produisent fréquemment sous l'effet de sollicitations de flexion. Les essais ont été menés conformément à la norme ASTM C78.

La Figure I.10 présente les résistances en flexion mesurées à 7, 14 et 28 jours. Il a été observé que, de manière similaire aux résistances en compression et en traction, la résistance en flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Pour un taux de remplacement partiel de 30 %, la résistance en flexion passe de 5,8 MPa à 4 MPa, soit une diminution d'environ 30 %.[36]

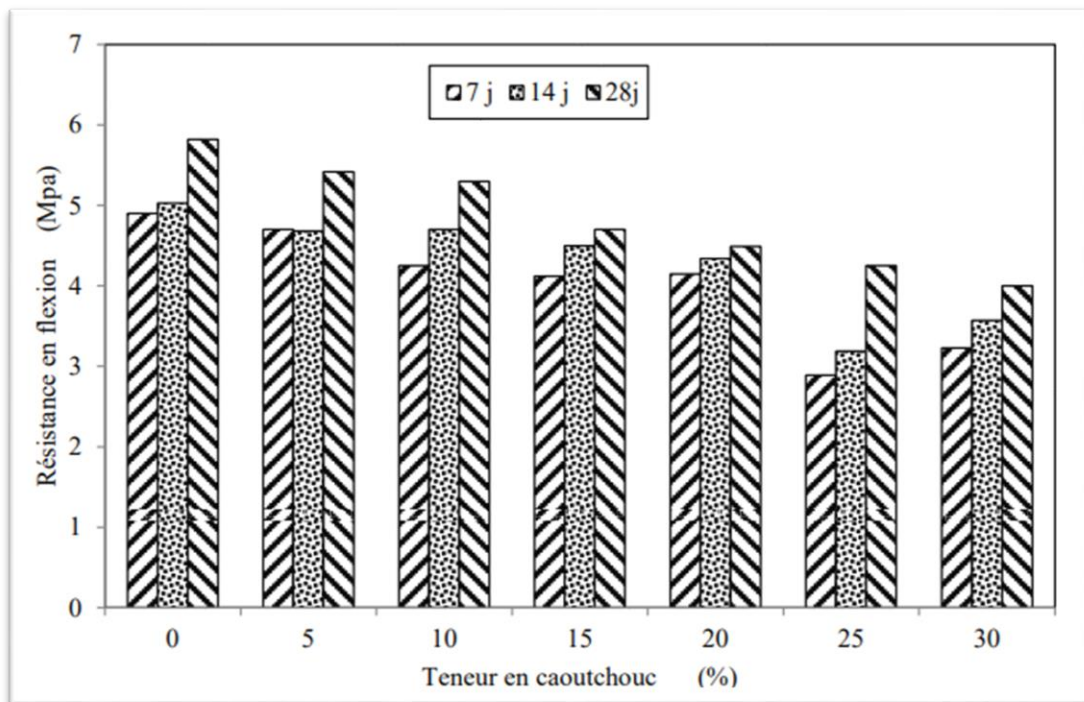


Figure I.10. Variation de la résistance en flexion contre la teneur en caoutchouc[36]

I.9. Conclusion

Ce segment expose une revue de la littérature sur le Béton de compactée au rouleau (BCR) et les principes fondamentaux régissant son comportement. L'analyse bibliographique a révélé que le BCR émerge comme un matériau à la fois performant, économiquement viable et doté d'une durabilité notable. Dans le contexte d'un assemblage de BCR, il est crucial de souligner que le processus de compactage représente l'élément déterminant de son comportement.

CHAPITRE II : Bétons à Hautes Performances (BHP)

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre on a donné une idée générale sur le béton haute performances concernant leur composition, formulation ainsi que les propriétés mécaniques. Le Béton à Hautes Performances (BHP) représente une catégorie éminente de bétons hydrauliques, distinguée par l'intégration discernée d'adjuvants dans sa formulation de base. Composé initialement de sable, d'eau, de graviers et de ciment, le BHP se caractérise par l'addition méticuleuse d'adjuvants, notamment des fluidifiants et éventuellement des particules ultrafines. Cette stratégie vise à optimiser ses performances, particulièrement sa résistance mécanique, au-delà des normes conventionnelles.

Le Béton à Hautes Performances, par sa combinaison astucieuse d'ingrédients traditionnels et d'innovations technologiques, incarne l'excellence dans le domaine de la construction. En offrant une résistance exceptionnelle et une durabilité accrue, il s'affirme comme un choix privilégié pour les projets d'envergure nécessitant des matériaux de haute qualité et des performances supérieures. Cette convergence entre la pratique traditionnelle et les avancées contemporaines témoigne de l'adaptabilité et de l'évolution continue du génie civil pour répondre aux exigences croissantes de notre société moderne. [37]

II.2 Historique du BHP :

Avant les années 1980, les Bétons à Hautes Performances (BHP) ou Bétons à Hautes Résistances (BHR) étaient principalement produits en laboratoire. Cependant, l'évolution de cette situation a été marquée dans les années 1980 par l'introduction des superplastifiants et des fumées de silice. Environ vers 1970, les réglementations environnementales ont contraint les industries de ferro-silicium à capturer la poussière émise par leurs cheminées. Cette poussière, appelée fumée de silice, a ensuite été utilisée dans l'industrie du béton. Initialement dotés d'une résistance en compression d'environ 50 MPa, les BHP ont été employés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont.

Aujourd'hui, la production de bétons présentant une résistance caractéristique à 28 jours dépassant les 100 MPa est devenue courante dans de nombreux laboratoires à travers le monde, et leur utilisation sur les chantiers commence à se généraliser. L'utilisation des BHP ouvre la voie à la réalisation d'ouvrages ou d'éléments en béton de sections réduites ou de plus grandes portées, permettant ainsi des gains significatifs en poids et en matériaux. De plus, elle offre la possibilité, dans certains cas, de remplacer d'autres matériaux tels que le bitume, l'acier ou le bois par le béton, ouvrant ainsi de nouveaux marchés à ce dernier, comme les constructions multiétages en Amérique du Nord, les viaducs sophistiqués en France ou les revêtements routiers aux États-Unis.

Outre la résistance et la durabilité, les BHP présentent d'autres aspects non négligeables, comme l'a souligné Aïtci [38]

L'utilisation des Bétons à Hautes Performances (BHP) présente un potentiel bénéfique significatif pour l'avenir de l'industrie de la construction. Les BHP offrent des propriétés

recherchées tout en nécessitant moins de matériaux, ce qui les rend plus économiques en ressources naturelles que les bétons classiques. Cependant, l'intégration d'éléments ultrafins dans la fabrication des BHP est devenue une alternative indispensable pour améliorer leur microstructure, leur résistance mécanique et leur durabilité.

Les particules ultrafines, généralement des fumées de silice condensées, présentent des dimensions réduites, avec une granularité entre 0,02 et 1 μm et un diamètre moyen d'environ 0,4 μm , comparé aux grains de ciment dont la granularité varie entre 1 et 80 μm , avec un diamètre moyen d'environ 15 μm . Le remplacement d'une partie du ciment par de la fumée de silice permet d'augmenter la compacité du béton, en particulier dans la zone de transition entre la pâte durcie et les granulats, car elle comble les vides d'empilement entre les composants granulométriques plus gros du mélange.

Ainsi, l'utilisation judicieuse des BHP avec l'incorporation d'éléments ultrafins permet non seulement d'optimiser l'utilisation des matériaux, mais également d'améliorer les performances et la durabilité du béton. Cette approche représente une voie prometteuse pour répondre aux défis croissants de la construction moderne, en offrant des structures plus résistantes, durables et économiques en ressources [39]

II.3. Définition Du BHP :

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont largement utilisés en raison de leur remarquable résistance, passant d'une moyenne de 30 à 35 MPa à plus de 100 MPa pour les Bétons à très Hautes Performances (BTHP). Ces matériaux durables bénéficient d'une diminution de la porosité, résultant du choix spécifique du spectre de granulats, de l'addition d'éléments ultrafins et éventuellement de l'intégration de superplastifiants. Ces agents contribuent à réduire la teneur en eau nécessaire tout en assurant une maniabilité suffisante du béton. Les BHP offrent ainsi une protection mécanique et chimique accrue contre les agents agressifs, grâce à leur compacité maximale.

La compacité, définie par une réduction plus ou moins complète des pores, est un aspect crucial de la performance des BHP. Cette propriété est étroitement liée à la microstructure du matériau, caractérisée par des paramètres tels que la porosité, la distribution des tailles de pores, la densité et l'ouverture des fissures. Des analyses approfondies de la microstructure, notamment des essais de microscopie, permettent de contrôler la forme, les dimensions et les pourcentages de pores présents dans le matériau. De plus, les essais de perméabilité sont essentiels pour évaluer la capacité du béton à limiter les transferts de fluides à travers sa structure.

En somme, les Bétons à Hautes Performances se distinguent par leur compacité et leur résistance exceptionnelles, résultant d'une formulation minutieuse et de techniques de contrôle avancées de la microstructure. Ces propriétés en font des matériaux de choix pour des applications nécessitant une durabilité et une performance mécanique élevées dans des environnements contraignants [40]

Le béton à haute performance (BHP) ne représente pas une révolution dans les matériaux de construction, puisqu'il utilise les mêmes composants de base que le béton ordinaire. Les

ingrédients de ce nouveau matériau comprennent des granulats de qualité ordinaire, du ciment Portland classique (généralement à haute résistance initiale), utilisé en quantité significative (entre 450 et 550 kg/m³). De plus, il intègre de la fumée de silice, généralement présente à hauteur de 5 à 15% de la masse totale du liant, ainsi que parfois d'autres ajouts minéraux tels que des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau granulé broyé.

Un élément crucial dans la formulation du BHP est l'usage systématique de superplastifiants, dont le dosage varie entre 5 et 15 litres par mètre cube de béton, selon la teneur en matières sèches et la nature du mélange. Ce dosage permet de réduire considérablement la quantité d'eau nécessaire pour le béton, généralement de 45 à 75 kg/m³. Il est essentiel que le BHP puisse être mis en place dans la structure en utilisant des méthodes conventionnelles et qu'il soit soumis à un processus de maturation habituel, bien qu'un bon mûrissement humide demeure nécessaire.

La principale caractéristique distinctive du BHP réside dans son très faible rapport eau/ciment, toujours inférieur à 0,3 et parfois même ne dépassant pas 0,25 voire exceptionnellement 0,20. Cette caractéristique contribue à sa performance élevée en termes de résistance et de durabilité, ce qui en fait un matériau privilégié pour des applications nécessitant des propriétés mécaniques exceptionnelles.[41]

II.4 Composition du BHP :

Pour un béton ordinaire, le défi de la composition réside dans la réalisation d'un mélange aussi compact que possible, tout en conservant une maniabilité acceptable et en minimisant les coûts, ce qui conduit généralement à limiter le dosage en ciment, composant le plus onéreux. En revanche, pour les Bétons à Hautes Performances (BHP), l'approche est différente. L'objectif est de créer un béton présentant une résistance à la compression supérieure, accompagnée d'une amélioration notable de ses propriétés, tant à l'état frais qu'à long terme. Ainsi, le rapport eau/liant en présence d'éléments ultrafins implique l'utilisation de superplastifiants, ce qui revêt une importance capitale.

Lors du choix des matériaux pour la fabrication d'un BHP, chaque composant doit faire l'objet d'une sélection précise et rigoureuse. La sélection débute par celle du ciment Portland, même en présence d'autres ajouts cimentaires utilisés en conjonction avec celui-ci. Ensuite, il convient de choisir le superplastifiant afin d'optimiser la combinaison ciment-superplastifiant. Une fois ces choix cruciaux effectués, on peut envisager l'utilisation d'un ou plusieurs ajouts cimentaires. Enfin, la sélection des granulats intervient, leur qualité devenant de plus en plus critique pour accroître la résistance à la compression du BHP.

