

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique**

Université SAAD DAHLAB -Blida 1-



**Faculté de sciences et technologie Département de Génie Civil
Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 Option :
Matériaux de construction
Thème :**

**Influence de sable de déchet de brique recyclé sur les
propriétés d'étanchéité et thermique des bétons
compactés au rouleau BCR pour barrage**

Présenté par :

Metagulel Souror

Aouanouk Racha

Promoteur : Ahmed Hadj Sadouk

Co-promotrice : Boulghbar Khadidja

Année Universitaire : 2022/2020

Remerciement

*Nous remercions en premier lieu **ALLAH** pour son aide et sa bénédiction à ce projet et pour la force qu'il nous a donné pour le réaliser.*

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur le Professeur **HADJ SADOK Ahmed** de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique ENSH pour avoir pris le soin de diriger cette recherche en nous inculquant ses connaissances et en partageant son expérience avec beaucoup d'humilité.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à Madame **BOULGHBAR KHADIDJA** de l'université de Blida 1 de nous avoir fait part de son savoir et de nous avoir donné l'opportunité de réaliser cette recherche.

On souhaite exprimer mes remerciements à Monsieur et madame les membres de jury pour avoir bien voulu examiner notre travail.

On remercie tous les ingénieurs et techniciens du laboratoire de l'ENSH.

Je souhaite enfin, remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué au bon déroulement de ce travail.

Dédicaces

A la plus chérés au monde ma « Mère »

Symbole de tendresse et mon « Père »

Le plus chère partenaire mon « marie »

A mes yeux mon « fils »

A chère frère.

A tous la famille « AOUANOUK » et « KERKOUD » ainsi que la famille

« HAMMADI »

Et a mon BINOME

A tous mes amis

Racha

➤ **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes, qui sont chères, notamment :

- **Mon cher père**, mon protecteur pour les sacrifices ; l'assurance qu'il me procure
(**Kamel**).
- **Ma chère mère** , la source de mon bonheur mon exemple, pour l'amour qu'elle me porte « **fatima el zohra** » mes deux proches à mon cœur, tante Faiza et grand mère paternel Fatima qui a mon accompagné sur mon chemin.
 - Mes anges « **Djihan, Hiba, et ranime** »
- Ma grand famille, et mes cousine et mes amis proche et bien sur mon binôme
Racha

Résumé

Le béton est un des matériaux les plus utilisés dans la construction. Les granulats représentent 75% du volume de béton. A cet effet il est opportun d'étudier la possibilité de valorisation de déchet de briques issus des briqueteries et chantier de démolition, comme substituant des granulats naturels qui font défaut dans la région, notamment les sables.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier la valorisation des déchets de briques comme sable dans le béton compacté au rouleau « BCR », ainsi que leur effet sa résistance à la compression et sa durabilité.

Dans notre étude expérimentale le BCR formulé avec quatre graviers (3/8, 8/15, 15/25, 15/50), sable naturel, dosage en ciment de 130 kg/m^3 et un rapport E/C de 0.85. Le sable naturel a été substitué par un sable de brique recyclé à des taux de 25, 50, 70 et 100%.

Ainsi, l'effet de substitution sur les propriétés des BCR à l'état frais (temps de VeBe) et durci (Résistance à la compression, porosité, perméabilité et transfère thermique) ont été analysés.

Les résultats de cette étude ont montrés que le sable de brique recyclé, a peu d'effet sur la consistance des BCR et un effet positif sur la résistance de la compression et la perméabilité et ce pour des taux de substitution de jusqu'à 100%. Par contre, l'absorption capillaire ainsi que la porosité ont été affectés négativement. Le coefficient de conductivité thermique a enregistré quant à lui une diminution proportionnelle à l'augmentation du taux de sable de brique.

La présente étude a montré clairement la possibilité d'utiliser le sable de brique recyclé dans un BCR convenablement formulé, avec une amélioration de sa performance mécanique et de durabilité.

Les mots clé : BCR, déchets de brique, résistance a la compression, conductivité thermique.

Abstract:

Concrete is one of the most widely used materials in construction. Aggregates account for 75% of the volume of concrete. To this end, it is appropriate to study the possibility of upgrading brick waste from brickyards and demolition sites, as substitutes for the natural aggregates that are lacking in the region, especially the sands.

The main objective of this research is to study the recovery of brick waste as sand in BCR-compacted concrete, as well as its impact on compressive strength and durability.

In our experimental study the BCR formulated with four gravel (3/8, 8/15, 15/25, 15/50) a natural sand with a cement dosage of 130 kg/m³ and an E/C ratio of 0.85. Natural sand was substituted by recycled brick sand at rates of 25, 50, 70 and 100%.

Thus, the substitution effect on the properties of fresh (VeBe time) and hardened (compressive strength, porosity, permeability and thermal transfer) BCR were analyzed.

The results of this study showed that recycled brick sand has little effect on BCR consistency and a positive effect on compressive strength and permeability for substitution rates of up to 100%. However, capillary absorption and porosity were negatively affected. The coefficient of thermal conductivity was reduced in proportion to the increase in the percentage of brick sand.

This study clearly showed the possibility of using recycled brick sand in a properly formulated BCR, with an improvement in its mechanical performance and durability

Key words :**BCR , brick waste, compressive strength, thermal conductivity**

الملخص:

الخرسانة هي واحدة من المواد الأكثر استخدامًا في البناء. تمثل المجاميع 75٪ من حجم الخرسانة. ولهذه الغاية، من المناسب دراسة إمكانية تحسين نفايات الطوب من أحواض الطوب ومواقع الهدم، كبديل للمجموعات الطبيعية التي الفشل في المنطقة، بما في ذلك الرمال.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة استعادة نفايات الطوب كرمال في الخرسانة المضغوطة BCR ، فضلاً عن تأثيرها على قوة الضغط والمتانة.

في دراستنا التجريبية، صاغ BCR بأربعة حصى (8/3, 15/8, 25/15, 50/15) رملاً طبيعياً بجرعة إسمنت تبلغ 130 كجم/متر مكعب ونسبة E/C من 0.85، تم استبدال الرمال الطبيعية برمال الطوب المعاد تدويرها بمعدلات 25 و 50 و 70 و 100٪.

وبالتالي، تم تحليل تأثير الاستبدال على خصائص وقت VeBe الطازج والمتصلب (قوة الضغط والمسامية والنفاذية والنقل الحراري) BCR.

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن رمال الطوب المعاد تدويرها لها تأثير ضئيل على اتساق BCR وتأثير إيجابي على قوة الضغط ونفاذية معدلات استبدال تصل إلى 100٪. ومع ذلك، تأثر الامتصاص الشعري والمسامية سلباً. تم تخفيض معامل الموصلية الحرارية بما يتناسب مع الزيادة في النسبة المئوية للرمال المبنية من الطوب.

أظهرت هذه الدراسة بوضوح إمكانية استخدام رمال الطوب المعاد تدويرها في BCR مصاغ بشكل صحيح، مع تحسين أدائه الميكانيكي ومتانته.

الكلمات المفتاحية:

نفايات الطوب، خرسانة المدمجة بواسطة الأسطوانة، قوة الإنضغاط، توصيل الحراري.

Liste des figures

Figure I.1 : Comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus en fonction de la tenue en liant	18
Figure I.2 : Mise en place d'un BCR routier ACI cominitée 2001	19
Figure I. 3 : Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).....	19
Figure I. 4 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction.....	20
Figure I. 5 : Barrage du lac Robertson en BCR au Canada.....	22
Figure I. 6 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA.....	23
Figure I.7 : Poudre de ciment courant.....	27
Figure I.8: Développement de la résistance à la compression de béton contenant des ajouts...30	
Figure I.9: Paramètres optimum d'un mortier pour BCR.....	32
Figure I. 10: Fuseaux granulométriques de J. Marchand pour un BCR.....	33
Figure I. 11 :Eau absorbée par unité de surface des mélanges étudiés.....	38
Figure I. 12:Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mélanges étudié.....	38
Figure. II.1.Brique concassé.....	42
Figure II.2: Extraction de l'argile.....	44
Figure II.3: Effet des agrégats de brique sur l'affaissement.....	48
Figure II.4 : Effet des déchets de brique sur le retrait des bétons.....	48
Figure II.5 : Profilés de retrait pour béton contenant déchet de brique.....	49
Figure II.6 : Effet du taux de la poudre de brique sur l'absorption d'eau et la sorptivité.....	50
Figure II.7: Effet de la poudre de brique sur les propriétés mécaniques des mortiers.....	50
Figure .II. 8 : Résistance à la flexion des mortiers étudiés.....	51
Figure III. 1: Sable jeune et sable lavé.....	54
Figure III.2.Sable de brique.....	55
Figure III.3 : Courbe de l'analyse granulométrique des sables.....	56
Figure III.4:l'essai d'analyse granulométrie.....	56
Figure III.5: Essai de la masse volumique apparente.....	57
Figure III.6: Essai de la masse volumique absolue.....	58
Figure III.7: Essai d'équivalent de sable.....	59
Figure III.8: Gravier.....	62
Figure III.9 : La propreté de gravier.....	63
Figure III.10 : Résultats d'analyse granulométrique.....	63

Figure III 11 : Analyse granulométrique de gravier.....	64
Figure III.12 : Masse volumique absolue de gravier.....	65
Figure III.13 : Filler calcaire.....	66
Figure.III.14 : Analyse granulométrique par sédimentation de filler calcaire.....	67
Figure III.15 : Courbe granulométrique par sédimentation de filler de calcaire.....	67
Figure III.16 : Masse volumique absolue.....	68
Figure III.17 : Préparation des moules de mortier normalisé.....	69
Figure III.18 : Mesure de la résistance à la compression.....	69
Figure III.19 : Courbes représentant la granulométrie des mélanges choisis.....	71
Figure III.20 : Compactage.....	72
Figure III.21 :Dispositif de mesure de la compacité.....	73
Figure III.22 : l'essai de compacité.....	73
Figure III.23 : Appareille VEBE.....	75
Figure III.24: La confection de BCR.....	77
Figure III.25 :L'essai d'écrasement.....	78
Figure III.26 : Eprouvette BCR couper.....	79
Figure III. 27: Schéma (a) et vue d'ensemble du dispositif d'essai de L'absorption D'eau par capillarité.....	79
Figure III.28 : L'absorption capillaire.....	80
Figure III.29 : Essais de porosité.....	81
Figure III.30 : Eprouvette surfacée.....	81
Figure III.31 : Essais de conductivité thermique.....	82
Figure III 32: perméabilité a l'eau sous pression.....	83
Figure IV.1.Temps vebe fonction de taux de substitution.....	87
Figure IV.2 : La masse volumique en fonction de taux de substitution.....	88
Figure IV.3 : Résistance a la compression.....	89
Figure IV.4 : Porosité accessible a l'eau à 28 et 90 jours.....	90
Figure IV.5 Absorption capillaire a 28 jours.....	91
Figure IV.6 Absorption capillaire a 90 jours.....	91
Figure IV.7 Sorptivité.....	92
Figure IV.8. Perméabilité d'eau sous pression.....	93
Figure IV.9 : Conductivité thermique à 28 jours.....	95
Figure IV.10. Conductivité thermique a 90 jours.....	95

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage.....	18
Tableau I.2. Les intérêts du BCR.....	25
Tableau II.1 Les composants chimiques de brique terre cuite (rouge).....	42
Tableau III. 1: La masse volumique apparente des sables.....	57
Tableau III.2 : Masse volumique apparente de brique.....	57
Tableau III. 3: La masse volumique Absolue des sables.....	58
Tableau III.4 : Masse volumique Absolue de brique.....	58
Tableau III. 5: Équivalent de sable.....	60
Tableau III.6 :l'absorption de sable corrigée.....	60
Tableau III. 7: l'absorption de sable de brique corrigée.....	61
Tableau III.8 Le module de finesse des sable de brique.....	61
Tableau III.9 : Propreté de gravier.....	63
Tableau III.10 Masse volumique du gravier.....	64
Tableau III .11 Masse volumique absolue.....	64
Tableau III .12: l'absorption de gravier.....	65
Tableau III.13 Masse volumique apparente.....	68
Tableau III.14 : Résultats masse volumique absolue.....	69
Tableau III.15 La résistance a la traction et la compression.....	70
Tableau III. 16: les résultats de la compacité.....	73
Tableau III.17 : Formulation de BCR.....	74
Tableau IV.1.Temps de vebe des mélanges réalisés.....	86
Tableau IV.2 La masse volumique des mélanges réalisés.....	87
Tableau IV.3 : Les résultats de la résistance à la compression.....	88
Tableau IV.4 Les résultats de porosité.....	90
Tableau IV.5 : les résultats de la sorptivité.....	92
Tableau. IV.6 : Les résultats de perméabilité a l'eau sous pression.....	93
Tableau IV.7 Les résultats de conductivité.....	94

Table des matières

Résumé	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction général	16

Chapitre I : Béton compacté au rouleau

I. Introduction.....	17
I.2. Généralité sur le BCR.....	17
I.2.1. Définition.....	17
I.2.2 Historique.....	20
I.2.2.1. Pavage.....	20
I.2.2.2. Barrage.....	21
I.3. Domaine d'utilisation du BCR.....	21
I.3.1. Application du BCR pour les barrages	22
I.3.2.Le BCR en technique routière.....	22
I.4. Avantages et les inconvénients.....	23
I.4.1 Avantages du BCR.....	23
● Rapidité d'exécution.....	24
● Durabilité.....	24
● Faible Entretien.....	24
● Economique.....	24
● Écologique.....	24
I.4.2. Inconvénients.....	24
I.5. Les intérêts du BCR.....	25
I.6. Constituants d'un mélange de BCR.....	25
I.6.1.Le liant.....	26
I.6.2.Les granulats.....	27
I.6.3.Eau.....	28
I.6.4.Adjuvant.....	28
I.6.5.Les fillers.....	29
I.7. Méthodes de formulations.....	31
I.7.1. Méthode de formulation empirique.....	31
I.7.2. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité.....	31

I.7.3. Méthode de formulation selon des principes de géotechnique.....	32
I.7.4.Méthode de formulation semi-empirique.....	33
I.7.5.Méthode théorique	34
I.8. Propriété du BCR.....	35
I.8.1. A l'état frais.....	35
• L'ouvrabilité.....	35
• La masse volumique.....	35
I.8.2. A l'état durci.....	35
• Résistance a la compression.....	36
• Résistance a la flexion.....	36
• Module d'élasticité.....	36
• Retrait.....	36
• Ségrégation.....	37
• Absorption capillaire.....	37
I.9 Conclusion.....	39

Chapitre II : Valorisation De La brique Dans Le Béton

II.1 Introduction.....	41
II.2. La brique.....	41
II.2.1 Définitions.....	41
II.2.2 Principaux constituants de la brique.....	42
II.2.3. Rôles des constituants de la brique.....	43
• L'alumine.....	43
• La silice.....	43
• L'oxyde de fer.....	43
• La chaux.....	43
• Magnésium.....	44
• Matière organique.....	44
II.2.4 Processus de fabrication.....	44
• Extraction de matière première.....	44
• Préparation de l'argile.....	45
•	
Façonnage.....	45
• Séchage.....	45

• Cuisson.....	45
• Emballage.....	45
II.2.5. Propriétés des briques.....	46
II.2.5.1 Porosité.....	46
II.2.5.2 Chaleur massique.....	46
II.2.5.3 Activité pouzzolanique.....	46
II.3 Utilisation des déchets de brique dans le béton.....	46
II.3.1. Définition.....	47
II.3.2. Constitution chimique du déchet.....	47
II.3.3. Travaux de recherches sur la valorisation des poudres de brique.....	47
II.3.3.1 Effet de déchet de brique sur l'ouvrabilité du béton.....	47
II.3.3.2 Le retrait.....	47
II.3.3.3 La porosité.....	47
II.3.3.4 Absorption capillaire.....	49
II.3.3.5 La résistance à la compression.....	50
II.3.3.6 La résistance à la traction.....	51
II.4 Conclusion.....	52