Ainsi, la fabrication d'un Béton à Hautes Performances repose sur une série de choix minutieux et interdépendants, visant à maximiser la performance du matériau tout en optimisant son coût et sa durabilité [42]

II.4.1 Le ciment :

Pour la fabrication des Bétons à Hautes Performances (BHP), l'utilisation de ciments de type CEM I, CEM II ou CEM III est nécessaire. Le ciment de classe 52,5 N est largement privilégié, bien que la classe 52,5 R puisse être employée si une résistance initiale très élevée est recherchée. Le dosage typique se situe généralement entre 400 et 450 kg/m³. En complément à la liste des 27 ciments courants précédemment mentionnée dans l'article sur les bétons ordinaires, le chiffre 52,5 représente la résistance du béton à 28 jours d'âge. La lettre R indique que le béton atteindra une résistance significative (à court terme) à 2 jours d'âge, tandis que si la lettre est N, la bonne résistance ne sera obtenue qu'après 7 jours de coulage.

Cette sélection minutieuse du ciment revêt une importance capitale pour garantir les performances souhaitées du BHP, en assurant à la fois une résistance mécanique élevée à long terme et, si nécessaire, une résistance initiale rapide. En choisissant le bon type et la bonne classe de ciment, les ingénieurs peuvent adapter le béton aux exigences spécifiques de chaque projet, en assurant une durabilité et une fiabilité optimales des structures construites. [43]

II.4.2. Les granulats :

Étant donné que la résistance du béton peut être entravée par la résistance du granulat, l'utilisation de calcaire est déconseillée. Seuls des granulats de très haute qualité, tels que le porphyre et le gravier, sont recommandés. Généralement, le diamètre maximal des grains se situera entre 10 et 20 millimètres. Cette sélection rigoureuse des granulats est cruciale pour garantir la résistance et la durabilité optimales du béton à haute performance. En optant pour des granulats de qualité supérieure, les ingénieurs peuvent minimiser les risques de défaillance structurelle et assurer la performance à long terme des ouvrages en béton. [43]

II.4.3. Les additions :

Les matériaux supplémentaires utilisés dans la fabrication des Bétons à Hautes Performances (BHP) comprennent les cendres volantes de silice-alumine, les fillers calcaires, les fillers de silice et le laitier de haut fourneau. La fumée de silice est également mentionnée pour ses propriétés ultrafines, avec un diamètre de particule de 0,1 micron, qui permettent de minimiser les vides entre les grains de granulats, contribuant ainsi de manière significative à la résistance globale du béton. [43]

II.4.4. Les adjuvants :

Les adjuvants généralement utilisés dans les Bétons à Hautes Performances (BHP) sont soit des plastifiants réducteurs d'eau, soit des superplastifiants à fort pouvoir réducteur d'eau. La complexité de la composition rend la détermination de la composition optimale extrêmement difficile. Cependant, en règle générale, le dosage en ciment ne dépasse que très rarement 450 kg/m³. La proportion de fumée de silice est généralement de l'ordre de 5 à 10 % du poids du ciment utilisé. Le rapport eau-ciment se situe entre 0,25 et 0,30. En présence de fumée de silice, l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau est indispensable pour faciliter leur dispersion. La quantité d'adjuvants est souvent d'environ 10 litres par mètre cube de béton. [43]

II.4.5. Fumée de silice :

Également appelées « fumées de silice » ou « poussières de silice » ou encore « microsiline », les fumées de silice sont un sous-produit de l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages. On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice. En tant que sous-produits industriels, leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre, mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication : la fumée de silice est un matériau très variable [44]

II.5 La formulation du BHP :

L'objectif de toutes les différentes méthodes de formulation du béton est de déterminer la combinaison des matériaux à utiliser pour produire un béton ayant les propriétés souhaitées tout en étant économiques. L'amélioration des performances mécaniques et de la stabilité du béton est réalisée par la réduction de sa porosité. Ainsi, il est essentiel de rechercher un mélange compact, caractérisé par une compacité élevée et une faible quantité d'eau de gâchage. Dans ce chapitre on va présenter la méthode de l'Université de Sherbrooke adaptée à la formulation du BHP.[45]

II.5.1 Méthode du Sherbrooke (méthode proposée) :

L'Université de Sherbrooke a développé une méthode de formulation pour les bétons à haute performance sans air entraîné, et elle a également adapté cette méthode pour formuler des BHP à air entraîné en tenant compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air dans le béton. Cette méthode, qui suit la même approche que la norme ACI 211-1 (American Concrete Institute), combine des résultats empiriques avec des calculs basés sur la méthode des volumes absolus.

Dans cette méthode, cinq caractéristiques spécifiques du béton à haute performance ou des matériaux utilisés sont prises en compte lors de la procédure de formulation : le rapport eau/liant, le dosage en eau, le dosage en gros granulats, le dosage en superplastifiants, et la teneur en air [45]

II.5.1.1 Rapport eau/liant :

Le rapport eau/liant suggéré peut-être trouver à partir de (Figure II.1) pour une résistance à la compression à 28 jours

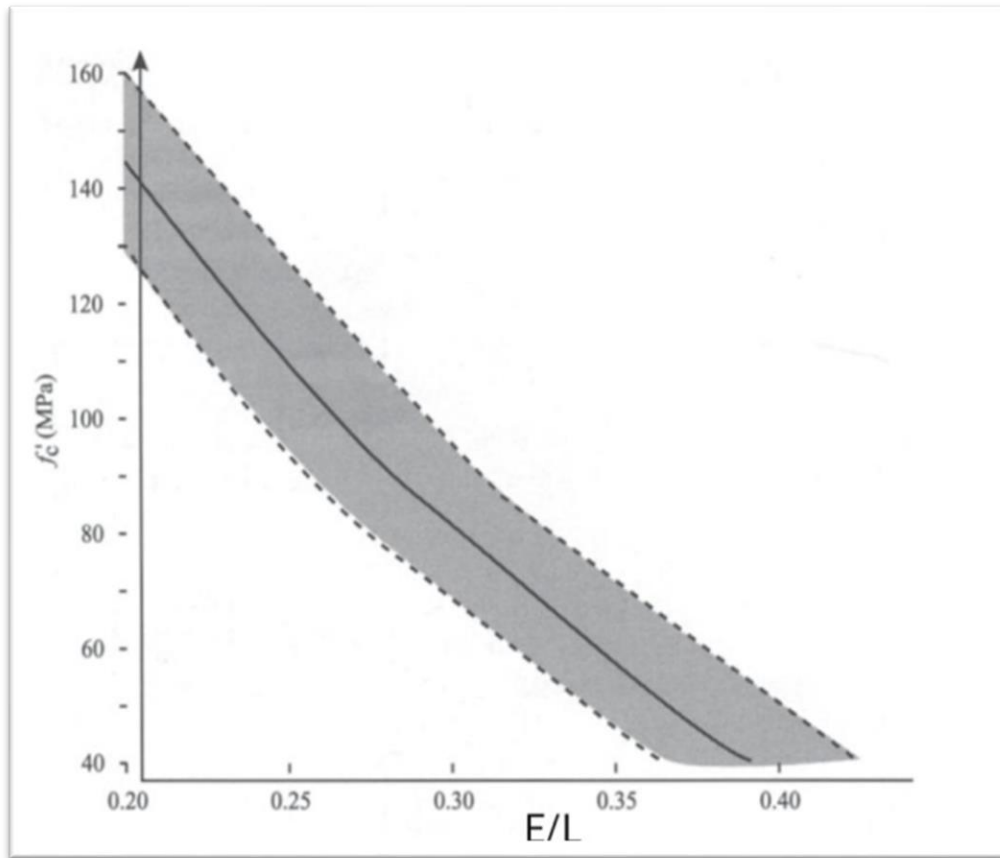


Figure II.1 : Relation E/L proposée par rapport à la résistance à la compression [45]

II.5.1.2 Le dosage de l'eau :

Cette méthode simplifiée, basée sur le concept du point de saturation, est souvent privilégiée lorsqu'une approche plus complexe n'est pas pratique. Elle est présentée de manière schématique dans la (Figure II.2). Pour assurer une conception du mélange avec une marge de sécurité élevée, il est recommandé d'ajouter 5 litres par mètre cube d'eau aux valeurs indiquées dans la (Figure II.2). En cas d'absence d'information sur le point de saturation du superplastifiant, il est conseillé de débiter avec une teneur en eau de 145 litres par mètre cube.

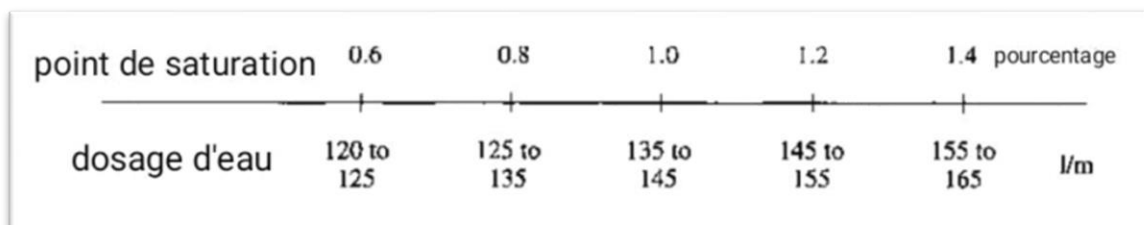


Figure II.2 : Détermination du dosage minimal de l'eau [45]

II.5.2 Dosage du super plastifiant :

Le dosage de superplastifiant peut être déduit du dosage au point de saturation. En l'absence d'information sur le point de saturation, il est recommandé de commencer par un dosage d'essai de 1,0 %.

II.5.3 Dosage de fumée de silice :

Théoriquement, pour fixer toute la chaux potentielle libérée par l'hydratation du C3S et du C2S, le dosage de la fumée de silice devrait être de 25 à 30 %.

II.5.4 La teneur en air :

Pour les bétons à hautes performances destinés à être utilisés dans des environnements sans gel, théoriquement, il n'y a pas besoin d'air entraîné. Ainsi, le seul air présent dans le mélange est l'air emprisonné, dont le volume dépend en partie des proportions du mélange. [45]

II.6 Les avantages des BHP :

Les avantages du béton à hautes performances (BHP) par rapport au béton ordinaire sont nombreux

- Une meilleure maniabilité sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre.
- Une amélioration de la durabilité des structures grâce à la forte compacité du béton, entraînant une perméabilité réduite à l'air et à l'eau, une résistance accrue aux agressions chimiques, une meilleure résistance à l'alcali-réaction, une plus grande résistance à l'abrasion et une meilleure résistance aux cycles de gel/dégel.
- La possibilité de concevoir des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la compression, à la traction et le module d'élasticité, tant au jeune âge qu'à long terme.

Cependant, pour obtenir ces propriétés améliorées, plusieurs mesures doivent être prises simultanément, notamment :

- L'utilisation de granulats de haute qualité, car la résistance du béton peut être limitée par celle des granulats eux-mêmes.
- Le recours à des adjuvants spécifiques, notamment des superplastifiants réducteurs d'eau, ainsi que des ajouts minéraux tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, etc.
- L'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³.

L'utilisation du béton à hautes performances est en constante progression dans le domaine de la construction, car les concepteurs et les maîtres d'œuvre reconnaissent de plus en plus la valeur et la durabilité de ce matériau..[46]

II.7 Caractéristiques des BHP :

II.7.1. caractéristique physique :

II.7.1.1.Ouvrabilité :

La variabilité de ce facteur fondamental peut être similaire à celle des bétons classiques, et les lumps d'environ 15 à 18 cm peuvent être facilement obtenus avec le cône d'Abrams. Cependant, plusieurs éléments doivent être étudiés de manière impérative :

- Les caractéristiques des granulats, incluant le module de finesse du sable.
- Le choix du ciment et du superplastifiant.
- Les dosages de ces différents matériaux, ainsi que de la fumée de silice et de l'eau, pour atteindre la plasticité souhaitée, en tenant compte des difficultés éventuelles de mise en œuvre dans les coffrages et des contraintes liées aux armatures.

L'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs :

- Le type et la quantité de ciment.
- Le type et la quantité de sable.
- La teneur en eau.
- L'aspect et la taille des agrégats.

Si les agrégats sont plus gros, leur surface spécifique est généralement moindre, ce qui signifie que pour une même quantité de mortier de ciment, les couches intermédiaires entre les grains des agrégats sont plus épaisses, rendant le mélange de béton plus fluide. Une augmentation de la quantité de sable au-delà de la quantité optimale réduit la fluidité de la pâte en raison de l'augmentation de la surface totale des agrégats. La forme des grains influe également sur la fluidité : si les grains sont arrondis et lisses, la surface de contact et le frottement entre eux seront plus réduits, rendant le mélange plus fluide que celui formé avec des granulats concassés.[47]

II. 7.1.2.Porosité :

Lorsque les silicates anhydres des grains de ciment entrent en contact avec l'eau, leur hydratation débute toujours par une mise en solution. En d'autres termes, la phase liquide se sature avec différents ions qui se combinent ensuite pour former les différents produits d'hydratation. Ces produits d'hydratation occupent progressivement une partie de l'espace initialement rempli d'eau. Au fur et à mesure que l'hydratation progresse et que la taille des pores capillaires diminue, les mouvements de l'eau dans le système deviennent de plus en plus difficiles, ce qui fait que l'hydratation des grosses particules de ciment se fait plutôt par diffusion. À n'importe quel moment pendant la réaction d'hydratation, les espaces non remplis par des produits solides (hydrates et particules de ciment anhydre) peuvent être considérés comme des vides ou des pores capillaires. [48]

Les dimensions et le volume des pores capillaires sont les principaux paramètres régissant les propriétés physiques et mécaniques du béton. La porosité dépend essentiellement du rapport E/C du béton. Des études ont montré que pour un béton donné, la simple réduction du rapport E/C de 0,5 à 0,22 entraîne une diminution d'un facteur 3 du volume total des pores capillaires. L'addition de laitier ou de cendres volantes ne modifie pas la porosité totale, mais conduit à une diminution générale de la dimension des pores [49]

II.7.1.3. Perméabilité :

La perméabilité est caractérisée par la valeur du débit de transport des fluides et des gaz (eau, chlorure, sulfates, oxygène, etc.) à travers des pores capillaires et des fissures du béton. En raison de leur très grande compacité, les BHP sont très peu perméables. Cette imperméabilité est mise en évidence lorsque des échantillons de béton, conservés pendant un an dans l'eau, sont brisés, révélant un cœur absolument sec. Ce phénomène peut s'expliquer également par la présence de nombreuses particules de ciment non hydratées qui parviennent à arrêter la progression de l'eau vers l'intérieur du béton, renforçant ainsi son imperméabilité. Des mesures de perméabilité de mortier effectuées en Allemagne ont donné des valeurs comprises entre $0,64 \times 10^{-12}$ m/s pour un rapport E/C de 0,40 et 440×10^{-12} m/s pour un rapport E/C de 0,75. Ces résultats confirment des essais anciens réalisés aux États-Unis, montrant que la perméabilité d'un béton est réduite d'un facteur de 1000 lorsque le rapport E/C passe de 0,80 à 0,40. [50]

II.7.2 Caractéristiques mécaniques :

On comprend bien que les silicates de calcium hydratés formés lors de l'hydratation des silicates di et tricalciques sont principalement responsables de l'augmentation de la résistance du béton. Les processus complexes associés à l'hydratation du ciment, tels que les mouvements thermiques ou le retrait, contribuent à la formation de défauts. Dans les bétons traditionnels, ces défauts se trouvent principalement dans la zone de transition.[51]

II.7.2.1 Résistance à la compression :

Les augmentations de la résistance à la compression se manifestent dès le jeune âge ; on atteint aisément les 15 MPa au bout de 24 heures, 40 MPa après une semaine et plus de 60 MPa après 28 jours. À l'heure actuelle, l'expression "béton à haute performance" couvre des bétons ayant une grande gamme de résistances. On peut diviser les BHP en cinq classes différentes définies chacune par des résistances à la compression qui peuvent être considérées comme des barrières technologiques dans l'état actuel de la technologie des BHP.

Tableau II .1 : Classes du Béton à haute performance (BHP) [52]

Type du béton	Béton à haute performance (BHP)		
Classe de BHP	Classe I	Classe II	Classe III
Résistance à la compression (MPa)	50	75	100

Dans la figure II.3, les résistances des bétons sont présentées en fonction du temps. L'analyse des courbes de cette figure révèle que ces résistances évoluent toutes de manière similaire. De plus, l'objectif visé, à savoir un Béton à Haute Performance avec une résistance supérieure à

60 MPa, est atteint pour les compositions 4 et 5. En effet, après 28 jours, les valeurs de la résistance en compression pour B4 et B5 atteignent respectivement 71,8 MPa et 63,5 MPa.

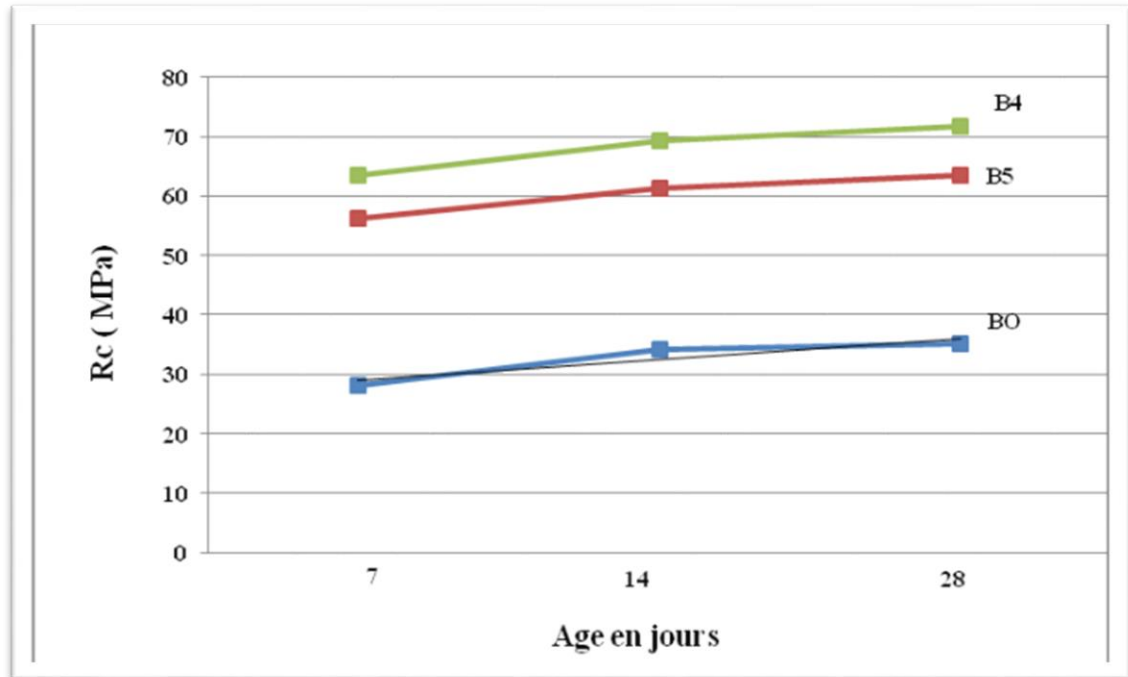


Figure II.3: Évolution de la résistance à la compression dans le temps [53]

II 7.2.2 Le retrait :

Le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau du béton, au contact de l'atmosphère. De façon générale, l'eau existe dans le béton dans les états suivants :

- Sous forme de gel dans les sels hydratés.
- En fermée dans les petits interstices sous forme capillaire.
- Libre dans les vides les plus importants entre les granulats et la pâte.

Le processus du séchage de l'eau dans le béton est le suivant : lorsque le béton sèche, l'eau s'évapore d'abord à la surface des tubes capillaires ; il en résulte un accroissement de la courbure du ménisque de capillaire, et une tension qui attire l'eau des vides les plus importants ; qui se déplace vers les capillaires. Ce processus se répète, le béton se dessèche de plus en plus au voisinage de la surface. Au fur et à mesure il recule des ménisques intérieurs, les gels d'hydratation arrivent au contact direct avec l'atmosphère. A priori, on pourrait penser que pour un béton qui contient une grande quantité de pâte de ciment et d'eau, les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré.

Dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la chaux avec la silice donne naissance à un silicate du calcium. Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels. Par conséquent, la déformation de retrait est réduite.

D'après chaid et al : Le retrait total des bétons avec ajouts cimentaires, mesurés sur éprouvettes 7 x 7 x 28 cm, est plus faible que celui mesuré sur celles de béton de référence Figure II.4, cependant, le béton avec ajout de calcaire se comporte mieux. Ce fait, est du en particulier à la grande finesse de cet ajout, qui avantage la densification dès les premières échéances et diminue par conséquent le retrait. [53]

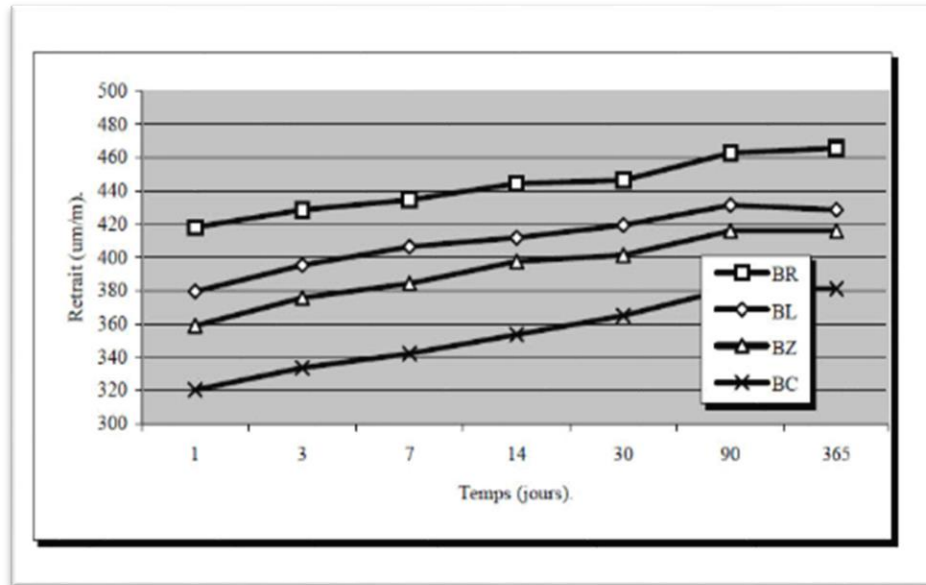


Figure II.4 : Évolution des retraits des différents bétons [53]

II.8.Conclusion :

Le béton à Hautes Performances (BHP) constitue une avancée significative dans le domaine des matériaux de construction, marquée par ses propriétés supérieures en termes de résistance, de durabilité et d'esthétique. Son adoption croissante dans l'industrie de la construction promet d'améliorer la qualité, la durabilité et l'efficacité des structures à l'échelle mondiale. Cette évolution représente un tournant majeur dans le secteur de la construction, offrant aux concepteurs et aux ingénieurs une palette élargie d'options pour répondre aux exigences des projets exigeant des performances exceptionnelles.

CHAPITRE III : Caractéristique des matériaux utilisés.

III.1.Introduction :

Ce chapitre expose les caractéristiques intrinsèques des matériaux employés pour créer les mélanges de béton compacté haute performance . Les étapes et la procédure utilisées pour la formulation du BCR sont clairement expliquées. De plus, la méthode de formulation basée sur les principes géotechniques est également abordée dans ce chapitre.

III.2.Matériau utilisé :

Avant d'établir les formulations de béton, nous avons procédé aux essais d'identifications selon les normes et le mode opératoire du laboratoire LTPE afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques et de fabrications des granulats naturels. Ces caractéristiques concernent la granulométrie, le coefficient d'aplatissement, la masse volumique apparente et absolue, tests de propreté, valeur au bleu de méthylène et la résistance aux chocs LA.

Chaque valeur retenue pour ces différentes caractéristiques est issue d'une moyenne calculée sur trois résultats de mesure afin d'assurer une bonne représentativité.

Les granulats sont soumis aux essais conformément aux modes opératoires suivants :

- Analyse granulométrique par tamisage et teneur en fines :Norme EN 9331.
- Coefficient d'aplatissement :Norme EN 9333.
- Équivalent de sable :Norme EN 9338.
- Essai de bleu de Méthylène :Norme EN 933-9
- Essai Los Angeles :Norme EN 10972.
- Masses volumiques réelles et absorption :Norme EN 10976.
- Masses volumiques en vrac (apparentes) :Norme EN 1097-3.

III.2.1 Caractéristique de sable :

Nous avons utilisé dans ce travail un sable 0/4 provient de carrière de BETONEX sise à MANSOURA WILLAYA DE BBA.

III.2.1.1 Analyse granulométrique (NFEN 933-1(Version mai 2012) :

L'essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions d croissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise.