Chapitre III : Matériaux et essais

III.1 Introduction.....	54
III.2 Matériaux.....	54
III.2.1 Sables.....	54
III.2.1.1 Sables naturels.....	54
III.2.1.2 Sable de brique.....	55
III.2.1.2.1 Concassage de brique.....	55
III.2.1.2.2 Tamisage de brique.....	55
III.2.1.3 L'Analyse granulométrique.....	55
III.2.1.4 Masses volumiques.....	55
III.2.1.5 Masse volumique apparente.....	56
• Sable Naturel.....	56
• Sable de brique.....	57
III.2.1.6 Masse volumique Absolue.....	57
III.2.1.7 Equivalant de sable.....	58
III.2.1.7.1 Mode opératoire.....	59

III.2.1.8 Absorption de sable.....	60
III.2.1.9 Module de finesse.....	61
III.2.2 Caractéristique des graviers.....	62
III.2.2.1 Type de graviers.....	62
III.2.2.2 Propreté superficielle des graviers.....	62
III.2.2.2.1 Mode opératoire.....	62
III 2.2.4 Analyse granulométrique par tamisage.....	63
III.2.2.5 Masses volumiques.....	64
III2.2.6 Absorption de gravier.....	64
III.2.3 Fillers de calcaire.....	64
III.2.3.1 L'analyse granulométrique par sédimentation.....	65
III.2.3.2 Mode opératoire.....	67
III.2.3.3 Masse volumique.....	68
III.2.3.3.1 Masse volumique apparente.....	68
III.2.3.3.2 Masse volumique absolue.....	69
III.2.4 Le ciment.....	69
III.2.4.1 La classe vrai du ciment.....	70
III.3. Etude de formulation du BCR.....	70
III.3.1 Optimisation du Mélange granulaire du BCR.....	71
III.3.2 Mesure de la compacité.....	72
III.3.3 Mode Opératoire.....	73
III.3.4 Type et dosage en ciment.....	73
III.3.5 Formulations réalisées.....	74
III.4 Caractérisation du BCR a l'état frais.....	74
III.4.1 L'essai de VEBE	76
III.4.2 Procédure de l'essai.....	77
III.4.3 Mise en place des éprouvettes.....	78
III.5 Caractérisation du BCR a l'état durci.....	78
III.5.1 Résistance a la compression.....	78
III.5.2 Absorption capillaire.....	79
III.5.2.1 Conduite de l'essai.....	80
III.5.2.2 Coefficient d'absorption.....	80
III.5.3 Porosité accessible à l'eau.....	81
III.5.4 Conductivité thermique.....	81

III.5.4.1 Préparation des éprouvettes.....	81
III.5.4.2 Mesure de la conductivité thermique.....	81
III.5.5 Perméabilité a l'eau sous pression.....	82
III.5.5.2 Principe.....	82
III.5.5.3 Mode opératoire.....	82

Chapitre IV. Résultats et interprétation :

IV .1. Introduction.....	86
IV .2. Résultats	86
IV.2.1 A l'état frais	86
IV.2.1.1 Temps de VEBE.....	86
IV.2.1.2 Masse volumique théorique.	86
IV.2.2. L'état durcis	87
IV.2.2.1. La résistance a la compression	88
IV.2.2.2 Porosité accessible à l'eau.....	90
IV.2.2.3. Absorption capillaire.....	91
IV.2.2.4 Perméabilité d'eau sous pression.....	93
IV.2.2.5 Conductivité thermique	94
IV.3 Conclusion	96
Conclusion générale	98
Référence et bibliographie	99

Introduction

Général

Introduction générale :

La forte propagation accumulation des déchets de construction et de démolition, l'épuisement des ressources naturelles ainsi que l'aspect polluant de consommation d'énergie affectent considérablement l'environnement et le coût du stockage. Tous ces fléaux font l'objet d'une préoccupation de premier plan pour notre société, car ils constituent une réelle menace pour notre vie quotidienne. Dans cette optique, l'industrie du béton propose des solutions dans son processus de développement afin de résoudre ces problèmes conséquents. En effet, depuis plusieurs années les producteurs au niveau international relèvent le défi en réalisant des progrès remarquables afin de minimiser l'empreinte écologique et de limiter l'appauvrissement en ressources naturelles possiblement non renouvelables en donnant une seconde vie à ces déchets.

Les déchets de brique sont aujourd'hui les déchets de construction les plus abondants. Les briques sont des matériaux qui représentent seulement une partie des déchets récupérés par les centres des briquèteries. Elles peuvent être réintroduites directement dans une nouvelle construction si leurs conformités dépendent aux prescriptions techniques spécifiques. Mais les briques qui sont en mauvais état sont généralement stockées ou utilisées sous forme de sables ou granulats pour des remblais dans le domaine des infrastructures routières. Cette réutilisation comme matériau de remplissage reste toutefois une valorisation à faible valeur ajoutée. Une approche à plus valeur ajoutée serait d'introduire ces déchets en tant qu'agrégats dans le béton. Dans ce contexte, notre projet a pour objectif principal d'étaler l'éventualité d'utiliser des déchets de briques dans la composition des bétons compactés au rouleau « BCR » employés dans la construction des barrages.

Notre travail est composé en quatre chapitres, le premier chapitre contient un aperçu bibliographique décrivant l'état de l'art. Cette partie comporte un historique sur le BCR, ses avantages et inconvénients, ses constituants, méthodes de formulations ainsi que ses propriétés à l'état frais et durci. Le deuxième chapitre concerne exclusivement la brique et sa composition, sa structure interne, son processus de fabrication, ses propriétés physiques et chimiques et pour finir l'influence de l'utilisation des déchets de brique sur les propriétés du béton basé sur des recherches antérieures. Le troisième chapitre présente le programme expérimental et la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation de BCR. Le quatrième et dernier chapitre donne les résultats de l'étude expérimentale et montre les effets de l'incorporation des déchets de brique recyclés sur les différentes propriétés du BCR étudiées. Enfin le travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre I :

**Béton compacté
au rouleau**

I. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons une généralité sur le béton compacté au rouleau (BCR), et leurs constituants ainsi que la formulation de ce type de béton, en expliquant les propriétés à l'état frais et l'état durci.

I.2. Généralité sur le BCR :

I.2.1. Définition :

L'expression « Béton Compacté au Rouleau » et le signe correspondant « B.C.R. » se sont imposés dans la langue française pour désigner un ensemble de produits ou de techniques désignés par des expressions variées dans la littérature anglaise : « Rolled concrete in dam » (R.C.D.), utilisé par les Japonais, « Dry lean concrete » (D.L.C.), « Roller compacted concrete » (R.C.C.), utilisés par les auteurs de langue anglaise avec des significations parfois divergentes.

On appelle béton compacté au rouleau, un béton raide non armé avec un affaissement nul, et faible quantité de ciment entre ($60/300\text{kg/m}^3$) [1], par rapport au béton ordinaire, sa mise en place nécessite un compactage extrême et matériel spéciale comme les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les plaques vibrantes, les bulldozer, pour être bien consolidé. Ce type de béton doit être composé d'un mélange de ciment, des granulats, d'eau, d'adjuvant.

La figure I. 1 présente une comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus en fonction de la teneur en liant, le BCR contient une quantité de liant inférieure par rapport à un béton ordinaire et une quantité plus grande que celle utilisée dans la technique du gravier traité, qui nécessite généralement une quantité de ciment de l'ordre de 4-5 % de la masse totale des granulats [1]. La composition de BCR génère généralement un mélange ferme, ce qui rend l'opération de serrage du squelette granulaire par vibration insuffisante. Cette phase est souvent réalisée par l'apport d'une énergie de compactage à l'aide des rouleaux compacteurs.

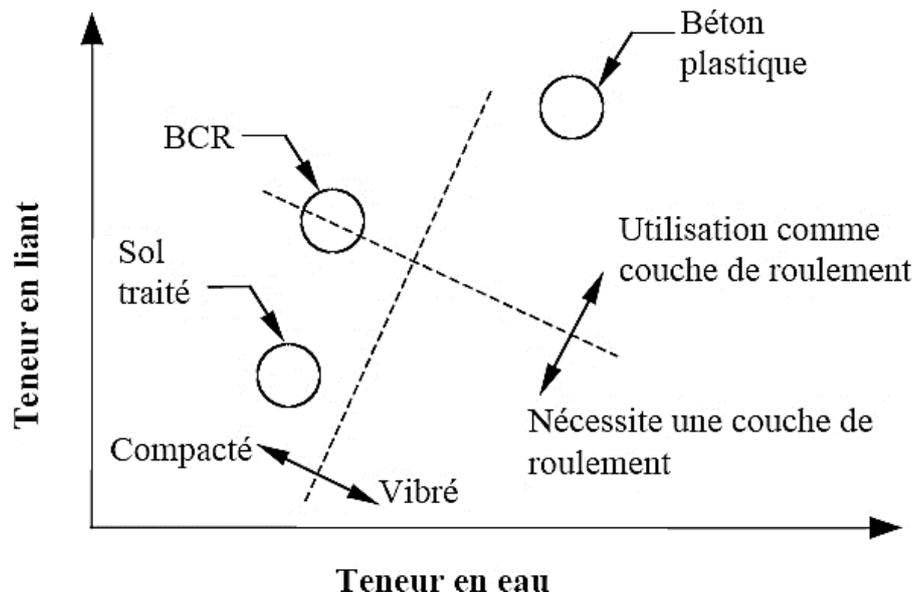


Figure I. 1 : Comparaison entre le BCR et d'autres matériaux connus en fonction de la teneur en liant[2]

Le BCR s'est développé selon deux axes majeurs :

- BCR pour barrages (ouvrages massifs).
- BCR pour routes (pavages).

Le BCR est utilisé principalement pour la construction des chaussées et des barrages (Figures I.2 et I.3 et I.4), sa formulation dépend de la destination du projet. Le tableau I.1 présente une comparaison entre deux mélanges de BCR dont le premier est destiné pour la construction d'un barrage et le second pour un projet routier. Puisque le BCR routier est plus sollicité en service (solllicitations mécaniques et climatiques), il nécessite une résistance mécanique plus élevée ce qui requiert l'utilisation d'une quantité plus grande de liant. En plus, le diamètre maximal de granulats est limité à 20 mm en corps routier, pour éviter le problème de ségrégation.

Tableau I. 1 : Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage. [3]

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
Teneur en liant (kg/m ³)	60-250	200-350
Rapport : eau/liant	0,4-0,8	0,3-0,4
Diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
Résistance à la compression 28 (Mpa)	15	45
Temps VEBE (s)	10-25	30-60



Figure I. 2 : Mise en place d'un BCR routier ACI Comimittee 2001 [4]



Figure I. 3 : Mise en place d'un BCR routier (route HAMMAM DALAA).



Figure I. 4 : Barrage de Koudiat-Acerdoune en Algérie, pendant la construction [5]

I.2.2 Historique :

I.2.2.1. Pavage :

L'utilisation du ciment en construction routière date de 1935 avec le sol ciment ~~thique~~ semblable au BCR, le sol-ciment constituait un mélange granulaire auquel on ajoutait une très faible quantité de ciment. Son but est de faire un remblai qui avait une capacité portante plus élevée qu'un remblai granulaire compacté. Cette technique a été utilisée ~~pour~~ faire le revêtement de voies d'accès et des cours de triage pour des entreposages forestières en Colombie-Britannique [6].

En 1942, l'US Army Corps of Engineers procéda à la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord.

La première application au Canada eut lieu en 1976 avec la mise en place d'une aire d'entreposage de billes de bois de 25000 m² de surface sur l'île Vancouver en Colombie Britannique.

Après 1980, au moins dix autres pays (Allemagne, USA, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon) ont construit chacun plus de 10 000 m² de revêtement en BCR [7].

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

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

En Afrique, le Béton Compacté au Rouleau reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est développée que pour la construction des barrages et son utilisation dans le domaine des routes n'est pas encore répandu [8]

I.2.2.2. Barrage :

Les premières utilisations du BCR sous forme de Bétons très maigres et compactés au Rouleau pour la construction de barrages reviennent à 1960 [9]. Les statistiques de 2001 (Huang 2004) montrent que près de 95 000 km aux USA ont été construits en béton hydraulique

A la fin des années 1960 Hydra Québec propose une nouvelle procédure dans le barrage-poids le parement amont chargé d'assurer l'étanchéité, riche en liant, muni de waterstops et réalisé dans une première phase à l'aide de coffrages glissants, le parement aval constitué par des blocs préfabriqués et un cœur intermédiaire constitué par un béton très pauvre mis en place par couches minces continues sur toute l'étendue du barrage, sans aucune précaution particulière entre couches. La première allusion à l'emploi du rouleau pour compacter le béton de barrage-poids semble avoir été présentée par YEVHEN PATON ingénieur ukrainien au congrès de la C.I.G.B Commission internationale des grands barrages de Montréal en 1970.

PATON se référait à son expérience d'ingénieur routier ayant souvent mis en œuvre, pour réaliser des chaussées, un béton pauvre et sec fortement compacté au rouleau vibrant et acquérant une densité élevée. Fin 1988, une trentaine de barrages de plus de 20 m de hauteur étaient construits en B.C.R. à travers le monde [10]

En Tunisie et en Afrique, le BCR reste, jusqu'à maintenant, une nouvelle technique et il ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages d'Errmil en Tunisie, Koudiat Acerdoune en Algérie et Ain Al Koreima au Maroc, alors que l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée. [11]

I.3. Domaine d'utilisation du BCR :

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

I.3.1. Application du BCR pour les barrages :

Le béton compacté au rouleau est un béton très rapide à mettre en place et à mettre en service, pour cela, son utilisation pour les barrages parés bien utiles, de plus il permet de réaliser des pentes plus fortes par rapport à l'utilisation de terre et de digues de retenue.

Le BCR en corps de barrages à une quantité de liant relativement faible par rapport au béton conventionnel. La dimension maximale des granulats des BCR destinés pour les barrages varie entre 60 à 150 mm. Les Résistances requises pour les projets en BCR en corps de barrages varient entre 7 à 20 Mpa.