Le procédé adopté est le tamisage par lavage suivi du tamisage sec. Lorsque le lavage peut altérer les Caractéristiques physiques d'un granulat léger, il faut utiliser le tamisage sec et le mode opératoire spécifique -



Figure.III.1 :Une balance et une tamiseuse vibrante

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de la carrière BETONEX sont regroupés dans le tableau (III.1) ci-dessous :

Tableau III.1.Analyse granulométrique du sable de carrière BETONEX.

Tamis	Masse Refus	% Refus	% Tamisât	Tamisât Arrondie
6,3	0	0,00	100,00	100
4	7	2,33	97,67	98
2	87	29,00	71,00	71
1	136	45,33	54,67	55
0,5	172	57,33	42,67	43
0,315	195	65,00	35,00	35
0,25	202	67,33	32,67	33
0,125	235	78,33	21,67	22
0,063	256	85,33	14,67	15

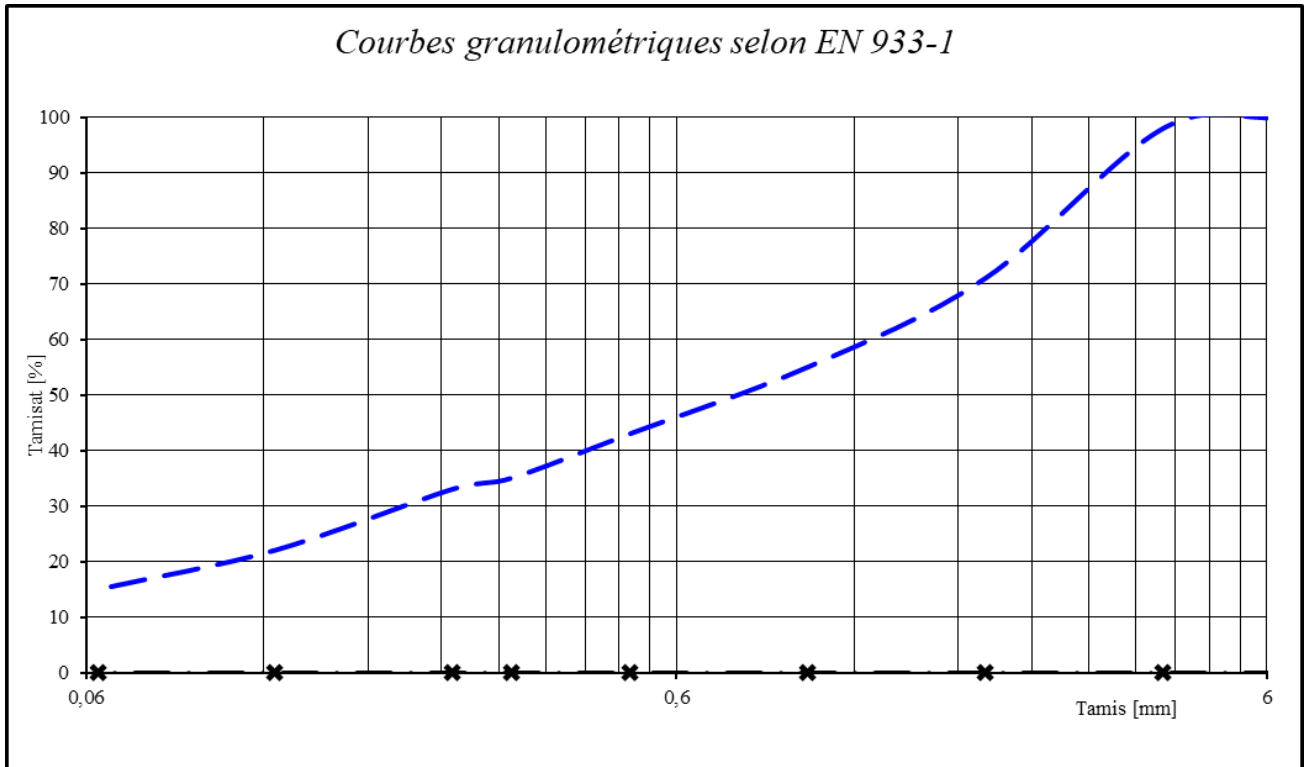


Figure III.2. L'Analyse granulométrique du sable de Carrière (BETONEX).

III.2.1.1.1 Module de finesse :

Le module de finesse permet de contrôler la régularité.

Le module de finesse est défini comme la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage, déterminée sur la série de tamis 4mm ; 2mm ; 1mm ; 0,5mm ; 0,25 mm ; 0,125mm et ce calcule en appliquant la formule suivante :

$$FM = \frac{\sum \{(\gt 4) + (\gt 2) + (\gt 1) + (\gt 0.5) + (\gt 0.25) + (\gt 0.125)\}}{100}$$

Tableaux III.2 Grosseur ou finesse de sable mesurée à partir du module de finesse

Grosseur ou finesse de sable mesurée à partir du module de finesse					
Module de finesse					
CF		MF		FF	
4	2,4	2,8	1,5	2,1	0,6

On a obtenu pour le sable testé un module de finesse MF=2.88, ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable.



III.3 Propreté «équivalent de sable» (NF EN 933-8)

La présente norme européenne spécifie une méthode de détermination de l'équivalent de sable dans la fraction 0/2 mm des sables et des graves. Elle s'applique également aux agrégats naturels,

verser une prise d'essai de sable et une petite quantité de solution floculante dans un cylindre gradué et agiter de façon détachée les revêtements argileux des particules de sable de la prise d'essai. Irriguer alors le sable en utilisant le reste de solution floculante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, calculer l'équivalent de sable (SE) comme la hauteur de sédiment, exprimées en pourcentage de la hauteur totale de matériau floculé dans le cylindre.

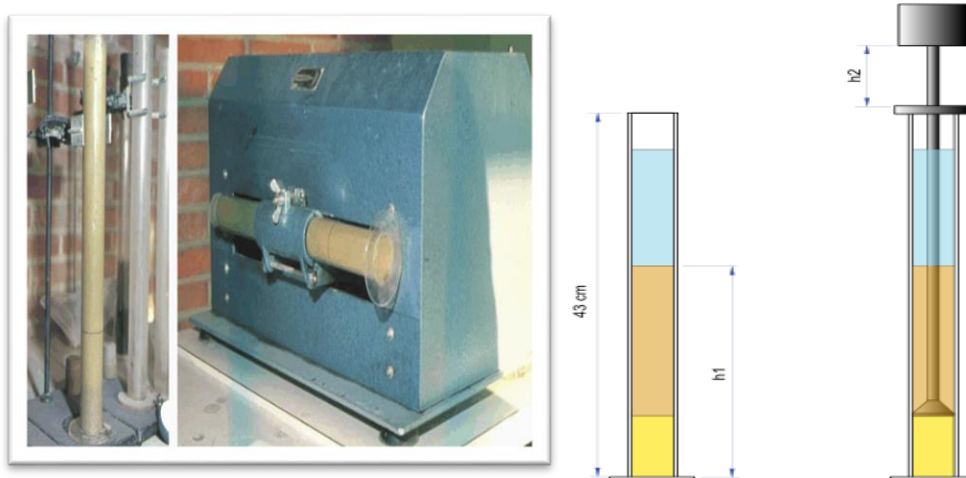


Figure III.3.Essais d'équivalent de sable

Tableau III.3.Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable carrière BETONEX

Teneur en eau 1 ^è prise d'essai	w	4.10	%
Masse humide de la 2 ^è prise d'essai :	M1	300	g
Masse sèche de la 2 ^è prise d'essai :	M2	235,88	g
Teneur en fines	f	18,14	
Masse granulat humide 2 ^è sous éch	M3	68.86	g
Masse du sable correcteur sec	M4	53.85	g
Masse de chaque éprouvette	MT	122,71	g
		1 ^è Ep	2 ^è Ep
Hauteur du floculat	h1 (mm)	11	11
Hauteur du sédiment	h2 (mm)	9,7	9,8
Rapport (h2/h1)*100		88,2	89,1
Équivalent de sable: SE (10)		88.63	

Le sable testé donne les résultats suivants : $E_{s10}=88,63(\%)$

Interprétation des résultats et qualité du sable:

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'en apprécier la qualité pour composer un béton.

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
$65\% \leq ES < 75\%$	$60\% \leq ES < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
$75\% \leq ES < 85\%$	$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ES \geq 85\%$	$ES \geq 80\%$	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau

III.3.1. Essais pour détermination de la masse volumique en vrac (apparente) et de la porosité intergranulaire (NF EN 1097-3)

La masse sèche des granulats remplissant un conteneur spécifié est déterminée par pesage et la masse volumique en vrac correspondante est calculée. Le pourcentage de porosité intergranulaire se calcule partir de la masse volumique en vrac et de la masse volumique réelle. Peser les conteneurs vides, secs et propres (1). Poser le conteneur sur une surface horizontale et le remplir l'aide de la pelle jusque ce qu'il d borde. Durant le remplissage du conteneur, limiter la

ségrégation en appuyant sur le bord sup rieur. Aucun moment le bord de la pelle ne doit être plus de 50 mm au-dessus du conteneur. Enlever avec soin tout excédent au sommet du conteneur en veillant ce que la surface soit étalée e de manière informe afin d'éviter tout phénomène de ségrégation. Nivelier la surface des granulats l'aide de la règle, en ayant soin d'éviter tout compactage la surface. Si cela s'avère impossible, nivelier la surface la main en essayant autant que possible d'estimer le volume des granulats par rapport la capacité du conteneur.

Peser le conteneur rempli et enregistrer sa masse $0,1 \% \text{ pr s}$ (2). Soumettre trois prises d'essai cet essai.

La masse volumique en vrac q_b se calcule pour chaque éprouvette selon l'équation suivante : $q_b = (M_2 - M_1) / V$



Figure III.4 : masse volumique de sable

Tableau III.4: Masse volumique en vrac (apparente)

Masse volumique en vrac (apparente)				
Essai N°		1	2	3
Masse du conteneur vide m1 (kg)		2,62	2,62	2,62
Masse du conteneur rempli m2 (kg)		10,42	10,46	10,48
Capacité du conteneur V (l)		4,7	4,7	4,7
Masse volumique vrac	ρ_b (T/m ³)	1,660	1,668	1,672
Moyenne		1,67 (T/m ³)		
Porosité inter granulaire	v	0,408	0,405	0,404

III.3.2 Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau (NF EN 1097-6)

La masse volumique réelle se calcule à partir du rapport masse/volume. La masse se détermine en pesant la prise d'essai saturée surface sèche et de nouveau après séchage l'étuve. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée soit par réduction du poids, selon la méthode du panier en treillis ou par pesée, selon la méthode au pycnomètre.

Les résultats de la densité absolue et le coefficient d'absorption d'eau dans ce tableau III.5 :

Tableau III.5: Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau

Temperature d'eau :				19 °c
masse volumique de l'eau :				0,9984
Masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs : M1				356,2
Masse du pycnomètre contenant l'échantillon des granulats saturés M2				2842,65
Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement M3				2613
Masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve M4				355,62
Masse volumique absolue (ρ_a)				2,82
Masse volumique réelle séchée à l'étuve ρ_{rd}				2,806
Masse volumique réelle saturée surface sèche ρ_{ssd}				2,810
coefficient d'absorption d'eau : WA24				0,16
Vérification:	$\rho_{ssd} = \rho_{rd} + \rho_w(1 - \rho_{rd} / \rho_a)$			2,810

III.3.3 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)

L'essai permettant de déterminer la valeur de bleu de méthylène de la fraction 0/2 mm dans les sables ou le tout-venant (MB), des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier-filtre pour détecter la présence de colorant libre. Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MB F) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé g par kg de la fraction granulaire testée.



Figure III.5 : Essais au bleu de méthylène

Tableau III.6 : Teneur en eau de sable utilisé

Teneur en eau	w	1,11	%
Masse initiale de la prise d'essai:	M0	204,13	g
Masse sèche de la prise d'essai:	M1	202,1	g
Volume de bleu introduit	V1	10	cm ³
valeur au bleu de la fraction 0/2 des sables	MB	0,49	g/Kg

Conclusion des résultats du sable :

Le sable concassé BETONEX MANSOURA est propre, a une bonne teneur en fines, mais son module de finesse est élevé (sable à gros grains).