Au Canada, par contre, la construction de barrages en BCR est relativement plus développée dont on peut citer le barrage de Manouane. En outre, en Amérique du Nord, le plus grand barrage en BCR se trouve à Olivenhain, Californie (USA). Le plus haut barrage en BCR est le barrage Miel en Colombie de 617 m de hauteur, suivi par le barrage de Biobio au Chili de 503 mètres de hauteur. Tha Dan Canal Dam est le plus grand Barrage en BCR au monde d'une longueur de 2720 mètres et un volume de BCR de 5.470.000 m³. Le barrage de Beni Haroun en Algérie est considéré comme le plus grand barrage en Afrique avec 710 mètres de longueur et 120 mètres de hauteur [12]

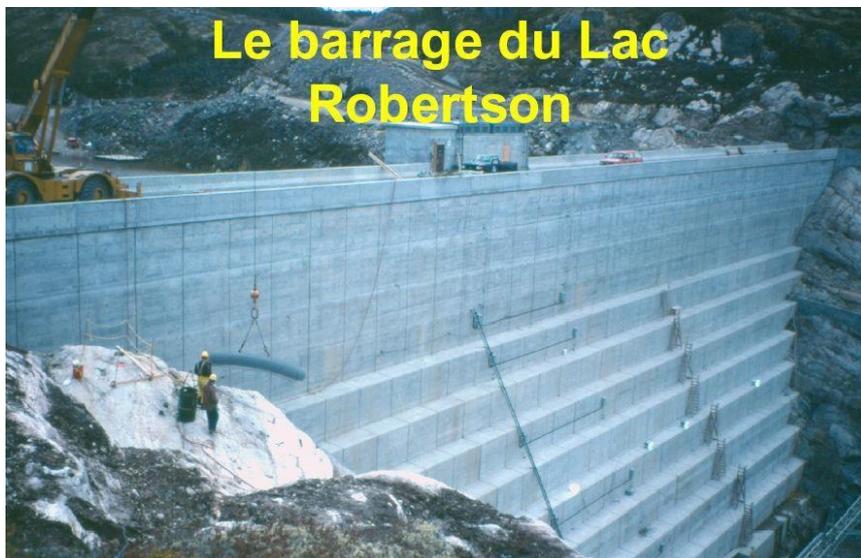


Figure I. 5 : Barrage du lac Robertson en BCR au Canada [12]

I.3.2. Le BCR en technique routière

Le BCR peut également être utilisé comme matériaux routiers. Ce type d'application nécessite une plus grande quantité de ciment et un rapport E/C plus faible que pour un barrage, car les sollicitations tant mécaniques (passage des véhicules) que thermiques (cycles de gel-dégel, présences de sels fondants) y sont plus importantes [3] De plus, la teneur en

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

Du point de vue de durabilité, le revêtement en BCR a montré de bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telles que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes [13]



Figure I. 6 : Mise en place du BCR en pavage – Atlanta USA [12]

I.4. Avantages et les inconvénients :

I.4.1 Avantages du BCR

Les avantages du BCR sont cités dans les points suivants :

- **Rapidité d'exécution**

La rapidité de son application et la grande vitesse de remise en service sont parmi les principaux avantages du béton compacté au rouleau. Grâce à sa maniabilité, et la facilité de sa mise en place. Une voie carrossable construite en BCR peut être ouverte à la circulation 48 à

72 heures suite à son application [14]

- **Durabilité**

Les revêtements en BCR sont robustes et durables. Ils résistent à l'action de très lourdes charges même dans des conditions défavorables. C'est pourquoi ils servent à plusieurs types de revêtements, en raison de son étanchéité, le béton compacté au rouleau résiste aux carburants, aux huiles, aux solvants et à d'autres fluides. Il résiste également aux chaleurs extrêmes de l'été et au froid de l'hiver. Un revêtement en BCR correctement conçu et appliqué aura une longévité incomparable à tout autre produit pour ce type d'application et donnera plusieurs décennies de service [14]

- **Faible Entretien**

Le béton compacté au rouleau requiert peu de réparations au cours de son service. Il ne demande aucun revêtement d'étanchéité et aucun surfacage. Mis à part un nettoyage occasionnel donc les exigences d'entretien du BCR sont minimales [14]

- **Economique**

Le coût de mise en place du béton compacté au rouleau est peu élevé. Comme sa longévité est excellente et qu'il requiert peu d'entretien, le béton compacté au rouleau présente un excellent rapport qualité-prix [14]

- **Écologique**

Les revêtements en BCR sont respectueux de l'environnement. En effet, on peut y incorporer des ajouts cimentaires autres que le ciment Portland comme des cendres volantes moins énergivores. Comparé à l'asphalte, sa couleur plus claire réfléchit mieux la lumière ce qui procure un environnement plus lumineux qui requiert éventuellement moins d'éclairage. Cette couleur plus claire minimise également l'absorption de chaleur et les îlots de chaleur urbains [14]

I.4.2. Inconvénients :

Les inconvénients du BCR sont cités dans les points suivants :

La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être ajustés selon les divers types d'applications ciblées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique. La texture de la surface d'un revêtement est déterminée au moyen de l'essai de tache de sable. Cet essai définit la profondeur moyenne de la macro texture de la surface. Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le tex-uromètres la stéréoscopie.

L'uni d'une chaussée est démontré par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni d'un revêtement en BCR demeure un obstacle qui restreint relativement l'emploi du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est remarquablement influencé par les procédures de construction, les variations du degré de compactage, l'uniformité de la mise en place du finisseur et les opérations de compactage [15]

I.5. Les intérêts du BCR :

Le tableau I.2 donne un récapitulatif des différentes caractéristiques et avantages du BCR ;

Tableau I.2. Les intérêts du BCR [16]

Touts	Consequences
Forte résistance à la flexion	Support de Lourdes charges répétées sans s'affaisser et répartit la charge sur la couche de forme aux endroits celle-ci est moins ferme, ce qui réduit les frais d'entretien
Forte résistance à la compression	Supporte les charges concentrées lourdes et l'impact de matériel minier, industriel et militaire lourd.
Forte résistance au cisaillement	Elimine l'orniérage et les réparations qui s'ensuivent.
Haute densité, Faible absorption	Garantit une excellente durabilité en dépit des gels dégels et élimine les infiltrations à travers lerevêtement.
Faible teneur en eau, Faible rapport E/C	Augmente la résistance, réduit la perméabilité et accroît la durabilité et la résistance aux attaques chimiques.
Empilement solidaire des granulats	Assure une forte résistance au cisaillement au niveau des joints et des fissures désordonnées, ce qui empêche les déplacements verticaux ou les cassures.
Ni armature d'acier, ni goujons	Accélère et simplifie la mise en place, réduit le coût et élimine le besoin de mesures destinées à limiter la corrosion de l'armature d'acier.
Pas coffrages, nifmition	Accélère les travaux, réduit le coût et la main d'œuvre.
Pas joints moulés, ni traits de scie	Accélère les travaux, réduit le coût. (On peut, pour une meilleure apparence, faire des traits de scie dans le revêtement.).
Surface rigide, durable et Claire	Résiste à l'abrasion, élimine la couche de roulement et réduit donc le coût. La clarté de la surface réduit les besoins d'éclairage dans les parcs de stationnement et aires de stockage.

I.6. Constituants d'un mélange de BCR :

La composition du BCR doit faire l'objet d'études au laboratoire portant sur la maniabilité du béton frais et sur la résistance du béton durci. La granulométrie est choisie, après essais au laboratoire, de façon à obtenir un béton compact, résistant et maniable. Généralement, les mélanges de BCR sont fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale comprise entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs. Les granulats représentent un pourcentage approximativement compris entre 75 et 85% du volume total du mélange solide.

I.6.1. Le liant :

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

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

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

Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m³, il faut noter qu'une teneur trop élevée de ciment favorise les fissures, augmente le coût de production et ne permet pas nécessairement une augmentation des performances [17]



Figure I.7 : Poudre de ciment courant [18]

I.6.2. Les granulats :

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

Les granulats peuvent être roulés (sable siliceux) ou concassés (sable calcaire, gravier, grave...). Pour limiter les problèmes de ségrégation et en vue d'une meilleure qualité de surface, la dimension maximale du granulat D doit être inférieure à 20 mm, Le fuseau granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions (exemple : 0/3-3/8-8/16).

Toutes les fractions granulométriques doivent avoir un indice de concassage supérieur à 30% dans le cas d'un trafic trop faible et environ 100% dans le cas d'un trafic élevé.

- Ces granulats ont un indice de plasticité non mesurable et une teneur en matière organique inférieure à 0.2 %. Il faut noter que le choix d'un D élevé a comme avantages :
 - Une économie d'énergie à la préparation des matériaux ;
 - Une résistance mécanique plus élevée à dosage de liant constant ;
 - Une amélioration du transfert de charges aux joints en l'absence de dispositif particulier.
- Quand max granulats fins, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc une bonne compacité à l'état durci. Toutefois, un pourcentage élevé de fines entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place. [19]

I.6.3. Eau :

Le BCR étant un béton sec à affaissement nul. Sa teneur en eau doit donc être faible.

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

Il faut noter qu'un excès d'eau entraîne une instabilité rendant l'uni défectueux tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de prise localisés. [20]

I.6.4. Adjuvant : [21]

Les trois principaux adjuvants actuellement utilisés dans la production des bétons compactés au rouleau sont les retardateurs, les réducteurs d'eau et les entraîneurs d'air (AEA). L'agent réducteur d'eau est principalement utilisé pour obtenir un mélange plus uniforme et faciliter l'installation et le fonctionnement. Les retardateurs de prise permettent notamment de prévenir les risques de condensation prématurée et de formation de joints froids. Concernant les agents entraîneurs d'air, leur utilisation dans ce type de béton pose encore aujourd'hui un gros problème, mais les essais menés par Martin et certains que nous avons menés lors de la phase expérimentale ont montré qu'il est possible de « rajouter de l'air au B CR ».

Anderson pense qu'il semble possible d'incorporer de l'air dans le béton sec, mais en changeant la séquence de malaxage, un réseau suffisant de bulles sphériques peut être produit. Il a suggéré de mélanger d'abord le ciment, l'eau, le sable et les additifs. De plus, l'ajout d'une certaine quantité de super plastifiant permettra d'obtenir une pâte plus homogène et donc une meilleure répartition des pores. [21]

Marchand réussissait à entraîner de l'air dans des bétons compactés au rouleau de Chantier et de laboratoire de rapport eau/liant 0.35 en s'inspirant de ce qu'Anderson préconisait Marchand modifiait la séquence de malaxage en mélangeant tout d'abord le ciment, l'eau. L'adjuvant et la moitié des granulats [22]

Des essais menés récemment à l'Université Laval Marchand et Pigeon, montrent que le type de mélangeur joue un rôle important dans l'incorporation d'air. Un mélangeur dont le mode de fonctionnement consiste à cisailer la matière et à générer un vortex s'est avéré plus efficace pour entraîner l'air qu'un mélangeur qui ne cherche qu'à agiter les divers ingrédients ensemble [23]

I.6.5. Les fillers :

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres Volantes...) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NFP 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bombled IL y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

Les fillers utilisés dans le BCR sont définis comme des matériaux très finement broyés, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Le filler a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. La teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment [24]. Les fillers ont un effet stabilisant dans la pâte de ciment, grâce au meilleur remplissage des vides. L'augmentation de la résistance est généralement parallèle à celle de la densité de tassement. C'est ce que démontre la figure I.1, qui représente l'influence sur la résistance à la compression exercée par l'adjonction de 15 % en masse (par rapport à la teneur en ciment), respectivement de farine de calcaire (surface spécifique 3400 cm²/g), de poudre de quartz (surface spécifique 14500 cm²/g) et de fumée de silice (béton de référence : 360 kg de ciment Portland, facteur (e/c = 0,45). Des deux fillers inertes, c'est la poudre de quartz – plus fine que la farine de calcaire – qui provoque la plus grande augmentation de la résistance ; avec la fumée de silice, l'augmentation de la résistance est due principalement à la réaction pouzzolanique [25]. L'adjonction de fillers n'améliore pas l'étanchéité des bétons [26]. S'ils sont suffisamment fins, les fillers ne nuisent pas à la résistance au gel du béton. Plusieurs paramètres doivent être pris en considération pour déterminer la quantité de fillers à ajouter [27]

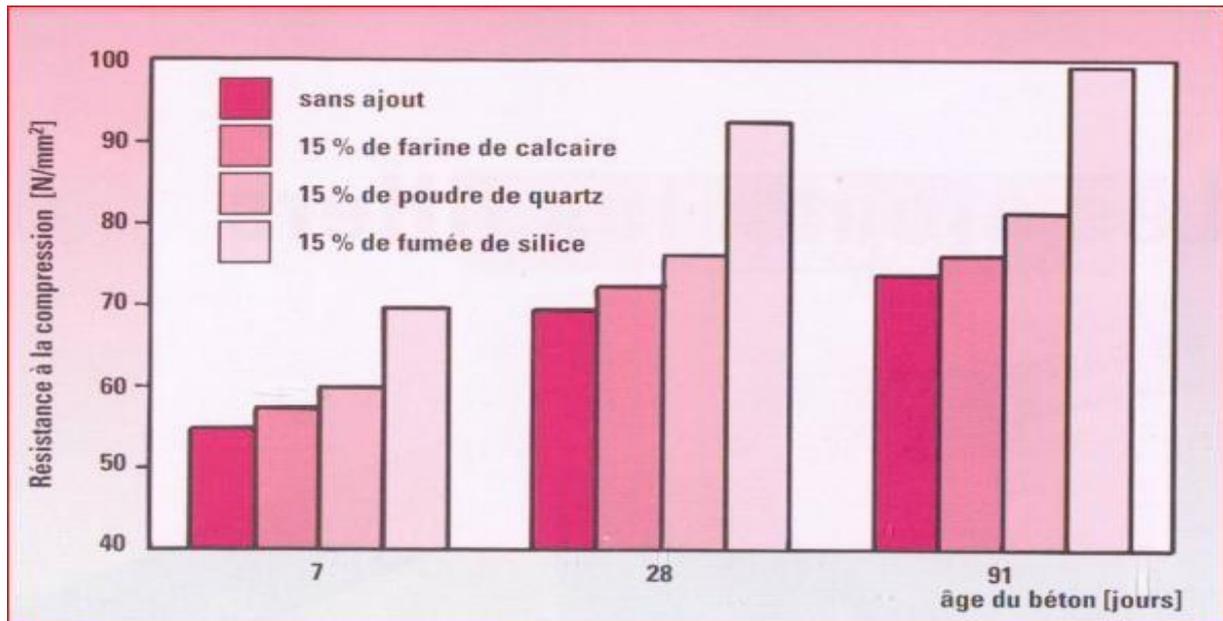


Figure I.8 : Développement de la résistance à la compression de béton contenant des ajouts[27]

D'après Anderson R, Gram H.E, les fines calcaires ont une double action dans le béton. Au jeune âge, elles ont un effet accélérateur de l'hydratation. Les grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates [28]

Farran et d'autres chercheurs ont également signalé qu'il existe un lien étroit entre l'agrégat de calcaire et le coulis de ciment, qui peut être causé par divers mécanismes, notamment une forte adhérence mécanique due à des surfaces de contact rugueuses et à une adhérence inter- agrégats Combinaison physique et chimique [24]

Selon Buil M., Paillere A, les fillers ayant les mêmes propriétés que les granulats contribuent à améliorer l'adhérence des granulats, grâce au rapprochement des caractéristiques de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. Ensuite, une amélioration des propriétés générales du béton ordinaire a été observée. Et ils ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle actif exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment [29]

I.7. Méthodes de formulations :

I.7.1. Méthode de formulation empirique :

D'après le comité ACI [4], les méthodes empiriques sont considérées dans la première catégorie pour réaliser les mélanges BCR. Cette conception est basée généralement sur un grand nombre de gâchés d'essais au laboratoire afin d'atteindre les caractéristiques souhaitées. Calis et Yıldız [30] notent que la réalisation d'autres combinaisons d'essais sur le site est parfois nécessaire pour l'ajustement de la maniabilité [31]. Ce type de formulation reste efficace et simple à utiliser mais nécessite du temps et de l'énergie pour corriger et adopter la formulation recherchée.