III.4 Caractéristique granulats :

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

III.4.1 Analyse granulométrique (NFEN 933-1(Version mai 2012))

L'essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions croissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise.

Le procédé adopté est le tamisage par lavage suivi du tamisage sec. Lorsque le lavage peut altérer les Caractéristiques physiques d'un granulat léger, il faut utiliser le tamisage sec et le mode opératoire spécifique.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux (III.7). Les courbes granulométriques de différentes fractions similaires utilisées sont tracées dans la figure(III.6)

Tableau.III.7 : Analyse granulométrique de gravier par tamisage

tamis	LIFS 8/15	LSFS 8/15	LIFS 3/8	LSFS3/8	G 8/15	G3/8
20	100		100	100	100	100
16	85	100	100	100	92	100
12,5	36	69	100	100	70	100
10	15	42	100	100	24	100
8	0	16	85	100	7	97
6,3	0	9	60	82	1	68
5	0	5	35	65	0	40
2,5	0	0	0	8	0	5
1,6	0	0	0	5	0	1
0,63	0	0	0	0	0	0
0,315	0	0	0	0	0	0
0,16	0	0	0	0	0	0
0,08	0	0	0	0	0	0

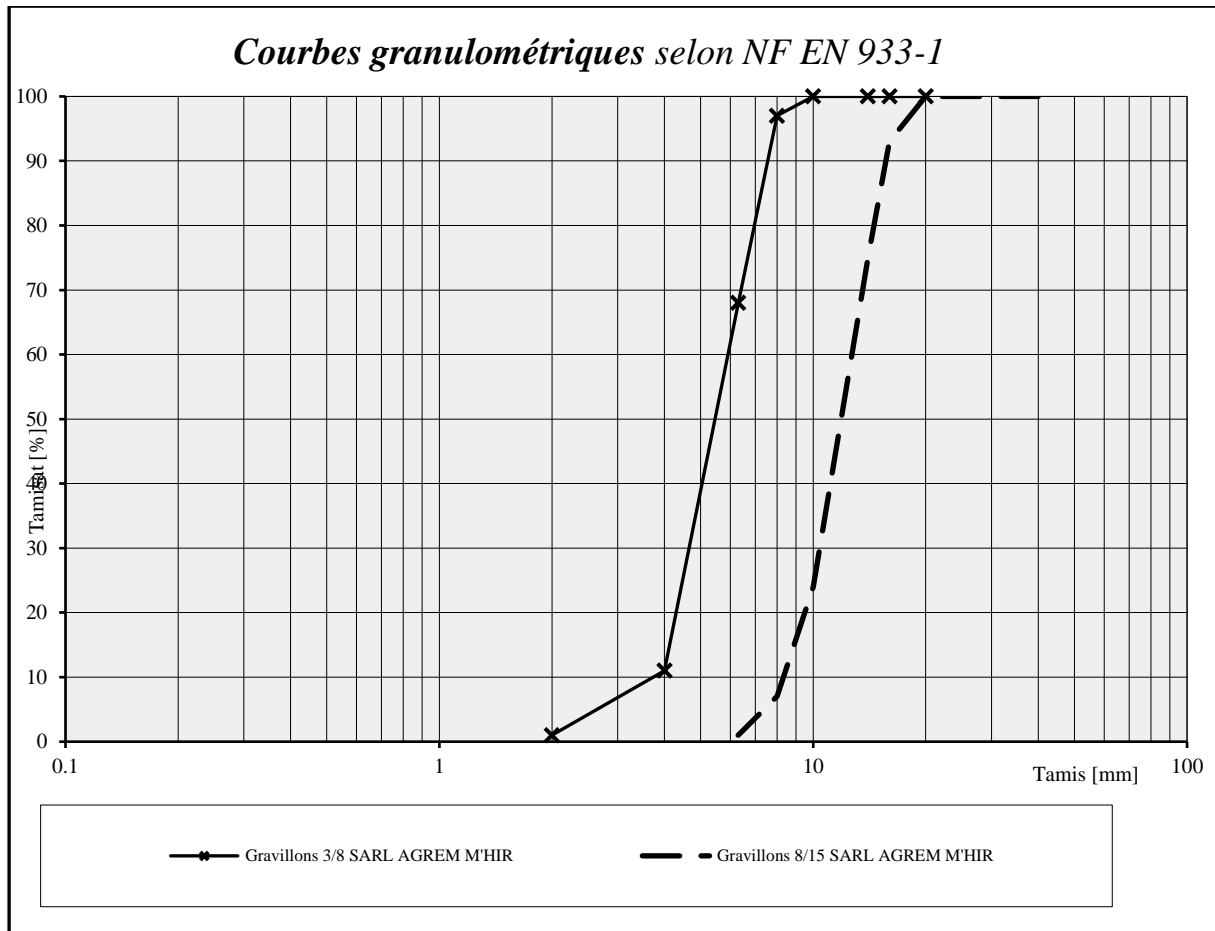


Figure.III.6 Courbe granulométrique des granulats (3/8),(8/15).

III.4.2. Déterminations de la forme des granulats coefficient d'Aplatissement(NF EN 933-3)

La mesure du coefficient d'aplatissement (FI) caractérise la forme des granulats .Le FI s'obtient en faisant une double analyse granulométrique par voie sèche, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées,
- une série de tamis (grille) à fentes parallèles de largeurs normalisées.

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement de chaque granulométrie.

Tableau III.8 : essai d'aplatissement

Provenance Carrière	Fractions	Aplatissement		
		Coef. A	Catégorie EN	Code P18-545
AGREM M'HIR BBA	3/8	16.72	Fl ₂₀	Fl _A
	8/15	14.29	Fl ₁₅	Fl _A

III.4.3 La masse volumique en vrac (apparente) et la masse volumique absolue et l'absorption d'eau

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

Masse volumique apparente à l'état lâche : Masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

Masse volumique absolue : Masse de l'unité de volume d'un corps sans tenir compte des vides qu'elle contient.

Tableau.III.9.La masse volumique des graviers

	ρ_{app} (T/m ³)	ρ_{abs} (T/m ³)	Absorption d'eau %
Gravier 3/8	1.38	2.75	0.44
Gravier 8/15	1.38	2.76	0.43

III.4.4 La résistance a la fragmentation par chocs .essai los angles (NF EN 1097-2) :

L'essai Los Anglos permet de mesurer la résistance des graviers à la fragmentation par choc, dans la machine de Los Angles. L'essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Le principe d'essais consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angles.

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



Figure.III.7. Appareil de l'essai Los Anglos

Principe de l'essai:

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

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à

1.6mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles **LA**): $LA = (5000 - m) / 50$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant:

Tableau III.10. Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Provenance Carrière	Classe granulaire	Los Angeles		
		Coef. LA	Catégorie EN	Code P18-545
AGREM M'HIR BBA	10/14	23	LA ₃₀	LA _A

Classification

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

Tableau.III.11. Classification des roches en fonction du coefficient L_a

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

Interprétation des résultats :

Les gravillons de la carrière AGREM El Mehir, analysés, présentent de bonnes caractéristiques de fabrication (Granulométries, aplatissement et teneur en fines).

- Leur dureté, mesurée par l'essai Los Angeles, est bonne.

Les caractéristiques des gravillons 3/8 et 8/15 sont classées en code

III.5: Caractéristique du ciment utilisé :

Le ciment CEM I 52,5 N est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker d'ajouts.

Le ciment CEM I 52,5 N est la solution performante pour les grands travaux nécessitant une haute résistance. C'est un ciment Portland de la classe de résistance 52,5 N, son domaine d'application est la préfabrication et les bétons nécessitant des délais de décoffrage courts.

III.5.1 Eau de gâchage :

Il s'agit de l'eau du robinet de l'Université Mohamed EL BACHIR EL IBRAHIMI de BBA, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN1008) en matière de béton.

III.5.2 La fumée de silice :

C'est un produit en poudre, constitué par une excellente silice active micronisée, communément

appelée « fumée de silice ». par sa haute composition en silice et micro silicates actifs et par sa grande surface spécifique, est considéré, aujourd'hui, comme l'un des meilleurs produits à haute activité pouzzolane.

CARACTÉRISTIQUES :

est constitué de 93 à 98% de particules sphériques de SiO_2 amorphes avec des dimensions de quelques dixièmes de microns, c'est ainsi que sa surface spécifique s'élève à environ 220.000 cm^2/g (Blaine). Cette caractéristique lui permet de capter et de fixer l'hydrate de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})]$ et de le transformer, en un premier temps, en silicate hydraté et successivement en silicate de calcium stable et irréversible. Cette particularité permet de modifier le comportement des bétons à l'état humide, comme à l'état durci.



Figure III.8 : fumée de silice

III.6 Le finesse de la fumée de silice:

L'essai de la finesse a été effectué par l'appareil montre ci-dessous (surface spécifique de blaine) au niveau du laboratoire pédagogique de génie civil de l'université de BORDJ bou ARRERIDJ.



Figure III.9 : Perméabilimètre de Blaine

Les résultats obtenus montrent que la surface spécifique de Blaine de la fumée de silice est égale à 22 000 cm²/g.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté et analysé les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation des mélanges de BCRHP. Ces résultats montrent les caractéristiques physico-mécaniques nécessaires pour valider les granulats et commencer le programme expérimental.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.1.Introduction :

Ce chapitre présente la formulation suivie pour la fabrication du béton compacte au rouleau haute performance et discutez les résultats obtenus grâce aux essais réalisés au niveau de laboratoire : la résistance à la compression, la résistance à la traction et le retrait.

IV.2 Formulation du BCRHP:

Pour formuler ou fabriquer un béton BCRHP, on a suivi plusieurs étapes :

IV.2.1 Fuseau granulométrique :

Après plusieurs essais réalisés au Laboratoire LTP EST-à Bordj Bou Arreridj sur les différentes classes granulaires, un fuseau granulométrique a été choisi, comme le montre tableau IV.1 et la figure suivante :

Tableau IV.1 Résultats essai Analyse granulométrique.

Diamètre	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Combinée	
			Concasse	
20	100	100	100	100
16	92	100	100	98,48
12,5	70	100	100	94,3
10	24	100	100	85,56
8	7	97	100	81,43
6,3	1	68	100	71,59
5	0	40	100	63
2,5	0	5	76	40,26
1,25	0	1	63	32,43
0,63	0	0	46	23,46
0,315	0	0	35	17,85
0,16	0	0	22	11,22
0,08	0	0	15	7,65
Fond	0	0	0	0

La première phase de cette méthode consiste à sélectionner les différentes proportions permettant de produire un squelette granulaire présentant un minimum de vides, tout en évitant la ségrégation. À cette fin, il est essentiel que la courbe granulométrique combinée se situe entre les limites d'un fuseau granulaire (comme il est indiqué dans la figure IV.1).

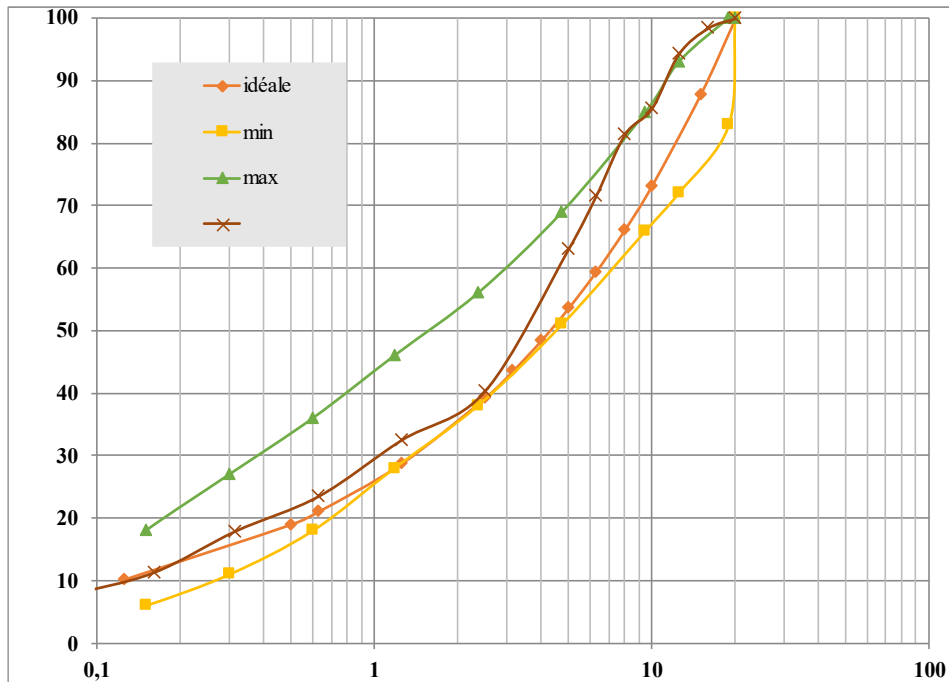


Figure IV.1: la courbe Fuseau granulaire.

IV.3 Déterminer la Teneur en eau (Méthode géotechnique) ;

La méthode de formulation employée est celle de la géotechnique, telle que proposée par l'ACI 325. Cette approche se fonde sur la relation entre la densité sèche et la teneur en eau. Le choix de cette méthode est motivé par l'application prévue du béton, car elle est particulièrement adaptée aux mélanges de béton compacté au rouleau (BCR) destinés aux projets routiers.

Tableau IV. 2 : Résultats essai Proctor (14%ciment).

Essai Proctor 14%				
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Eau ajoutée	5%	6%	7%	8%
Masse totale humide	8680	9020	9025	8660
Masse du moule vide	3834	3834	3834	3834
Masse du sol humide	4846	5186	5191	4826
Masse volumique humide	2,298	2,460	2,462	2,289
Volume du moule	2108,5	2108,5	2108,5	2108,5
Masse volumique sèche	2,203	2,326	2,315	2,130
Teneur en Eau moyenne	4,32	5,76	6,33	7,46

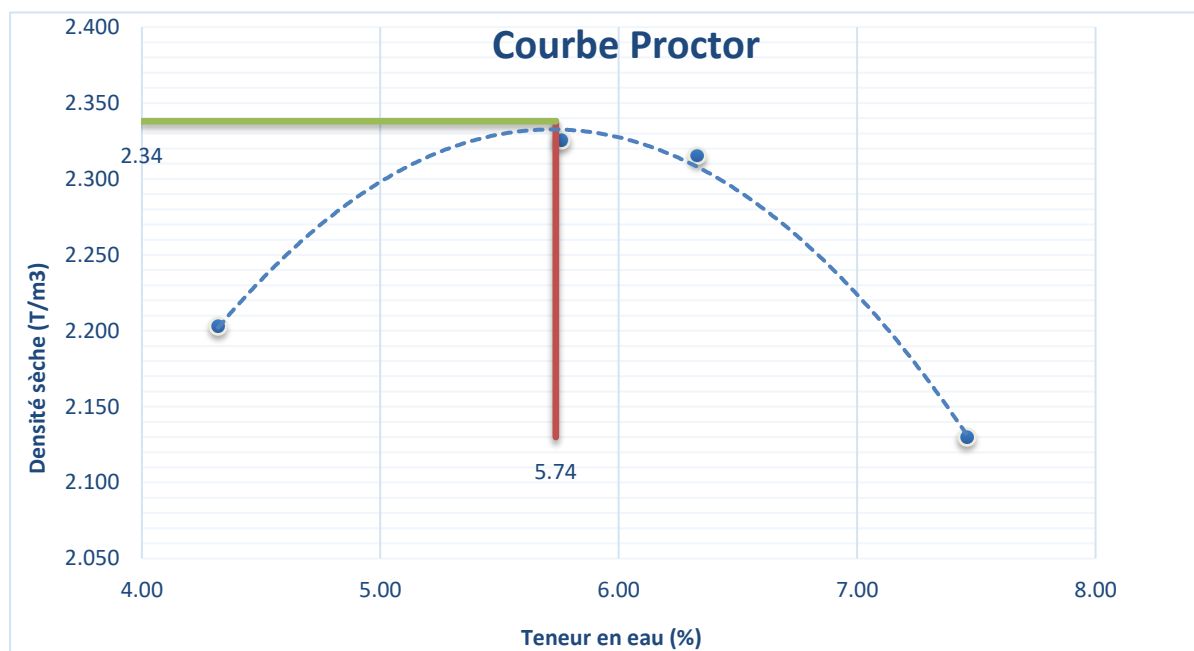


Figure IV.2: Variation de densité sèche en fonction de teneur en eau (14% ciment).

Tableau IV.3 des résultats des mesures.

Tableau des résultats des mesures					
Teneur en eau	W%	4,32	5,76	6,33	7,46
Densité sèche	γ_d (T/m ³)	2,203	2,326	2,315	2,130

Tableau IV.4 : Résultats essai Proctor (15% ciment)

Essai de proctor 15%				
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Eau ajoutée	5%	6%	7%	8%
Masse totale humide	8817	9045	9063	8980
Masse du moule vide	3834	3834	3834	3834
Masse du sol humide.	4983	5211	5229	5146
Masse volumique humide.	2,363	2,471	2,480	2,441
Volume du moule.	2108,5	2108,5	2108,5	2108,5
Masse volumique sèche.	2,254	2,339	2,337	2,274
Teneur en eau moyenne.	4,85	5,65	6,10	7,31

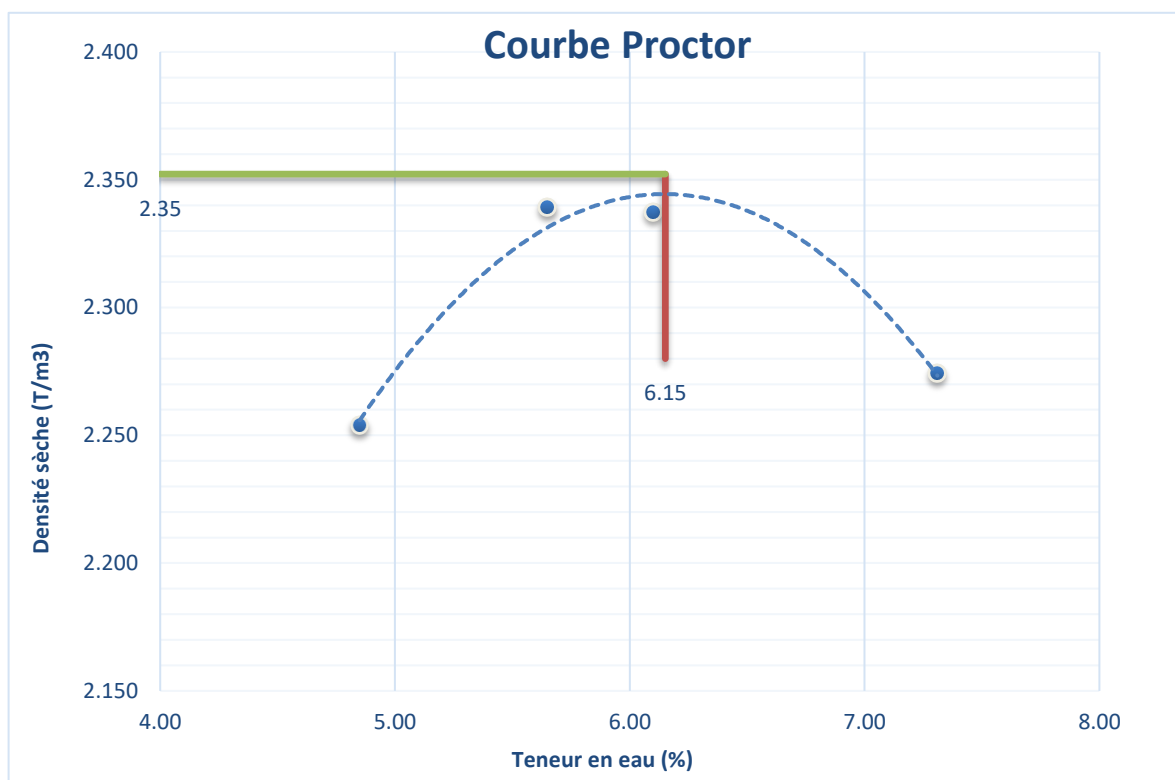


Figure IV.3 : Variation de densité sèche en fonction de teneur en eau (15% ciment).

Tableau IV.5 des résultats des mesures.

Tableau des résultats des mesures					
Teneur en eau	W%	4,85	5,65	6,10	7,31
Densité sèche	γ_d (T/m ³)	2,254	2,339	2,337	2,274

Tableau IV.6: Résultats essai Proctor (16% ciment).

Essai proctor 16%				
	point 1	point 2	point 3	point 4
Eau ajoutée	5%	6%	7%	8%
masse totale humide	8720	9010	9020	8730
masse du moule vide	3834	3834	3834	3834
masse du sol humide	4886	5176	5186	4896
masse volumique humide	2,317	2,455	2,460	2,322
volume du moule	2108,5	2108,5	2108,5	2108,5
masse volumique sèche	2,226	2,329	2,307	2,162
Teneur en Eau moyenne	4,10	5,42	6,63	7,38

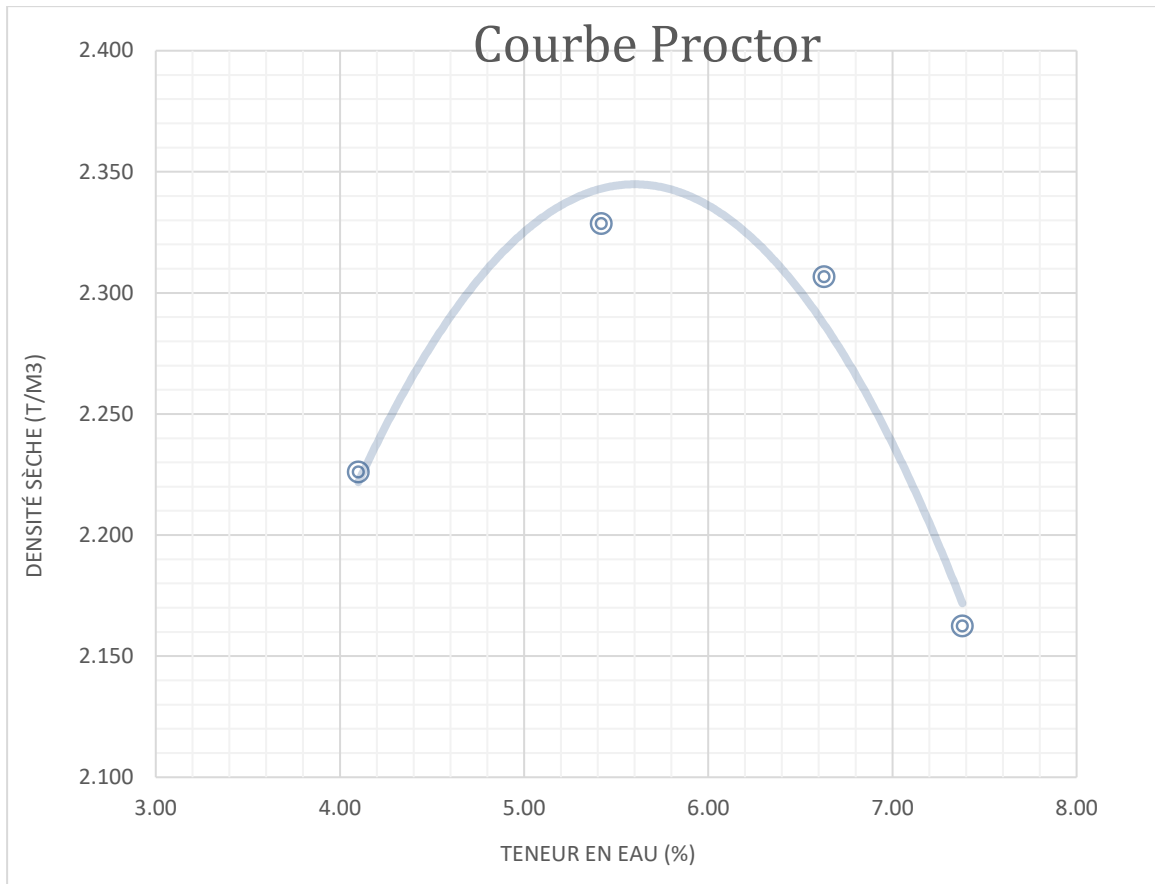


Figure IV.4 : Variation de densité sèche en fonction de teneur en eau (16% ciment)

Tableau IV.7 des résultats des mesures

<i>Tableau des résultats des mesures</i>					
Teneur en eau	W%	4,10	5,42	6,63	7,38
Densité sèche	γ_d (T/m ³)	2,226	2,329	2,307	2,162

IV.4 Formulation finale et Préparation des mélanges :

La méthode de compacité a été appliquée afin de réduire la porosité du matériau, ce qui a pour effet d'augmenter sa compacité. Cette augmentation de la compacité entraîne une densité plus élevée et, par conséquent, une résistance mécanique accrue.