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

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

I.7.2. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité :

De son nom, cette méthode de formulation a pour principe d'atteindre une limite de maniabilité en effectuant plusieurs mélanges de BCR. Elle est basée sur trois étapes où les proportions du BCR sont déterminées. La première étape comporte la réalisation de plusieurs gâchées d'essais de mélanges de mortier avec différent rapport eau/ciment et différents rapport sable/ciment pour déterminer le volume de pâte minimum. La masse volumique est mesurée pour chaque mélange. La figure I.2 montre le rapport eau/ciment donné correspondant au rapport sable/ciment qui mène à une masse volumique optimale. La seconde étape consiste à choisir un rapport eau/liant adéquat aux exigences des propriétés mécaniques voulues. Finalement, une phase d'ajustement des proportions de granulats fins et grossiers est effectuée pour obtenir la maniabilité désirée une fois les rapports eau/liant et sable/liant fixé [32]

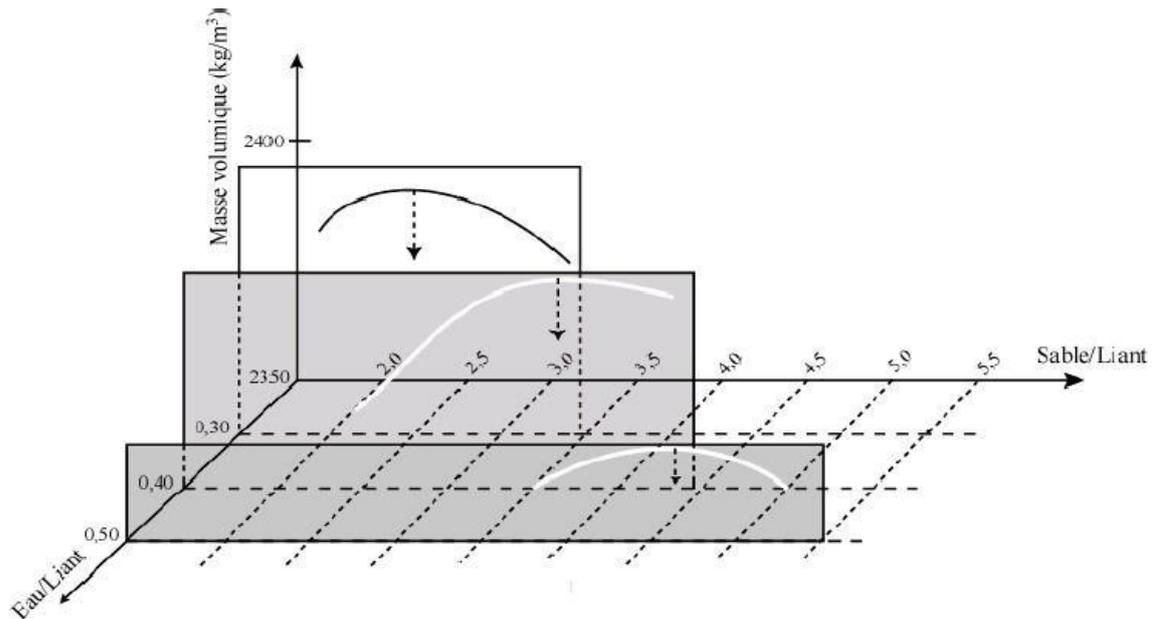


Figure I.9 : Paramètres optimum d'un mortier pour BCR

I.7.3. Méthode de formulation selon des principes de géotechnique :

Suivant J. Marchand Cette méthode suit la relation entre la masse volumique sèche et la teneur en eau du BCR. L'utilisation de cette méthode est plus adéquate dans les cas des granulats de petites dimensions et d'une grande quantité de liant. La première étape consiste à déterminer la proportion de granulat fin par rapport au granulat grossier à l'aide d'un fuseau granulaire présenté dans la figure I.3, En deuxième lieu, plusieurs gâchés de béton avec différentes teneurs en liant sont réalisés. La teneur en liant pour ces gâchés varie entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. L'étape suivante consiste à réaliser, pour chaque teneur en liant, des mélanges avec différente teneur en eau. Par la suite et à l'aide de la méthode D citée par la norme ASTM C1557, on peut déterminer la teneur en eau optimale. Les éprouvettes de BCR sont mises puis compactées dans des moules cylindriques avec une énergie de compactage spécifique. Après la fin du compactage, l'éprouvette est rasée, nettoyée puis mesurée et la masse volumique sèche est calculée. Ainsi, un graphe comportant la masse volumique sèche d'un côté et la teneur en eau de l'autre peut être dressé.

D'après la figure présentée par J. Marchand, on peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau qui permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale. La masse volumique sèche varie considérablement dans l'intervalle de la teneur en eau optimale. Par contre, la masse volumique humide reste insensible dans cette partie de la courbe. La phase

finale de cette méthode consiste à déterminer la quantité de liant nécessaire pour avoir un béton avec des performances données. Cela s'effectue en réalisant différents mélanges avec différentes teneurs en liant et avec une teneur en eau fixée (teneur en eau optimale). Le mélange disposant de la teneur en liant la plus faible et des performances mécaniques requises est choisi [33]

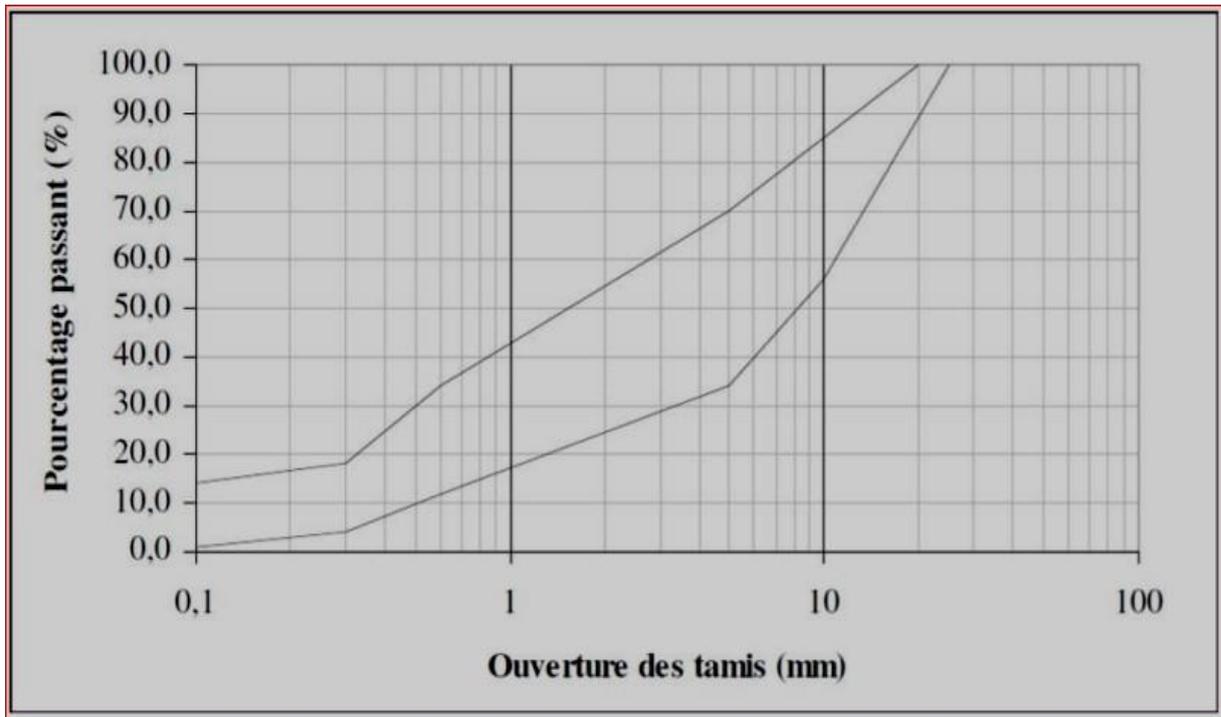


Figure I. 10 : Fuseaux granulométriques de J. Marchand pour un BCR₂ [33]

I.7.4.Méthode de formulation semi-empirique

D'après J. Marchand Cette méthode de formulation exige une approche expérimentale d'une part, et quelques formules empiriques d'autre part. La formulation par volume de pâte optimal est l'une des méthodes semi-empiriques utilisées pour la confection du BCR. Le principe de cette méthode consiste à calculer le volume de pâte par rapport à un volume de vides. Comme il a été mentionné en haut, cette méthode nécessite des mélanges d'essais en laboratoires. La principale hypothèse sur laquelle se base cette méthode est que le BCR nécessiterait d'avoir un volume de pâte pour combler les espaces inter granulaires restant après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale [33]

Suivant GAGNÉ Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire

les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des performances mécaniques. Suivant cette hypothèse, une faible dépense de pâte causera la présence de vide inter granulaire qui va par la suite réduire les performances mécaniques et augmenter sensiblement la perméabilité. D'autre part, une dépense excessive de pâte amplifiera la chaleur d'hydratation et le coût, sans accroître significativement les propriétés physiques ou la diminution de la perméabilité.

La formulation du BCR par cette méthode exige de suivre trois étapes. Premièrement, les proportions des granulats sont déterminées d'une façon à obtenir un mélange granulaire le plus compacte possible. Après le compactage, le volume de vides des granulats est calculé en mètre cube. Deuxièmement, le dosage de la pâte doit être ajusté de manière à avoir une maniabilité donnée. Finalement, le rapport entre l'eau et le liant doit être fixé afin d'obtenir une pâte qui puisse satisfaire les exigences mécaniques. Cette méthode de formulation permet d'obtenir des mélanges de BCR sans une énorme débauche d'énergie par rapport aux méthodes empiriques. Cependant, l'utilisation de cette méthode est impossible dans le cas d'utilisation d'un entraîneur d'air. En effet, la présence de cet adjuvant rend très complexe la prédiction des vides dans le béton [32]

I.7.5. Méthode théorique :

La méthode théorique est très différente des précédentes méthodes de formulation. En effet, elle se distingue par l'absence de gâchés d'essais en laboratoires (expérimentale). Le principe de cette méthode est de minimiser la porosité inter granulaire du béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en Allemagne (LCPC) a développé une méthode théorique appelée le modèle d'empilement compressible pour la confection de différents mélanges tels que le béton ordinaire et le béton à haute performance. Par la suite, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval a développé cette méthode de façon à confectionner le BCR. Plusieurs travaux ont été effectués à l'aide de cette méthode, les résultats obtenus montrent que cette technique donne amplement satisfaction [32]

I.8. Propriété du BCR :

I.8.1. A l'état frais

- **L'ouvrabilité :**

Est un caractère d'une grande ampleur dans les BCR. L'ouvrabilité correspond à l'énergie décompactage requise pour une consolidation adéquate du matériau à l'état frais.

Cette propriété est influencée par de nombreux facteurs

- Le volume et la fluidité de la pâte
- La proportion des fines dans le fuseau granulométrique
- La forme, la texture et l'absorptivité des granulats.

L'ouvrabilité d'un BCR est mesurée à l'aide de **l'essai VEBE** selon les indications de la norme ASTM C 1170, cet essai permet de mesurer la consistance d'un mélange de béton sec . qui se définit comme le temps requis pour définir une masse de béton par vibration dans un moule cylindrique. L'essai se déroule de la façon suivante :une masse de béton placée dans un moule cylindrique avec des dimension normalisé qui est fixée sur une table vibrante .une plaque de plastique dont le diamètre est approximativement de 10mm inférieur au diamètre de moule est place sur la surface du béton ,une surcharge est ajoutée puis béton est vibrée temps VEBE est le temps qui écoule entre le départ de la vibration et la formation d'un anneau de pâte autour de l plaque de plastique .

- **La masse volumique :**

Elle permet de de déterminer le volume d'une masse donnée et sert de moyen de vérification de l'uniformité du BCR .sa connaissance est importante pour un bon compactage du matériau puisqu'elle nous renseigne sur le degré de compactage sur le terrain .elle est déterminée au laboratoire au cours de l'essai Protocor modifié

La densité des granulats et la quantité des vides influent grandement sur La masse volumique. Les BCR contiennent très peu de vide comparé aux bétons Ordinaires mais en revanche, ils ont une quantité considérable des matières solides.

De la sorte, la masse volumique des BCR est légèrement supérieure à celle des Bétons usuels. On peut s'attendre à des masses volumiques supérieures à 2400 kg/m³ pour les BCR [34]

I.8.2. A l'état durci :

- **Résistance à la compression :**

La résistance à la compression est surtout fonction de la quantité des matériaux cimentaires, des propriétés des granulats, des degrés de compaction, et de la teneur en eau. La relation entre la résistance à la compression et le rapport eau / liant d'un béton conventionnel reste varier pour le B.C.R formulé avec un volume de pâte excédant le volume des vides inters granulaires ne sont que partiellement remplis par la pâte.

De plus on sait que le B.C.R est un béton de masse dont la résistance à la compression dépend surtout de sa teneur en matière cimentaire et de son rapport eau /liant [35]

La résistance a la compression dépend aussi du degré de compactage, si il est insuffisant , il engendra des vides entres les granulats , ce qui provoque un diminution de la resistance à la compression ainsi que la qualites des granulats [24]

- **Résistance à la flexion**

D'après Tennis et al. [36] , la résistance à la flexion à une grande importance dans la résistance aux fissures de la fatigue des BCR, cette résistance à la flexion est estimée généralement à partir de la résistance à la compression à l'aide d'une relation empirique, ou mesurée expérimentalement par l'essai de fendage dit essai Brisilien. D'après Ahmed et al. [37], la résistance à la traction est influencée par plusieurs paramètres, les plus importants sont les propriétés minéralogiques des agrégats, les types d'adjuvants, la teneur en humidité de l'éprouvette, les conditions de compactage et de durcissement et l'âge du béton. Chhorn et al [38] notent que la rupture causée par la contrainte de flexion compte tenu des contraintes de traction et de compression représente l'indicateur principale de la résistance à la flexion.

- **Module d'élasticité**

A ce propos, Kalla et al. [39] notent que le module d'élasticité « E » (module de Young) représente la contrainte requise pour produire la déformation unitaire d'un béton, Selon le code IS : 456-2000, le E du béton dépend de sa qualité et de sa résistance caractéristique à la compression. De même, Berga et al. [40] notent que le « E » dépend de l'âge d'essais et qu'il augmente avec l'âge jusqu'à atteindre une valeur maximale. Le rapport Eau/Ciment ainsi que la résistance des granulats influent directement du la valeur de « E ». Pour les mélanges BCR un module « E » faible est recherché pour diminuer le taux de fissuration. Les mélanges BCR pour barrages utilisant des fines naturelles calcaires comme fillers, aboutissent à des valeurs de E très basses.

- **Retrait**

Le retrait dans un béton représente la variation de ses dimensions en absence d'un chargement extérieur. D'après Bissonnette [41] le retrait du béton est due aux phénomènes d'hydratation et de dessiccation. Il existe quatre types de retrait, le premier représente celui sans échange d'humidité, il est expliqué par la diminution du volume du squelette minéral due à la l'hydratation des composés du ciment. Le deuxième type représente le retrait avec échange d'humidité, il coïncide avec celui de séchage et au retrait plastique. Ce type est expliqué par le déplacement de l'eau vers l'extérieur à travers les pores fins et les capillaires. Le troisième type représente le gonflement dans l'eau et le dernier type représente le retrait de carbonatation qui est due à la dissolution de la chaux hydratée par le gaz carbonique. Dans le cas des BCR le retrait de séchage est plus faible par rapport au béton plastique à cause du faible teneur en ciment et du volume important du squelette granulaire compact.

- **Ségrégation**

La ségrégation dans un béton représente la séparation entre ses composants lors de la mise en place, le phénomène de ségrégation influence directement la résistance et l'homogénéité du BCR. À cause de leur faible dosage en eau, le BCR est très assujetti à la ségrégation. Les caractéristiques de la pâte du béton ainsi que la granularité et le diamètre maximal des granulats sont des facteurs qui influencent directement la ségrégation. Des précautions tel que la hauteur et la vitesse de chute doivent être prise en considération lors du chargement et le déchargement dans la mise en œuvre du BCR. L'expérience a montré aussi que l'ajout des matériaux granulaire inférieur au 5mm de diamètre dans les zones ségréguées avant le passage des équipements de compactage, joue un rôle très important pour la réduction de la ségrégation.