Dans notre étude, on a utilisé le Constituant suivant (Ciment 52.5, Sable, Gravier 3/8, Gravier 8/15). Chaque type de constituant est montré dans le tableau suivant Tableau IV.8

Tableau IV.8. Les différentes proportions de mélange

CONSTITUANT (kg/m3)						
	Ciment	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Eau	fs
BCRHP 0%	418,14	1438,2	825	524,4	197,15	0
BCRHP 5%	397,233	1438,2	825	524,4	197,15	20,907
BCRHP 10%	376,326	1438,2	825	524,4	197,15	41,814
BCRHP 15%	355,419	1438,2	825	524,4	197,15	62,721

IV.4.1 Malaxage de mélange :

Dans le cadre de la préparation du BCRHP, la procédure de malaxage requiert une série d'étapes précises afin d'assurer l'homogénéité et la qualité du mélange final. Conformément aux directives énoncées, après l'assemblage initial des ingrédients, il est impératif de procéder à un premier malaxage pendant deux minutes, sans l'ajout d'eau. Cette phase initiale vise probablement à favoriser une distribution uniforme des constituants solides.



Figure IV.5 : malaxage sec des constituants.

Ensuite l'eau est incorporée dans le mélange, et le malaxage est lancé pendant une durée de deux minutes. Cette séquence d'opérations séparées semble être stratégique, probablement pour contrôler de manière optimale l'humidité du mélange et permettre une dispersion uniforme de l'eau parmi les ingrédients solides. En somme, cette méthodologie, détaillée dans le contexte académique, s'inscrit dans une approche rigoureuse de la préparation du BCR, mettant en lumière l'importance de chaque étape pour garantir la qualité et la cohérence du produit final.

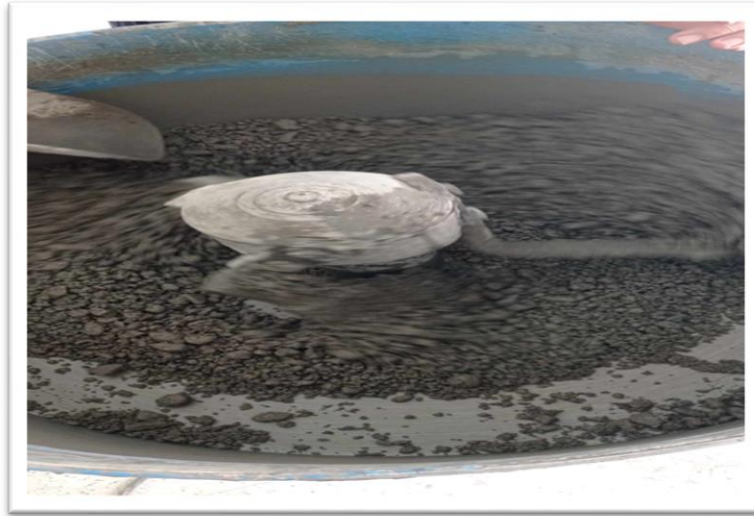


Figure IV.6 : malaxage du mélange du BCR (eau + constituant sec).

IV.4.2 Compactage de mélange :

Les éprouvettes ont été compactées conformément à la procédure établie. Par le marteau piqueur. Le béton frais est disposé dans l'éprouvette par deux couches . Dans la première couche, le béton est placé puis compacté pendant 20 secondes. Ensuite, en ajoute successivement une deuxième couche de béton et compacté cette dernière de la même façon que la première couche.



Figure IV.7 : a. Marteau piqueur utilisé pour le compactage ; b. compactage de l'éprouvette.

IV .4.1 Confections des éprouvettes

On a utilisé des éprouvettes cubiques $10*10*10$ pour la réalisation des essais de compression , et des éprouvettes pour $7*7*28$ pour les essais de flexion et retrait (voir figure IV.8 et IV.9)



Figure IV.8 : éprouvettes ($10*10*10$) réalise pour l'essai de compression.



Figure IV.9 :éprouvettes ($7*7*28$) réalise pour l'essai de flexion et retrait.

IV.5. Résultat et discussion :

IV.5.1 Résultats de la résistance à la compression :

La figure IV 10 montre les résultats de la résistance à la compression obtenue dans notre étude.

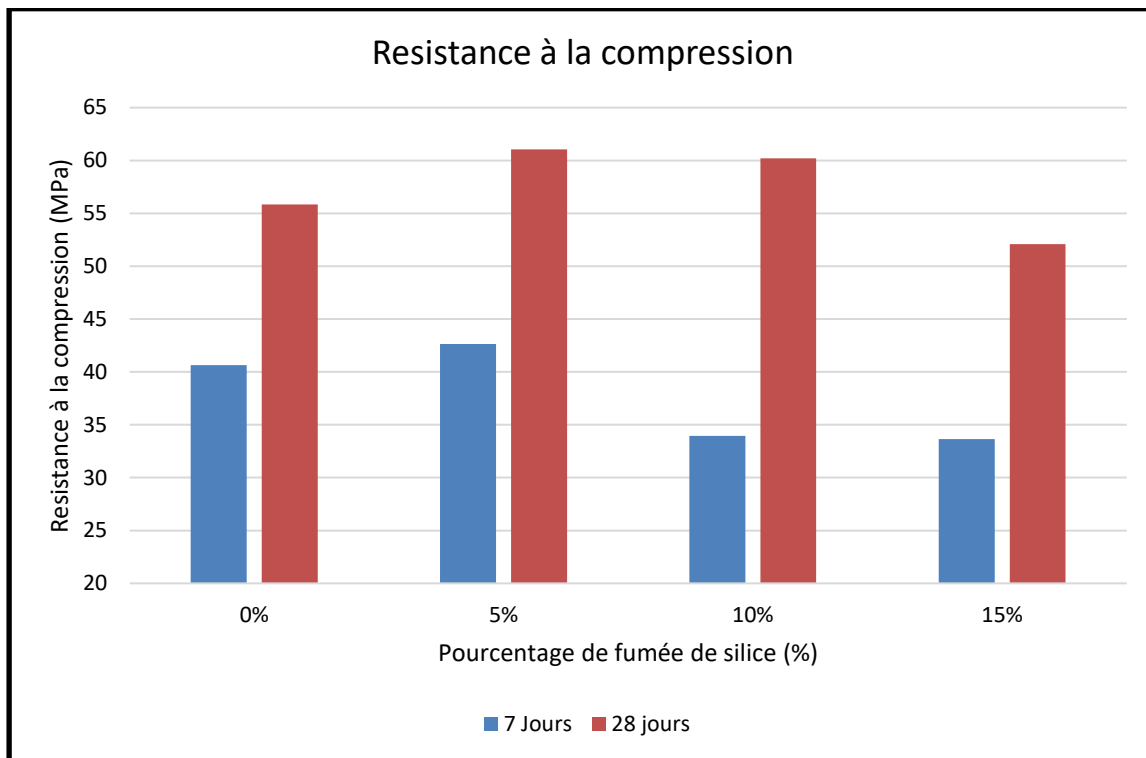


Figure IV.10: résistance à la compression des mélanges de BCRHP

On peut remarquer d'après la figure IV.10 que la résistance à la compression des mélanges contenant 5% et 10% de fumée de silice présente une meilleure résistance par rapport au mélange témoin (0%). On constate aussi que la résistance à la compression du mélange contenant 15% de fumée de silice a légèrement diminué par rapport aux autres mélanges. On peut aussi noter que la cinétique du développement de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours augmente proportionnellement par rapport à l'ajout de la fumée de silice.



Figure IV.11 : Encrassement des éprouvettes de compression

IV.5.2. Résultats de la résistance à la flexion :

La figure IV.12 montre les résultats de la résistance à la flexion obtenue lors de notre investigation.

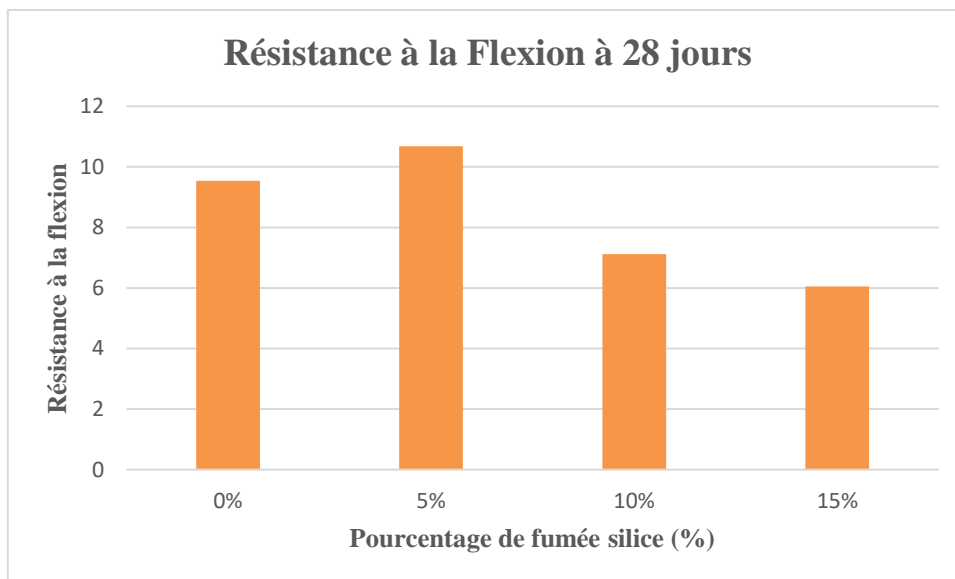


Figure IV.12 résistances à la flexion des mélanges de BCRHP

On peut noter d'après les résultats obtenus ci-dessus que le mélange contenant 5% de fumée de silice présente la meilleure résistance à la flexion par rapport aux autres mélanges. On remarque que la résistance à la flexion diminue chaque fois que le dosage de fumée silice augmente.

On constate que les résistances à la flexion obtenue sont assez bonnes par rapport aux résultats obtenus pour des BCR compactés d'une manière traditionnelle (table vibrante) et sans ajout de fumée de silice.

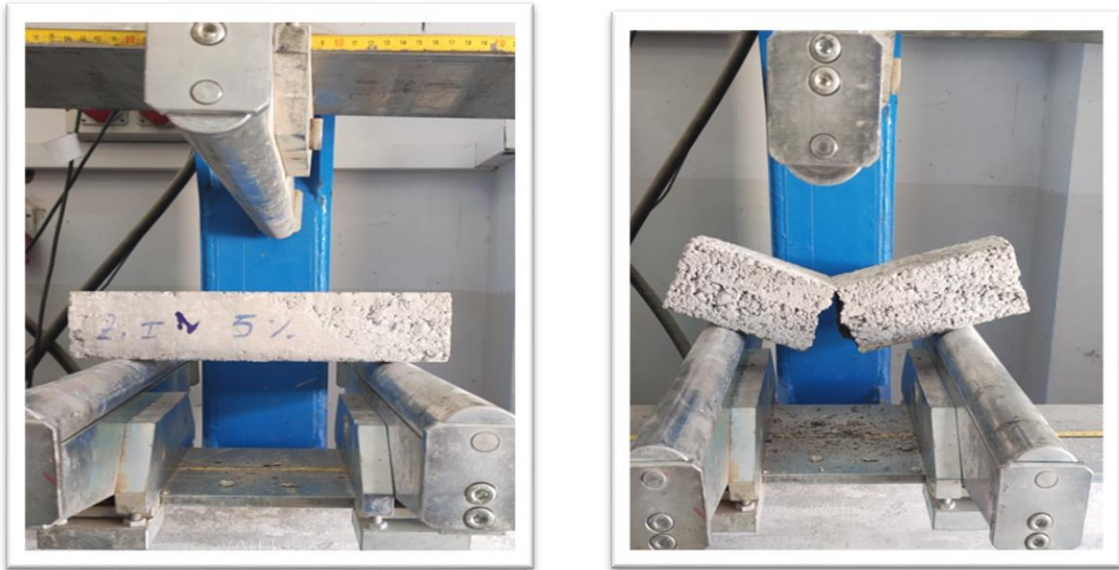


Figure IV.13 : Encrassement des éprouvettes de flexion

IV.5.3 Retrait :

La figure IV.14 montre les résultats du retrait des différents mélanges de BCR.

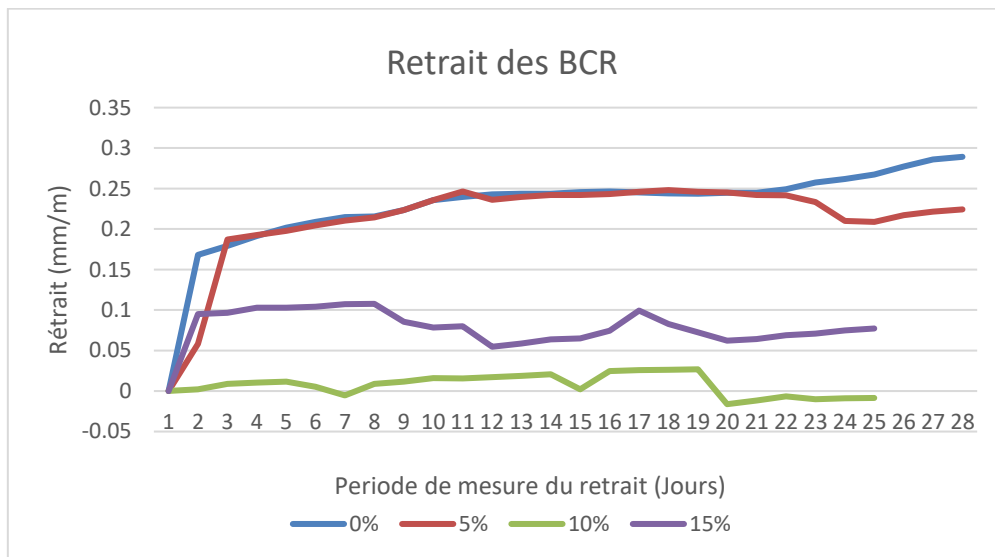


Figure IV.14 ; Retrait des BCR

On peut voir clairement, d'après les résultats de la figure IV.12 que le retrait des BCR contenant 0% et 5% de fumée de silice présente un retrait conséquent par rapport aux mélanges contenant 10% et 15%. On peut aussi constater que le retrait du mélange contenant 10% est presque nul. En effet, plusieurs chercheurs tels que Naik et al [54] . ont constaté que l'ajout de la fumée de silice diminue le retrait des bétons. On constate aussi que le retrait augmente légèrement pour

le mélange contenant 15% par rapport au mélange 10%. Cela peut être dû au dosage élevé de fumée de silice qui joue un rôle néfaste dans le béton.



Figure IV.15 : Despositife de Retriat

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le béton compacté au rouleau représente de nos jours une technique très appréciée par les entrepreneurs et les décideurs. En effet, ces nombreux avantages font de lui un matériau très durable et très facile à mettre en place. Sa confection et sa mise en place sont très faciles et très rapides. Cependant, et dans le but d'obtenir un meilleur matériau, plusieurs chercheurs ont mené des travaux pour confectionner un BCR plus résistant et plus durable.

Le but de la présente étude est de confectionner un béton compacté au rouleau à haute performance, également connu sous l'acronyme BCRHP. Pour cela, on a confectionné un béton compacté au rouleau avec différent pourcentage de fumée de silice pour voir la possibilité d'attendre des performances mécaniques plus élevée.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer plusieurs conclusions telles que :

- La résistance à la compression a connu une hausse de 10% pour le mélange contenant 5% de fumée de silice par rapport au mélange témoin. Cette augmentation peut être expliquée par l'effet physique que joue la fumée de silice dans le béton (remplissage des vides).
- Pour le mélange contenant 15%, une diminution remarquable a été constatée. Cela peut être expliqué par le pouvoir absorbant de la fumée de silice. En effet, la fumée de silice a pour caractéristique de consommé énormément d'eau causée principalement par sa grande finesse.
- Pour la résistance à la flexion, on remarque que la tendance de la résistance à la compression est respectée. En effet, le mélange contenant 5% présente la meilleure résistance par rapport aux autres mélanges.

□ Pour le retrait, on a remarqué une nette diminution pour les mélanges contenant de la fumée de silice. En effet, plus le pourcentage de la fumée de silice augmente plus le retrait diminue. Cette diminution peut être expliquée par la présence de la fumée de silice qui a permis de raffiner la porosité capillaire et de rendre, ainsi, le matériau moins sensible au séchage et diminuer son retrait. C'est le cas des bétons à haute performance. **OLIVER, LAURENCE.**[55]

Les résultats obtenus ci-dessus montrent une nette amélioration des caractéristiques physique et mécanique des BCR contenant de la fumée de silice. Cette amélioration peut être expliquée par le changement de la structure interne des bétons (plus dense) causé par l'ajout de la fumée de silice. Cependant, et a des taux plus élevés, cet ajout présente des résultats moins satisfaisants

par rapport au mélange témoin causé par le caractère absorbant de la fumée de silice. Pour conclure, on peut affirmer que le mélange contenant 5% et 10% de fumée de silice sont les plus appropriés pour obtenir de meilleure performance suivant la destination du béton.



Référence bibliographique

- [1] HADRI Samia 2012, « Le passage d'un Béton à Haute Performance à un Béton Autoplaçant haute Performance » à l'Université de Guelma
- [2] BOUGUERRA Rafik & KASRI Mounir 2016/2017 « Performances d'un béton compacté au rouleau (BCR) dans un climat chaud » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [3] Mustapha ZDIRI 2008 « Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux » L'Université d'Artois (France)
- [4] : <https://www.alamyimages.fr/photo-image-piste-de-l-aeroport-de-beton-abandonnees-et-l-aerodrome-les-jacheres-127016426.html>
- [5]: <https://www.xplog.fr/transport-routier/parc-a-conteneurs/>
- [6] M. ZDIRI, M. ben ouezdou, j. neji - le BCR a faible dosage en ciment, une solution pour le renforcement des voies fortement sollicitées. Cas des matériaux de gisements locaux. Proceeding du congrès international urbistics 2008, urbistics 2008, Hamamet Tunisie, 2008 ,9p.
- [7] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p
- [8] Harrington, D. et al., 2010. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report, National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University
- [9] ACI Comimittee 325, 2001. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R-95 (Reapproved 2001). ACI Materials Journal, (Reapproved).
- [10] Serne, R.A., 1997. Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada. In International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA
- [11] GAGNE, Richard : Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR. CRIB 2004
- [12] GAGNE, Richard: Les bétons compactés au rouleau- principes, application et Nouveau développement BCR, CRIB 2004.

- [13] Harrington, D. et al., 2010. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report, National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University
- [14]: Serne, R.A., 1997. Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada. In International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA
- [15] USACE, 2000. Engineering and Design, Roller Compacted Concrete. Engineer Manual No 1110-2-2006
- [16] Gauthier, P., Marchand, J., 2004. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Assoc. Béton Qué. ABQ Qué. 63–87
- [17] Neville, A., 2000. Propriétés des bétons, Edition Eyrolles
- [18] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- [19] Zdiri, 2008. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux. Thèse en cotutelle entre : L'Université de Tunis El Manar (Tunisie) et L'Université d'Artois (France)
- [20] Madhkhan, M., Azizkhani, R., Torki Harchegani, M.E., 2012. Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. Constr. Build. Mater. 26, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009>
- [21] Vahedifard, F., Nili, M., Meehan, C.L., 2010a. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. Constr. Build. Mater. 24, 2528–2535. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.003>
- [22] Pigeon, M., Marchand, J., 1996. Frost Resistance of roller-compacted concrete. Concr. Int. 18, 22–26
- [23] ACI-325.10R-95, 1995. “State-of-the-art report on rollercompacted concrete pavements.” Manual of concrete practice, ACI manual of concrete practice, ACI, USA, : 32
- [24] Atiş, C.D., Sevim, U.K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O., Tanrikulu, A.H., Ekşi, A., 2004. Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash. Mater. Lett. 58, 1446–1450. & Cao, C., Sun, W., Qin, H., 2000. The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. Cem. Concr. Res. 30, 71–75
- [25] R. Karsten, H. Otmar, revêtements routiers en béton compacté au rouleau : expériences Faites en Allemagne 2006.

- [26] OTSAMA MBA Jean Paul. Contribution à l'étude de l'influence des matériaux fins sur les propriétés rhéologique et mécanique du béton compacté au rouleau pour barrages. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées : Génie civil. SHERBROOKE (Québec), Canada : Université De SHERBROOKE ,1997 ,126.
- [27] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p
- [28] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- [29] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- [30] Gagné, R., 2000. High-performance roller-compacted concrete for pavement-Mixture design, application and durability, in: Int. Symp. Eng. Mater. Sustain. Dev. Okayama, Jpn. pp. 74–88
- [31] Tremblay, S., 1997. Méthodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraîneur D'air Sur La Maniabilité. Université de Laval.
- [32] GUIRAUD, H., PIGEON, M. (1994) Compréhension au gel des bétons compactés au rouleau, Atelier scientifique international sur les bétons compactés au rouleau, Québec, mai, p. 207 - 225.
- [33] ZENAGUI Safia. L'utilisation du BCR pour la conception des petits barrages. Mémoire de projet de fin d'études master : Hydraulique, Tlemcen : Université Abou Bekr BELKAID, 2016,152 p
- [34] MEDDAH Abdelaziz. 07 / 05 / 2015 . Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques . l'Université de M'sila
- [35] 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
- [36] MEDDAH Abdelaziz. 07 / 05 / 2015 . Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques . l'Université de M'sila.
- [37] R. KETTAB. «Elaboration d'un béton a hautes performances».Ecole National Poly technique d'Alger (ENP), 1er Colloque Maghrébin en Génie Civil.

- [38] Aïtcin P.C. «Bétons haute performance» Edition, Eyrolles, Paris, 2001.
- [39]. Grandet.J.P « Durabilité du béton à haute performance, vis-à-vis des attaques chimiques externes » Les bétons à haute performance du matériau à l'ouvrage. pp.223-229, Presse de l'ENPC. Paris 1990
- [40] <http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances>
- [41] Adam M et Neville « Propriétés des bétons ». Edition Eyrolles, Paris, 2000.
- [42] MENNAAI AMOR. « Contribution à l'étude rhéologique d'un béton à haute performance (BHP) local». Mémoire de magistère université de 20 out Skikda, Algérie
- [43] silice, des adjuvants réducteurs d'eau sont indispensables pour faciliter leur dispersion. La quantité d'adjuvants est souvent de l'ordre de 10 litres par mètre cube de béton.
- [44] DUVAL R., KADR E.H I, « Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes », Cement and Concrete Research, Vol. 28n°4, April 1998, pp 533-547.
- [45] Pierre_ Claude Aïtcin (1998) (livre) Université de Sherbrooke, Québec, Canada High Performance Concrete
- [46] H. GAHER. « Analyse de la résistance à la traction indirect et du retrait des bétons à haute performance». Thèse de magister, USTHB, 2004
- [47] Dreux G., « Nouveau guide du béton », E. Eyrolles, Paris, 1998.
- [48] Aïtcin P-C., « Bétons haute performance », édition Eyrolles, 2001, ISBN 2-212-01323-X
- [49] Auperin M., Richard F. et al., « Retrait et fluage des bétons à hautes performances ». Annales.I.T.B.T.P, n° 474, mai 1989.
- [50] Bakker R., « Permeability of blended cement concrete », SP-79, ACI, 1983, Detroit, p.589- 605.
- [51] Le Roy R., « déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Le béton hydraulique, LCPC, Paris, 1982, p. 343
- [52] PIERRE-CLAUDE AITCIN est Professeur à l'Université de
- [53] HADRI Samia . Année 2012. Le passage d'un Béton à Haute Performance à un Béton Autoplaçant haute Performance. l'Université de Guelma
- [54] T.R. Naik, R.N. Kraus, Y.M. Chun, et al., Performance of cementitious materials in concrete with shrinkage-reducing admixtures. In the Eighth CANMET/ACI International

Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, ITALY, 2006, pp. 1–29.

[55] OLIVER, LAURENCE. La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton : Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation, PhD thesis, (2001), University of Laval, Quebec, Canada