- **Absorption capillaire**

Les résultats d'absorptions capillaires faites par DEBOUCHA Walid et d'autres chercheurs indiquent que la plus grande valeur d'absorption d'eau par capillarité de 3.32kg/m² a été observée au mélange du béton témoin. L'incorporation des fillers calcaire diminue l'absorption d'eau par capillarité, en particulier pour le béton avec 5% de substitution où l'absorption capillaire diminue de 18% par rapport au béton témoin comme il est montré dans la figure suivant [42]

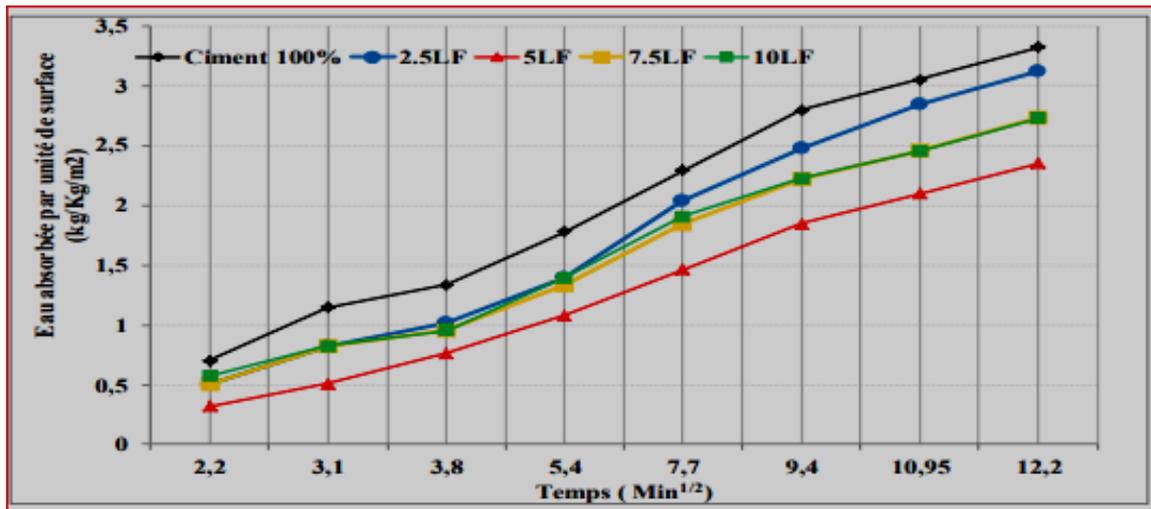


Figure I. 11 :Eau absorbée par unité de surface des mélanges étudiés. [42]

L'évolution du coefficient d'absorption d'eau par capillarité des bétons contenant des quantités différentes des fillers calcaire est présentée dans la Figure I.11, Les résultats de coefficient d'absorption capillaire ont été également fortement influencés par l'ajout de calcaire ; en comparaison avec le béton témoin, le coefficient d'absorption d'eau a été amélioré par l'utilisation de 2.5% et 5% des fillers calcaire en substitution du ciment. Ce qui signifie que les fillers calcaire donnent une très bonne étanchéité, une matrice imperméable et de compacité élevée [42]

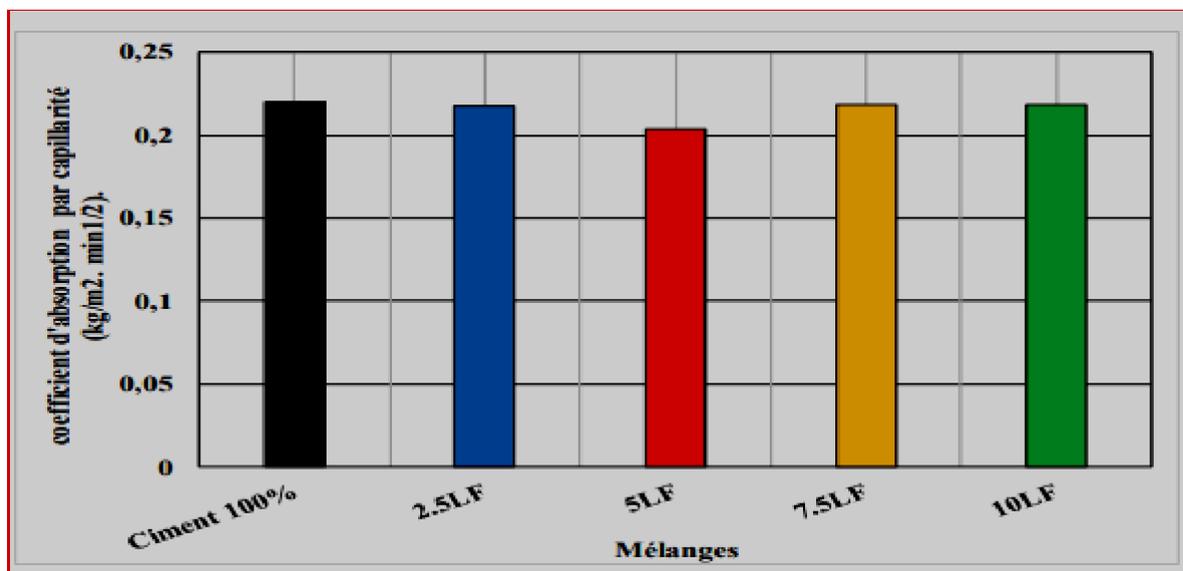


Figure I. 12 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mélanges étudiés [42]

I.9. Conclusion :

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

Chapitre II :
Valorisation De La
brique Dans Le
Béton

II.1 Introduction :

Il existe peu d'informations disponibles sur le devenir des déchets de briques qui constituent la plus grande partie des déchets de démolition et de décombres. D'une part, techniquement, les déchets de briques sont pratiquement recyclés comme composant d'un matériau type maçonnerie. D'autre part, l'absence quasi-totale des textes réglementaires qui régissent la fabrication et l'utilisation des déchets de briques.

La valorisation de la matière est un mode d'exploitation des déchets qui vise à leur mise en valeur afin de les réintroduire dans le circuit économique. Elle couvre le réemploi, la réutilisation, la régénération et le recyclage de la matière. L'industrie de la brique et de la tuile produit un grand nombre de rejets en raison de ces unités qui peuvent être cassées, déformées, ou surcuits. Ce matériau est le plus souvent déversé dans les sites autour des briqueteries. La Allemagne produit chaque année environ 1000 kg de déchets de démolition et de construction par habitant. Cette masse de gravats se compose de 41% de maçonnerie [43]. En Allemagne par exemple 34% de l'ensemble des déchets est issu de la brique, tuile, céramique et béton.

Les travaux de recherche sur l'utilisation des déchets de brique ont été menés depuis 1928 particulièrement entre les années 1940 et 1950 [44]. En Allemagne, après la seconde guerre mondiale, la nécessité d'enlever les décombres, a conduit à la mise en place d'une usine de recyclage de gravats. Il a été rapporté que vers la fin de l'année 1955, environ 11.5 million m³ de déchets de brique ont été utilisés par ces usines de recyclage Allemandes pour la construction de 175.000 logements [45].

II.2. La brique :

II.2.1 Définitions

La brique est un matériau de construction qui est fabriqué en portant une petite quantité d'argile, préalablement mise en forme, à une température appropriée-la température de frittage. Les particules d'argile commencent alors à fondre et s'agglomèrent pour former une masse à caractère pierreux. Après la cuisson, la brique conserve une certaine porosité, qui lui confère d'ailleurs des propriétés spécifiques et la distingue des autres matériaux de construction [46].

Les débris de terre cuite sont, généralement classés parmi les déchets de démolition que ce soit du point de vue recyclage ou réutilisation comme granulats légers. Les débris de briques contenus dans les déchets de démolition, sont désignés sous le nom collectif de « débris de terre cuite » [47]. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les

briques contiennent de selssolubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel [48]



Figure. II.1. Brique concassé.

II.2.2 Principaux constituants de la brique :

La brique est un matériau composé de sol argileux, qui est composée essentiellement des feldspaths, quartz, le carbonate et l'oxyde de fer. Le choix de l'argile est lié aux caractéristiques du matériau avant et après cuisson. L'élasticité de l'argile vous permet de façonner et de mouler différentes formes. Le réarrangement des minéraux lors de la cuisson confère aux briques une remarquable résistance mécanique et thermique.

Tableau II.1 Les composants chimiques de brique terre cuite (rouge) [49]

Natures des elements	Formulations	42olerances (%)
Silice	SiO ₂	35 – 85
Alumine	Al ₂ O ₃	9 – 25
Chaux	CaO	0 – 25
Magnésie	MgO	0 – 5
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 – 5
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3 – 9
Oxyde de titan	TiO ₂	0.3 – 2
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 – 3
Gaz carbonique	CO ₂	0 – 13
Eau de combinaison	H ₂ O	– 11

II.2.3. Rôles des constituants de la brique :

- **L'alumine**

L'alumine est le principal constituant de l'argile. Il agit comme un matériau de cimentation dans la brique brute. Une quantité excessive d'alumine dans l'argile peut provoquer le rétrécissement, la déformation ou la fissuration des briques lors du séchage et de la combustion comme tout autre matériau de cimentation. [50]

- **La silice**

Les briques de bonne qualité contiennent 50 à 60% de silice. Il est présent à la fois sous forme libre et combinée. En libérant du sable, il reste mécaniquement mélangé avec de l'argile sous forme combinée, il réagit avec l'alumine pour former des aluminosilicates. La silice empêche les briques brutes de se fissurer, de rétrécir et de se déformer. Plus la proportion de sable est élevée, plus la brique sera de texture galbée et uniforme. Cependant, un excès de silice détruit la cohésion entre les particules d'argile de brique et rend la brique cassante et faible. La durabilité des briques dépend en grande partie de la proportion appropriée de silice et d'alumine. [50]

- **Oxyde de fer**

Les briques contiennent une petite quantité d'oxyde de fer. L'oxyde de fer agit comme un flux comme la chaux et aide ainsi la silice à fusionner à basse température. Il donne une couleur rouge aux briques lors de la combustion. Le fer augmente également la durabilité et l'imperméabilité des briques [50].

- **La chaux**

Les briques doivent contenir une petite quantité de chaux finement en poudre. Il permet à la silice d'une portion requise de fondre à la température du four de 1650 °C et lie les particules de brique ensemble, ce qui donne des briques solides et durables. A environ 1100 °C, la chaux agit comme un catalyseur pour élever la température du four à 1650 °C à laquelle les fusibles de silice. Cette silice légèrement fondue fonctionne comme un matériau de cimentation solide. Un excès de chaux dans la brique d'argile provoquera la vitrification des briques. Cela fait fondre les briques, car plus que la quantité requise de silice fusionnera. Les briques perdent alors leur forme et se défigurent [50]

- **Magnésium**

Une faible proportion de magnésium diminue le retrait et donne une teinte jaune aux briques. Une quantité excessive provoque la décomposition des briques [50]

- **Matière Organique**

La matière organique dans les briques rend les briques poreuses, ce qui entraîne une faible densité et une diminution de la résistance [50]

II.2.4 Processus de fabrication :

Le processus de fabrication de la brique comprend les différentes étapes suivantes :

- **Extraction de matière première**

La matière première de la brique est l'argile. L'argile est extraite dans des argilières situées en zones d'extraction, l'argile est principalement présente dans le sous-sol et ses propriétés dépendent d'où elle est extraite c'est-à-dire l'origine géologique. Les briqueteries avoisinent de règle générale les argilières. Certaines briqueteries ajoutent des argiles en provenance d'autres argilières dans le but d'enrichir leur gamme de produits [51]



Figure II.2 : Extraction de l'argile [51].

- **Préparation de l'argile**

La préparation comprend deux étapes principales, le Broyage et malaxage. Ces opérations confèrent à la masse d'argile l'homogénéité et la plasticité nécessaires au moulage de la brique. Cette étape a aussi le rôle de minimiser les inclusions solides présentes dans l'argile pouvant influencer négativement la structure du produit. L'argile contient des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini qui peuvent être éliminés que par l'action bactériologique c'est pour cette raison que l'argile est stockée pendant un certain temps dans

un endroit adéquat au développement de ces bactéries d'une part le broyage et malaxage et d'une autre le dosage et le mélange des matières premières. Cette préparation vise l'obtention d'une masse argileuse homogène et plastique qui sera aisément transformée en produit fini [51].

▪ Façonnage

Selon le procédé de fabrication, après obtention de la masse argileuse et plastique que l'on peut façonner Dans la mouleuse à vis cane fin, cette masse est pressée à travers une filière qui lui confère sa forme et sa perforation spécifiques. Un appareil de coupe automatique débite les pièces aux dimensions voulues. [51]

▪ Séchage

Avant l'étape de la cuisson, les briques crues doivent perdre une grande partie de leur teneur en eau. La stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme de la dessiccation. Le séchage s'opère dans des chambres ou des tunnels où il se poursuit de manière régulière et rapide entre deux et quatre jours. La température et le taux d'humidité sont contrôlés tout au long du processus de séchage au moyen d'un système informatique [51]

▪ Cuisson

Le sol argileux pour la production de briques est cuit à haute température. Ces augmentations de température provoquent des déformations au sein de la matrice argileuse. L'argile est affectée à différents niveaux de température [52]

- À 100 °C, déshydratation de la matière première, évaporation de l'eau libre. Perte de l'eau colloïdale.
- À 200-250 °C, déshydratation, perte de l'eau interstitielle c'est-à-dire entre les feuillets.
- De 250-500/800 °C, changement de la structure argileuse, modification du réseau cristallin.
- Au-delà de 800 °C, en fonction des groupes argileux, amorphisation et vitrification d'une partie du minéral.

La cuisson de l'argile provoque des changements importants dans la structure de mélange au fer à mesure que la température augmente.

▪ Emballage

Lorsque la cuisson est achevée les briques de terre cuite sont à présent disposées à être transportées et livrées sur chantier [51]

II.2.5. Propriétés des briques :

II.2.5.1 Porosité :

Une brique présentant une porosité élevée varie entre 20 à 50% qui pourra absorber davantage [55]

II.2.5.2 Chaleur massique :

La chaleur massique des briques est comprise entre 0,84 et 0,92 kJ/kg.K. Cette valeur affecte l'inertie thermique c'est-à-dire les murs en briques se réchauffent lentement et ne libèrent la chaleur que plus tard, lorsqu'il fait plus froid [56].

II.2.5.3 Activité pouzzolanique :

Une pouzzolane est définie comme des matériaux siliceux ou silico alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes, mais qui sous forme finement divisée et en présence d'humidités, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liants [53].

Les briques peuvent aussi être caractérisées par leur quantités d'oxyde (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO_2) supérieur à 70 %, qui les inclut dans les pouzzolanes et en partie dans les verres en fonction de la quantité de phase amorphe.

Un matériau pouzzolanique en présence d'eau, se combine avec la chaux pour former des hydrates type C-S H pouzzolanique qui contribue aux performances et à la durabilité des liants réalisés. Les C-S-H produit par l'hydratation du ciment par le rapport Ca/Si plus faible cette propriété est essentielle à déterminer pour envisager l'utilisation des fines de brique sous forme de substitut dans les mélanges hydrauliques [54].

II.3 Utilisation des déchets de brique dans le béton :

II.3.1. Définition

Les déchets peuvent être abordés de manière différente en fonction de leurs propriétés. Leur classification peut notamment se faire en fonction de leur état physique (solide, liquide, gazeux), de leur provenance (déchets ménagers, déchets industriels, déchets agricoles), de leur traitement (primaires, secondaires, ultimes) ou encore de leur dangerosité (déchets inertes, déchets banals, déchets spéciaux).

La variété de ces propriétés et des points de vue que l'on peut adopter lorsque l'on s'intéresse aux déchets amène la plupart des auteurs à dire qu'il n'existe pas de définition satisfaisante du déchet. Cette définition est différente en fonction du point de vue réglementaire, environnemental, économique ou encore fonctionnel.

II.3.2. Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [57]

II.3.3. Travaux de recherches sur la valorisation des poudres de brique :

La possibilité de valorisation des déchets de brique dans l'industrie du ciment est étudiée par José Marcos Ortéga et al [58], dont l'objectif de son travail de recherche est d'analyser l'influence à long terme (jusqu'à 400 jours) des déchets de poudre de brique sur la microstructure, la durabilité et les propriétés mécaniques des mortiers incorporer jusqu'à 20% de poudre de brique en remplacement du clinker. Selon les résultats obtenus, les mortiers avec 10% et 20% de poudre de brique, ont montré de bonnes propriétés mécaniques à long terme, même meilleures que celles élaborée avec du ciment Portland ordinaire [58]

II.3.3.1 Effet de déchet de brique sur l'ouvrabilité du béton

Étude de Khatib. S. montre que la maniabilité des matériaux en utilisant des granulats de brique est significativement réduite à un taux de substitution de 25 % ou plus, contrairement aux mélanges de granulats naturels, qui augmentent légèrement la maniabilité. Par conséquent, il est nécessaire de réévaluer la quantité totale d'eau pour un fonctionnement correct et une hydratation optimale du mélange de granulats de briques pour obtenir une quantité efficace d'eau suffisante [59]

Il a été confirmé par P. B. Cachim que les formulations substituées par des granulats de brique montrent une diminution de l'ouvrabilité et de la densité des mélanges [60]. Résultats illustrés la figure II.3.

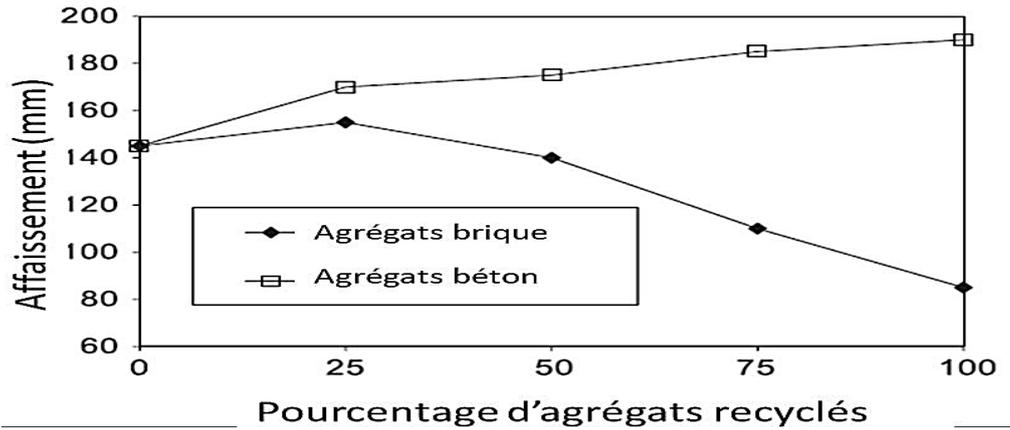


Figure II.3 : Effet des agrégats de brique sur l'affaissement [53].

Adèle Grellier a annoncé que la pulvérisation des briques va modifier le comportement des mélanges hydrauliques en fonction de la granulométrie et de la quantité de fines valorisées. La maniabilité du matériau dépend de la granulométrie des fines utilisées

II.3.3.2 Le retrait

Bektas et al. [61] ont constaté que la substitution à 10% de sable de brique donne la plus grande contraction, par contre à 20% de substitution, la plus petite valeur de retrait a été observée avec un faible écart.

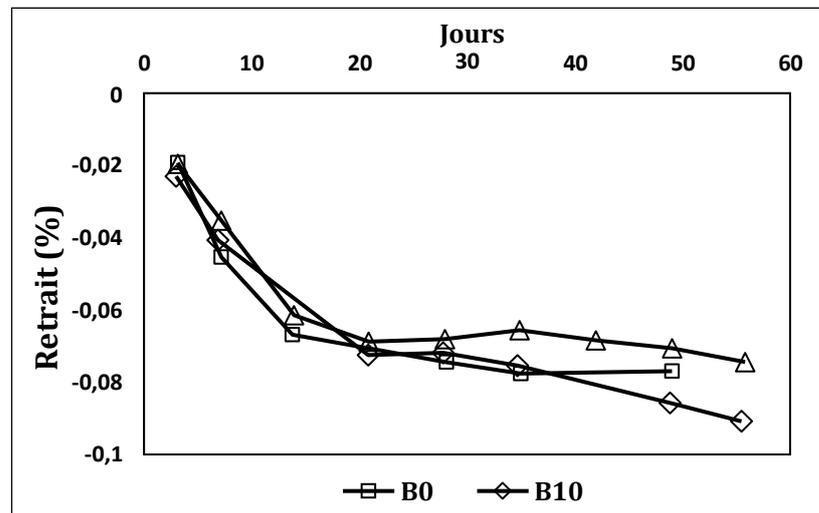


Figure II.4 : Effet des déchets de brique sur le retrait des bétons [61]

Khatib [62] a observé que plus le taux de remplacement de sable par les déchets de briques est élevé, plus le retrait est faible. Cela s'explique par la réaction pouzzolanique qui absorbe l'eau. Les particules de brique retiennent plus longtemps l'eau initialement

absorbée par le mélange dans les pores de la brique, retardant ainsi l'hydratation et le retrait de séchage dû à la présence d'humidité interne (Figure II.5).

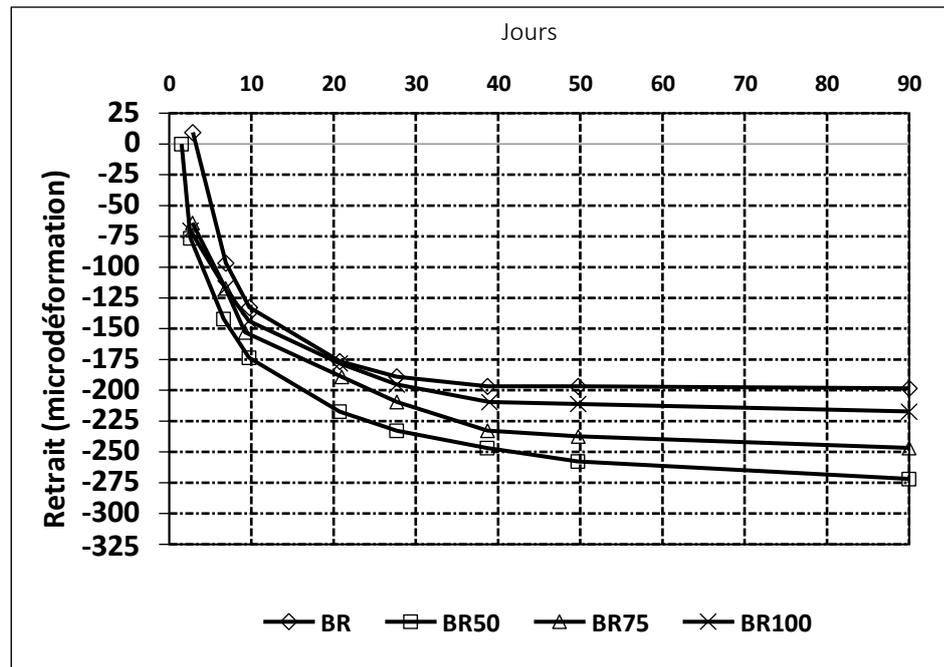


Figure II.5 : Profils de retrait pour béton contenant déchet de brique.

II.3.3.3 La porosité :

Gonçalves et al [63] ont étudié l'effet de l'argile calcinée (déchets de brique et métakaolin) sur la porosité des mortiers. La brique a été fournie par une entreprise locale au Brésil ainsi que deux types de métakaolin à différents taux de substitution de ciment qui sont : 0%, 10%, 20%, 30% et 40%.

Il a été montré en premier lieu que les différents taux de substitution du ciment par les déchets de brique ne provoquent aucun changement de densité et de compacité des mortiers. Cela a été expliqué par la similarité des distributions des pores entre les mortiers à base de brique et les mortiers témoins. Les résultats montrent que les déchets de brique recyclés provoquent une augmentation de la porosité totale par rapport aux mortiers témoins.

II.3.3.4 Absorption capillaire

Pour l'absorption d'eau par capillarité et la sorptivité, Si Ahmed et Kenai [64] ont trouvé que les résultats sont comparables, notamment pour 10% de PB. L'incorporation de la poudre de brique recyclé semble à avoir augmenté légèrement la sorptivité. La légère augmentation de l'absorption et de la sorptivité pour les mélanges incorporant de la poudre de déchet de brique est probablement due à l'effet de dilution et à la diminution de la compacité des mélanges.

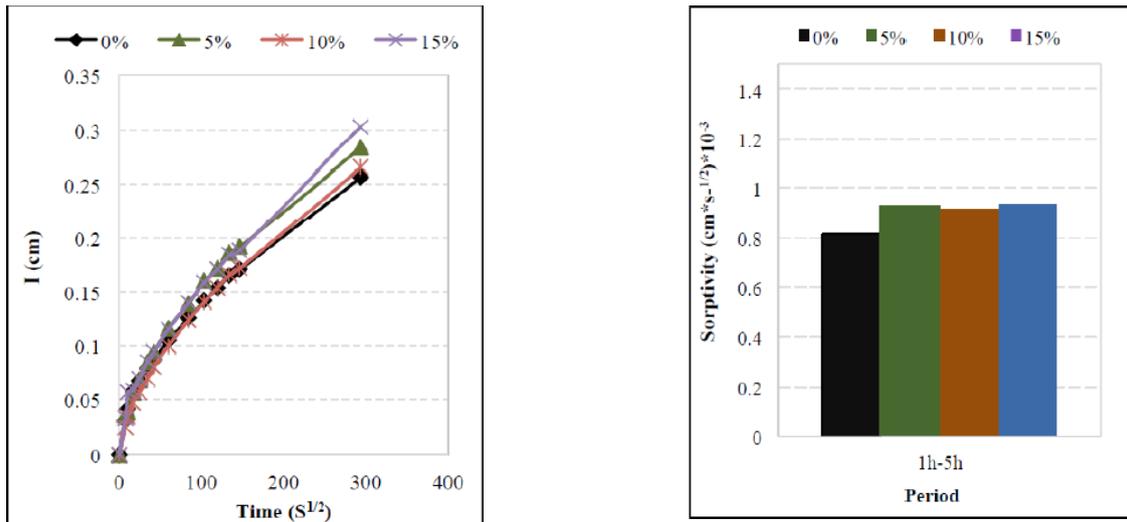


Figure II.6 : Effet du taux de la poudre de brique sur l’absorption d’eau et la sorptivité

II.3.3.5 La résistance à la compression

L’effet de l’introduction de la poudre de brique issue des déchets de brique, est étudié par JiahuShao et all, 2019 [65], qu’a introduit cette poudre par remplacement partiel de ciment à des pourcentage (0 %, 10 %, 20 %, 30 % et 40 %), les résultats de ses travaux montrent que la résistance à la compression des mortiers contenant la poudre de brique diminue progressivement avec l’augmentation des pourcentage de remplacement au jeune âge, la figuresuivante présentent les résultats d’essai mécanique de ses travaux [65]

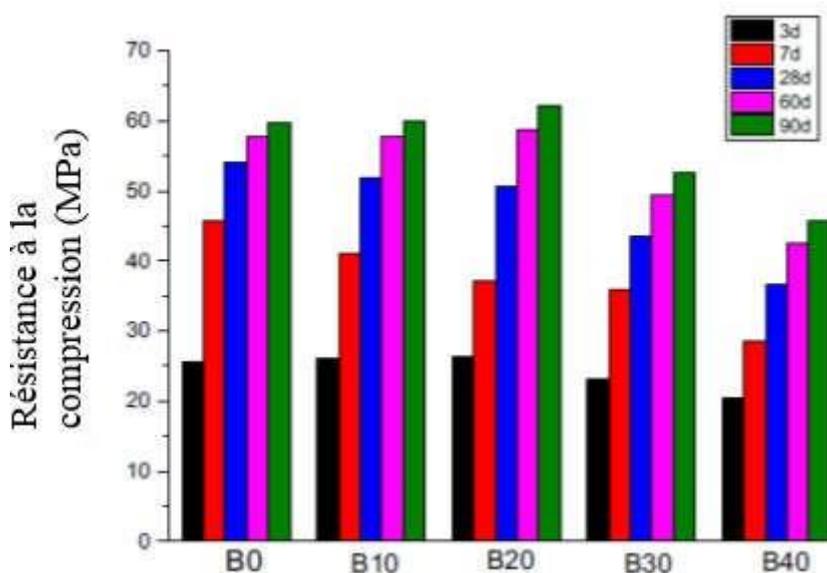


Figure II.7 : Effet de la poudre de brique sur les propriétés mécaniques des mortiers[65]

Dans le même travail de recherche cité, la résistance à la compression des mortiers additionnés par la poudre de brique s'est développée progressivement en fonction de l'âge, et

le mortier élaboré avec 20% de poudre de brique a donné une résistance en compression la plus élevée estimée à 62,2 Mpa à 90 jours [65]

II.3.3.6 La résistance à la traction

Pour les résistances à la flexion, les auteurs Ortéga et all (2018), notent que ces dernières restent pratiquement constantes sur la période de 400 jours, avec une légère augmentation dans le cas des mortiers à poudre de brique par rapport à ceux de CEM I.

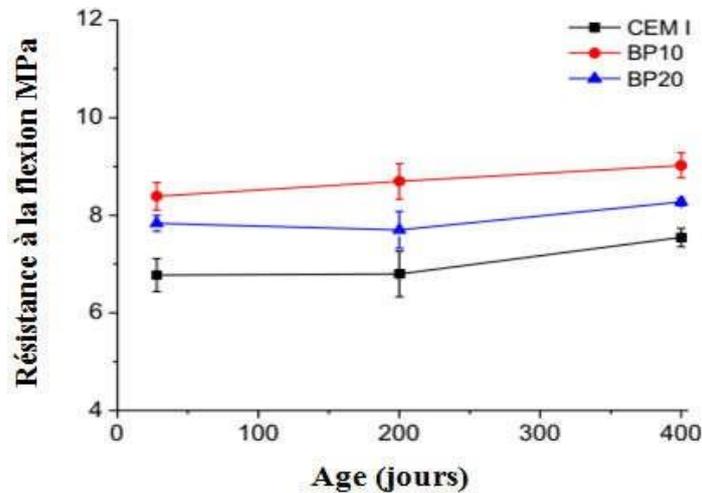


Figure .II. 8 : Résistance à la flexion des mortiers étudiés [58]

II.4 Conclusion

Notre recherche dans les déchets, nous montre la possibilité d'utilisation des déchets de brique dans le domaine de génie civil, plus particulièrement, comme granulats, ce qui permettrait de réduire d'autant tout en prolongeant la vie des décharges qu'ils contribuent actuellement à saturer.

Le recyclage minimise la pollution et protège l'environnement. Est devenu aujourd'hui la bonne solution qui peut donner des ressources renouvelables et durables qui contribuent au processus de construction dans le domaine du génie civil.

Chapitre III :
Matériaux et
Essais

III.1 Introduction :

Avants d'entamé notre étude ; le squelette granulaire d'un mélange donné est composé de différents granulats, chaque constituant doit être caractérisé et conforme aux normes. Dans ce chapitre on présente les caractéristique physique des matériaux utilisés pour élaborer les mélanges de béton compacter par rouleau étudiés .Cette caractérisation est nécessaire pour l'indentification des matériaux ainsi que l'établissement d'une bonne formulation de BCR.

III.2 Matériaux

III.2.1 Sable

III.2.1.1 Sables naturels

Pour notre étude nous avons utiles deux type de sable : un sable jaune S1 (0/2) de BOUGAZOUL et un sable lavé S2 (0/5) de provenance de BAGHLIA. Leur granulométrie est présentée dans la figure III.1



Sable jaune 0/2

Sable lavé 0/5

Figure III. 1 : Sable jeune et sable lavé.

III.2.1.2 Sable de brique :

Les déchets de brique utilisés dans cette étude, proviennent d'une usine de la wilaya de Tipaza à sidi Rachad, située à environ 50 km à l'ouest d'Alger, qui utilise deux types d'argiles, argile jaune et argile grise. Cette usine fabrique deux types de brique : la brique rouge à 8 trous de dimension 10x20x30 et la brique à 12 trous de dimension 15x20x30. dans notre étude on a travaillé avec les déchets de brique rouge.



Sable de brique grossier



Sable de brique fin

Figure III.2. Sable de brique.

III.2.1.2.1_Concassage de brique

Le concasseur est utilisé pour réduire la taille et changer la forme des déchets de brique afin qu'ils puissent être faciles à tamiser. Dans notre étude on a concassé le brique dans un concasseur privée a Amroussa Bouinane Blida.

III.2.1.2.2 Tamisage de brique

La brique utilisée dans notre étude a été tamisée dans un atelier privée et par nous même au laboratoire par le biais de deux tamis (1.25mm, Brique fin) et (6.3mm, Brique grossier).

III.2.1.3 L'Analyse granulométrique

L'essai est réalisé selon la norme NA 2607 et NF EN 933-2, consiste a classé les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis emboités les nus sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissante au haut vers le bas le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont la nature de l'échantillon les masse des différents refus ou celle des différents tamis sont rapportées a la masse initial de matériaux

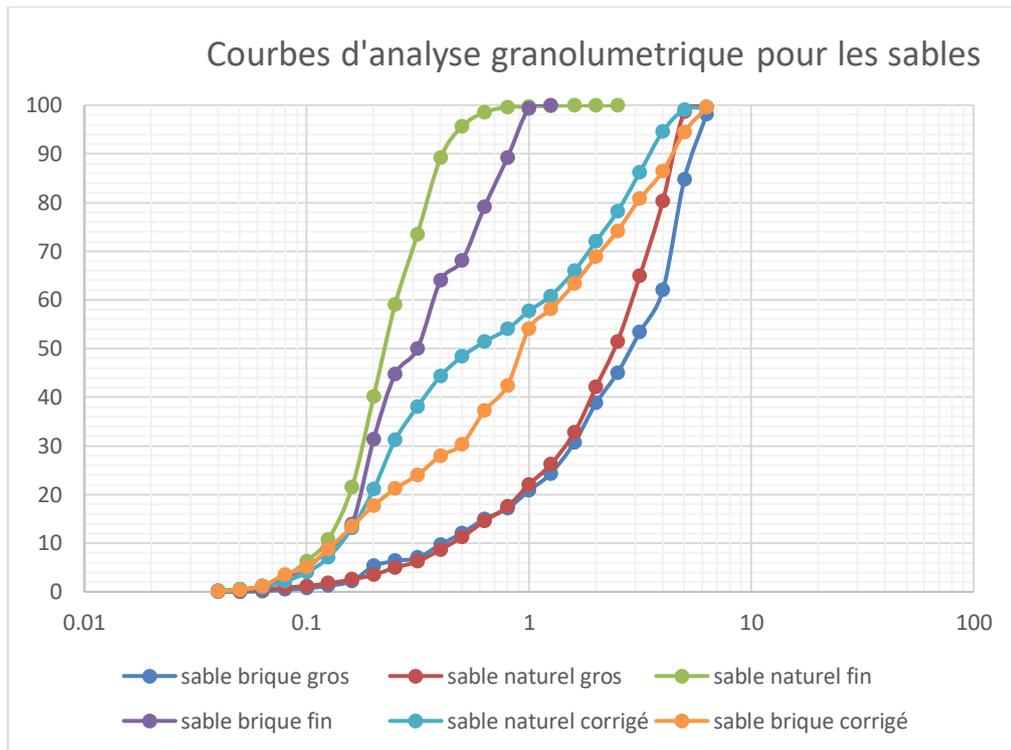


Figure III.3 : Courbe de l'analyse granulométrique des sables.



Figure III.4 : l'essai d'analyse granulométrique.

III.2.1.4 Masses volumiques :

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont calculés d'après les normes NA255 ; NF EN1097-3 et NF EN 1097-6.

III.2.1.5 Masse volumique apparente

Il s'agit de mesurer la masse de récipient cylindrique d'un volume connu : 1 litre pour les sables et 2.149 L pour les graviers. Remplir le récipient à l'aide d'un entonnoir d'un

échantillon de gravier ou sable ou ciment la masse volumique est donc le rapport de la masse du matériau sur le volume de récipient selon la norme NFEN1097-3.

- **Sable Naturel**

Le sable corrigé contient 40% de sable fin et 60% de sable grossier (pour avoir un sable équivalent).

Tableau III. 1 : La masse volumique apparente des sables.

Masse de récipient vide pour sable	504.3g
Volume de récipient	V=1l
Masse volumique apparente	$\rho_{app} = 1.651 \text{ g/l}$



Figure III.5 : Essai de la masse volumique apparente.

➤ **Sable de brique**

Pour notre étude on a pris un échantillon de brique corrigée (28% de brique fin et 72% de brique grossier).

Tableau III.2 : Masse volumique apparente de brique.

Masse de récipient	504.3g
Volume de récipient	1L
ρ_{app}	1,164(kg/m ³)

III.2.1.6 Masse volumique Absolue

➤ Sable naturel

La méthode de l'éprouvette graduée est appliquée cette méthode est réalisée selon la norme NF EN 1097-6 est consiste a remplir une éprouvette graduée avec un volume $V_1 = 100\text{ml}$ d'eau. Peser un échantillon sec $M=300\text{g}$ de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminé tous les bulles d'air. L'eau monte dans l'éprouvette lire le nouveau volume V_2 . La masse volumique absolue est alors donnée par la formule suivante :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

On a pris un sable corrigé 40% de sable fin et 60% de sable grossier.

Tableau III. 3 : La masse volumique Absolue des sables.

Pour $M=0.3\text{kg}$	
Sable grossier 60% =0.180kg	Sable fin 40% = 0.120kg
$\rho_{\text{abs}} = 2.6 \text{ kg/l}$	



Figure III.6 : Essai de la masse volumique absolue.

➤ Sable de brique

La masse volumique absolue de brique est présenté sur le tableau III.4

Tableau III.4 : Masse volumique Absolue de brique.

Pour $m=0,3\text{kg}$
$\rho_{\text{abs}}=2,31$

III.2.1.7 Equivalant de sable

L'essai de l'équivalent de sable permet de mesurer le rapport du sable en séparant les particules fines contenus dans le sable des éléments plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalents de sable qui quantifie le rapport du sable.

III.2.1.7.1 Mode opératoire

- Tamiser le sable dans le tamis 5mm et déterminer sa teneur en eau,
- Prendre une prise d'essai M_h : $M_h = 120 * (1 + W/100)$
- Verser la solution lavant dans l'éprouvette jusqu'à 10 cm.
- Verser le sable dans l'éprouvette et taper au fond pour éliminer les vides.
- Laisser imbiber pendant 10 min puis agiter dans l'agitateur électrique.
- Laver les bords de l'éprouvette puis commencer à laver le sable par le tube jusqu'à ce que la solution atteigne 38 cm.
- Laisser sédimenter pendant 20 min.
- Mesurer les hauteurs : H1 la hauteur de saleté + sable propre. H2 la hauteur du sable propre mesurée par le piston. H'2 la hauteur du sable propre mesurée par la règle (hauteur visuelle).

Calcul et expression des résultats :

Pour chaque éprouvette on calcul :

L'équivalent de sable au piston $ES = H_2 / H_1 * 100$

L'équivalent de sable visuel $ES' = H'2 / H_1 * 100$

NB : L'équivalent de sable (visuel et au piston) est la moyenne des deux valeurs données par chaque éprouvette, elle est arrondie à l'unité la plus proche.



Figure III.7 : Essai d'équivalent de sable.

➤ **Sable Naturel**

Les résultats du module de finesse pour les sables naturels utilisés sont présentés dans le tableau III.5.

Tableau III. 5 : Équivalent de sable.

	ESV	ESP
Sable fin	89.66%	81.860%
Sable grossier	95.136%	93.841%
Mélange	91.710%	81.867%
Nature et qualité de sable	Sable très propre	Sable très propre

III.2.1.8 Absorption de sable :

On définit l'absorption de sable par la norme NF P 18-555. Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures. Principe de la mesure. On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sec de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24h à 20°C

Le coefficient d'absorption (A_b) est défini par la relation

$$A_b = \frac{(masse saturé - masse sec) \times 100}{masse sec}$$

➤ **Sable naturel**

Sable corrigée composé de sable fin 40% sable grossier 60%. La masse $m_{initiel} = 200$ g. les résultats sont présentés dans le tableau III.6

Tableau III.6 : l'absorption de sable corrigée

	Masse sec (g)	Masse sat (g)	Absorption %
Sable corrige	200	207	3.5

➤ **Sable de brique :**

Pour cette étude on a utilisé un sable de brique corrigé de 28% de sable de brique fin et 72% de sable de brique grossier. Les résultats de L'absorption de ce sable de brique est dans

le tableau III.7 suivants :

Tableau III. 7 : l'absorption de sable de brique corrigée.

	Masse sec (g)	Masse sat (g)	Absorption %
Sable de brique corrige	400	448	12%

III.2.1.9 Module de finesse

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (M_f) Un module de finesse est d'autant plus faible qu'il est riche en éléments fins. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2.2 à 2.8.

Le module de finesse égale a :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum Refue \text{ cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\}$$

Tableau III.8 Le module de finesse des sable de brique.

	Module de finesse
Sable natural fin	1.0666
Sable natural grossier	4.249
Sable de brique recyclé fin	1.57
Sable de brique recyclé grossier	4.218

III.2.2 Caractéristique des graviers :

III.2.2.1 Type de graviers :

Quatre types de graviers été utilisé à savoir : gravier G3/8 ; G8/15 ; G15/25 ; G15/50 de provenance de HAMMAM EL OUNE. Leur granulométrie est présentée dans la figure III.8



Gravier 15/25



Gravier 15/50



Gravier 8/15



Gravier 3/8

Figure III.8 : Gravier.

III.2.2.2 Propreté superficielle des graviers

L'essai est réalisé selon la norme NFP 18-591.

III.2.2.2.1 Mode opératoire :

- 1-peser la masse m_0 du gravier
- 2-laver de l'échantillon
- 3-séché le dans l'étuve de $105^{\circ}\text{C} (\pm 5^{\circ}\text{C})$
- 4-peser la masse m_1 après le séchage
- 5-calcule la propreté **P**

$$P(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

Tableau III.9 : Propreté de gravier :

Propreté du gravier 3/8		Propreté du gravier 8/15		Propreté du gravier 15/25		Propreté du gravier 15/50	
M ₀ (g)	343,5	M ₀ (g)	521.6	M ₀ (g)	386,7	M ₀ (g)	409,2
M ₁ (g)	337.5	M ₁ (g)	510.0	M ₁ (g)	383.6	M ₁ (g)	406.6
P(%)	1,74	P(%)	2,22	P(%)	0,80	P(%)	0,63



Figure III.9 : La propreté de gravier

III 2.2.4 Analyse granulométrique par tamisage :

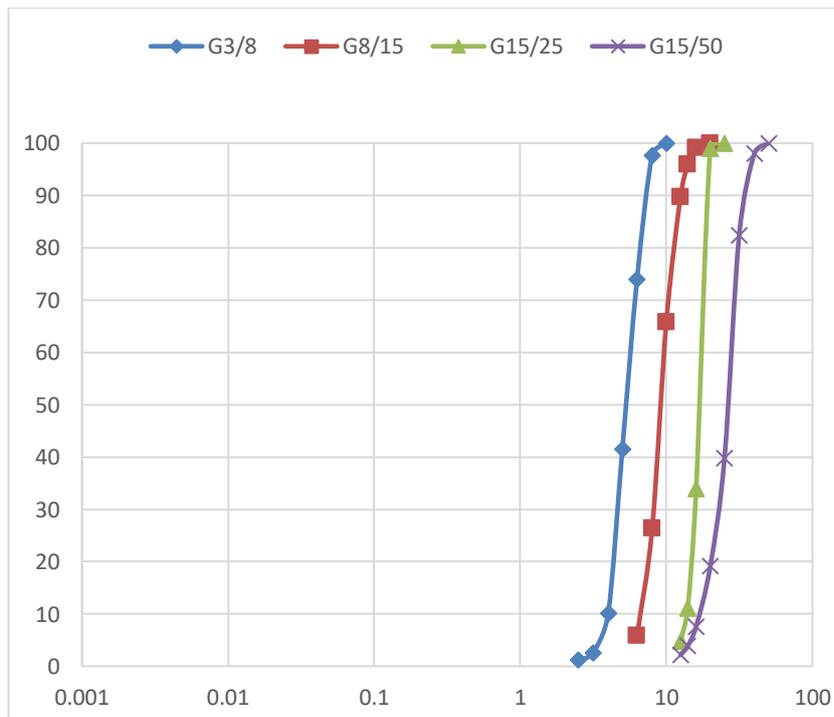


Figure III.10 : Résultats d'analyse granulométrique.



Figure III 11 : Analyse granulométrique de gravier.

III.2.2.5 Masses volumiques

Les masses volumiques absolue et apparente de gravier sont présentés dans les tableaux III.10 et III.11.

Tableau III.10 Masse volumique du gravier :

Masse de récipient vide pour le gravier =643.3g=0.6433kg			
Volume de récipient pour le gravier V=2.149L			
G3/8	G8/15	G15/25	G15/50
$\rho_{app} = 1,447$ (kg/l)	$\rho_{app} = 1,336$ (kg/l)	$\rho_{app} = 1,358$ (kg/l)	$\rho_{app} = 1,287$ (kg/l)

Tableau III .11 Masse volumique absolue :

G3/8	G8/15	G15/25	G15/50
M=200g / V = 300ml	M=200g / V=300ml	M=300g /V=300ml	M=300g /V=300ml
$\rho_{abso} = 2.67$ (kg/l)	$\rho_{abso} = 2.67$ (kg/l)	$\rho_{abso} = 2.65$ (kg/l)	$\rho_{abso} = 2.65$ (kg/l)



Figure III.12 : Masse volumique absolue de gravier.

III.2.6 Absorption de gravier :

L'essai ce fait selon la norme NF P 18-554 Les résultats sont présentés dans le tableau III.12

Tableau III .12 : l'absorption de gravier

	Masse sec (g)	Masse sat (g)	Absorption (%)
Gravier 3/8	300	304.8	1.6
Gravier 8/15	300	303.1	1.03
Gravier15/25	300	303	1.00
Gravier15/50	500	502.9	0.58

III.2.3 Fillers de calcaire :

Le filler, également appelé fines ou fines d'addition, est un granulat fin, de 0 à 80 μm environ, est destiné au béton BCR (a été utilisé comme additions aux bétons). Les fillers utilisées sont de provenance de la région de MOSTAGANEM. Leur granulométrie est présentée dans la figure III.13.



Figure III.13 : Filler calcaire.

III.2.3.1 L'analyse granulométrique par sédimentation :

La sédimentation selon la norme NF P 94-056 complète analyse granulométrique par tamisage elle le but pour déterminer la densité des fines particules donc le pourcentage de ces fines a fin de compléter de tracé la courbe granulométrique

III.2.3.2 Mode opératoire :

- Désagréger le tamisât à 0.080 mm (ou 0.100 mm) obtenu par voie humide.
- Prélever 40 g de matériau sec homogénéisé
- Préparer une solution constituée par 250 cm³ d'eau distillée et 30 cm³ d'une solution à 5% d'hexa métaphosphate de sodium.
- Imbiber l'échantillon prélevé dans la solution ainsi préparée pendant 12 heures.
- Procéder à l'agitation mécanique ou manuelle pendant 3 minutes afin de séparer les grains
- Compléter l'éprouvette avec de l'eau distillée jusqu'à 100 cm³ et remué la solution avec un agitateur manuel afin de répartir uniformément les grains.
- Retirer l'agitateur et mettre en marche simultanément le chronomètre, puis plonger lentement le densimètre.
- Faire les lectures du densimètre au bout de 30 secondes 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 90, 120, 150, 180 minutes. 4h, 5 h, 6 h.
- Le densimètre ne pourra être retiré de la solution qu'après avoir relevée la lecture à 2 minutes. Pour le reste des lectures sur le densimètre et le thermomètre, puis retirer le densimètre



Figure.III.14 : Analyse granulométrique par sédimentation de filler calcaire.

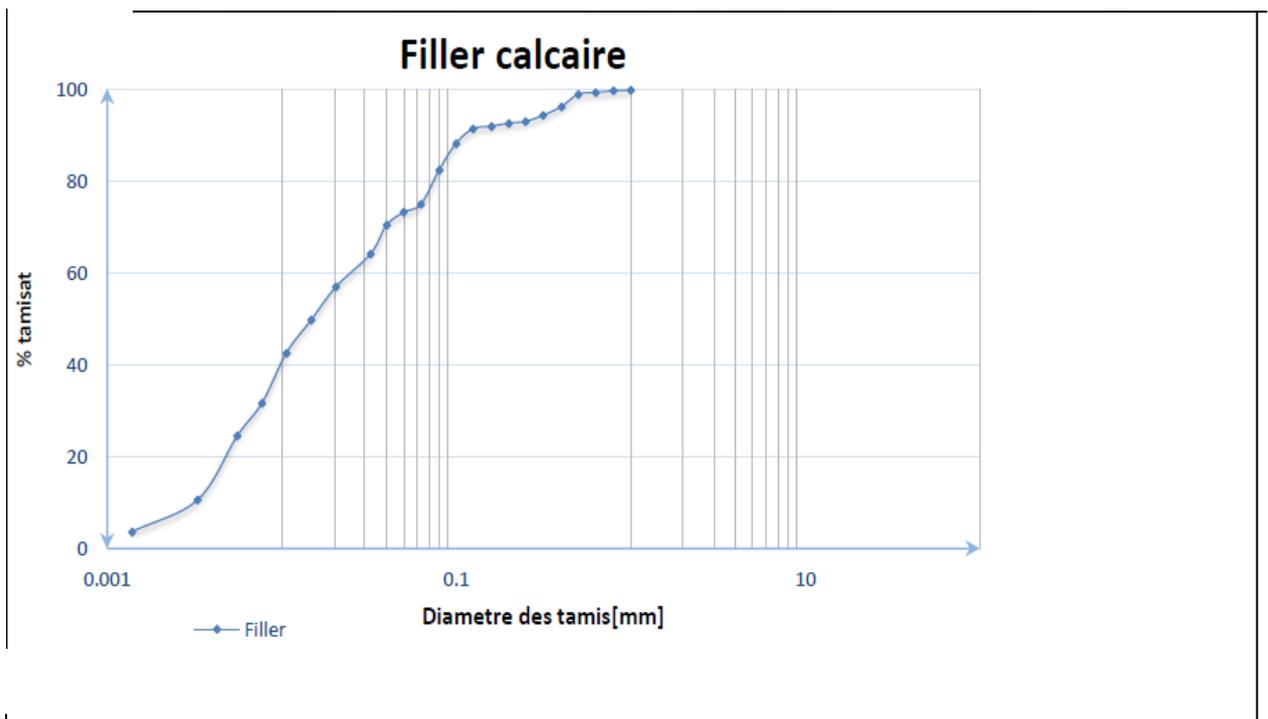


Figure III.15 : Courbe granulométrique par sédimentation de filler de calcaire.

III.2.3.3 Masse volumique

III.2.3.3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique de filler calcaire est présenté sur le tableau III.13

Tableau III.13 Masse volumique apparente

Masse volumique du calcaire ρ_{app}	
M1(kg)	1.09
M2(kg)	1.06
M3(kg)	1.05
M_{moy} (kg)	1.07
ρ_{app} (kg/l)	1.07

III.2.3.3.2 Masse volumique absolue :

- La méthode de pycnomètre selon la norme NFP 18-554 a été utiliser qui consiste a
- Poser le pycnomètre sur la balance et faire le zéro
- Peser le pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère (m_1)
- Vider le pycnomètre et peser une masse (m_2) de gravier ou sable
- Introduire le matériau dans le pycnomètre
- Compléter le remplissage de pycnomètre avec l'eau
- Peser l'ensemble soit (m_3)

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{M_1 + M_s \cdot \gamma_w}$$



Figure III.16 : Masse volumique absolue.

Tableau III.14 : Résultats masse volumique absolue

	Pycnomètre
Masse de l'échantillon	=40g
$M_1=P+eau$	39,26
$M_2=P+eau+A$	40,46
M_s	1.93
$\rho_{abs}(g/ml)$	26.43

III.2.4 Le ciment :

Pour notre étude on a utilisé le ciment portland provenant du MEFTAH, de type CEM

III.2.4.1 La classe vrai du ciment :

Les résultats des essais de compression et de flexion sur mortier de ciment normalisé (figure III.17 et III.18), réalisés selon le norme EN 197-3 sont regroupées dans le tableau III.15.



Figure III.17 : Préparation des moules de mortier normalisé.

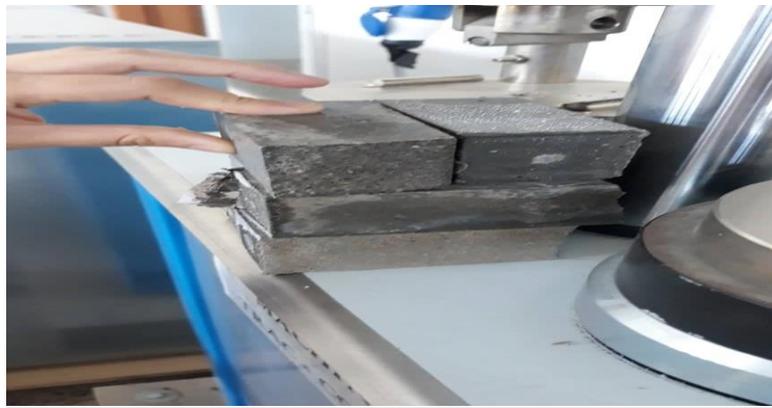


Figure III.18 : Mesure de la résistance à la compression.

Tableau III.15 : La résistance a la traction et la compression.

	Contrainte a la traction (MPA)	Contrainte a la compression (MPA)		
	7 Jour	4,715	Eprouvette1	22.99
5,404		Eprouvette2	27.1664	27.489
4,715		Eprouvette3	26.774	24.50
28 Jour	8,44	Eprouvette4	45.91	42.920
	7,063	Eprouvette5	40.209	42.120
	7,321	Eprouvette6	44.114	28.540

III.3. Etude de formulation du BCR

Pour la formulation nous avons tiré profit d'une part de quelques méthodes de formulations connues (théorique, semi-empirique) en s'inspirant de leurs principes et, d'autre de données expérimentales de formulations de BCR de barrage construits auparavant (Cahiers de charges et rapports d'activités). Les étapes suivantes ont été suivies

III.3.1 Optimisation du Mélange granulaire du BCR :

Le mélange granulaire choisi est composé de fillers, sable, graviers, et ballast. L'objectif de cette étape est d'optimiser la compacité du mélange granulaire en faisant varier les pourcentages des matériaux afin d'obtenir une courbe conforme à un fuseau de référence. Pour les bétons BCR, les fuseaux d'étude sont construits en se référant aux fuseaux de référence utilisés dans la construction de BCR pour barrage. Le fuseau représenté par la figure a été extrait du rapport d'activité de laboratoire du barrage en BCR de Tabellout, réalisé par l'entreprise RAZEL-Bec.

Quatre mélanges ont été réalisés, entrant tous dans fuseau (figure III.19). Nous avons opté pour la courbe du 1^{er} mélange en raison de sa similitude aux autres courbes référentielles réalisées par L'entreprise RAZEL-Bec. Ainsi la compacité du mélange a été mesurée pour permettre d'optimiser la formulation finale

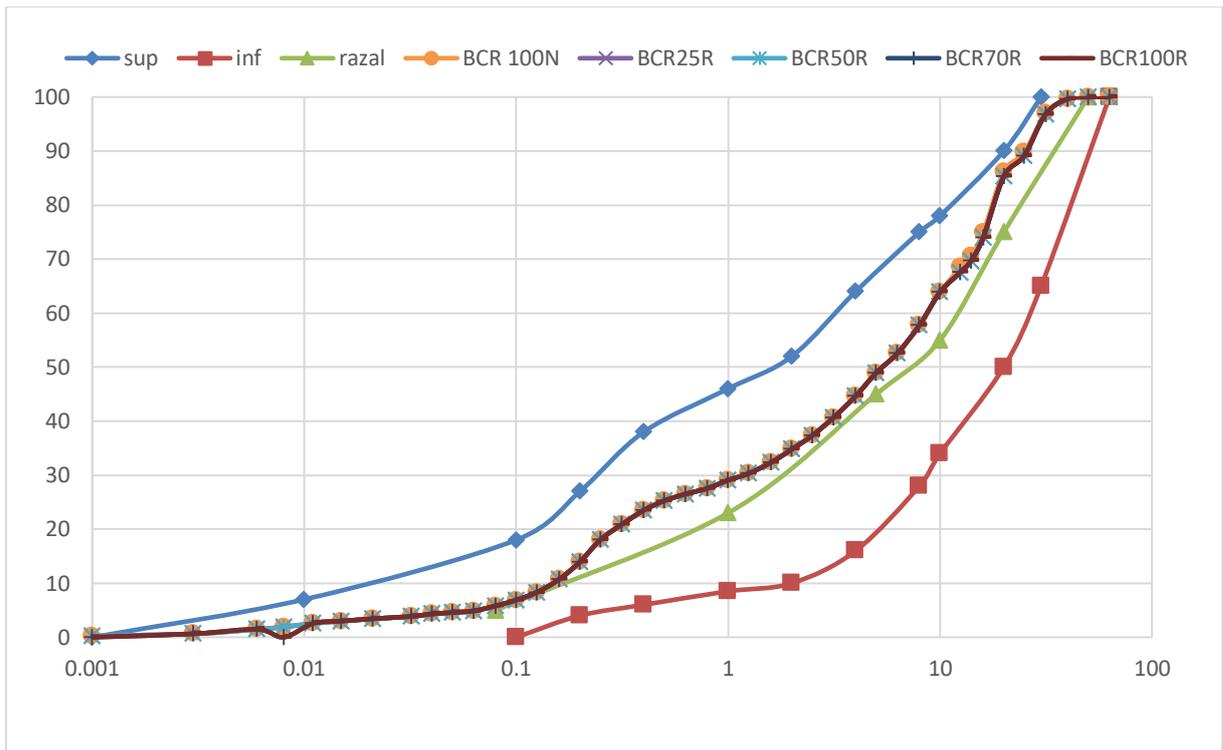


Figure III.19 : Courbes représentant la granulométrie des mélanges choisis.

III.3.2 Mesure de la compacité :

Dans notre cas, en prenant en compte les différentes méthodes de mesure de la compacité, nous avons opté pour un dispositif expérimental, pour mesurer la compacité, se basant sur un compactage par vibration avec chargement. Le dispositif est composé de une table vibrante avec une fréquence de 50Hz, un moule cylindrique de diamètre 265mm et hauteur de 254 mm utilisé pour la mise en place des différents types de mélanges. La charge de compactage voulue est assurée par un jeu de disques, de masses différentes.



Figure III.20 : Compactage.

III.3.3 Mode Opérateur :

Pesage des différentes fractions du mélange,

1. Introduire les éléments pesés dans le sac d'homogénéisation du mélange
2. Introduire le mélange dans le moule, avec une faible hauteur de remplissage
3. Racler le surplus de mélange après le remplissage.
4. Pesé l'échantillon avant l'essai, la masse est noter « m1 ».
5. Poser et fixe le moule sur la table, et démarrer l'essai.
6. Après une minute de l'essai arrêter la table vibrante et à l'aide d'un pied à coulisse numérique mesure la hauteur « h ».
7. Pesé l'échantillon après l'essai, la masse est noter « m2 ».
8. Réintroduire l'échantillon dans leur sac.

La compacité est mesurée comme suit :

$$C = V_s / V_T$$

Tel que : V_s : Volume des solides :

$$V_s = S \times h = S \times (H - H_{vmoy})$$

V_T Volume total tel que

$$: V_T = S \times H :$$

Avec

H_{vmoy} : Hauteur de l'échantillon avant compactage

H : Hauteur de l'échantillon après compactage

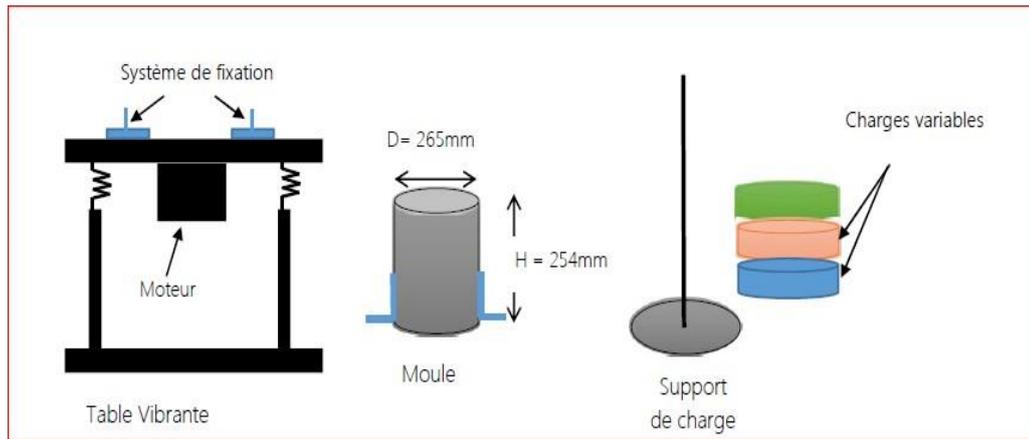


Figure III.21 : Dispositif de mesure de la compacité.

Tableau III. 16 : les résultats de la compacité.

	BCR0	BCR25%	BCR 50%	BCR 70%	BCR 100%
H_{moy} (cm)	3,6	3,49	3,48	3,336	3,9
Compacité	0,858	0,863	0,862	0,867	0,846



Figure III.22 : l'essai de compacité.

III.3.4 Type et dosage en ciment

Le choix du ciment a été effectué à partir de la littérature et des rapports d'activités des barrages construits [130 Kg/m^3], tandis que le rapport E/C a été fixé à 0,75 en fonction du Temps VEBE souhaité.

III.3.5 Formulations réalisées

La quantité des différents matériaux est calculée par une approche volumique, en se basant sur les pourcentages des matériaux, la masse volumique de chaque matériau ainsi que

la valeur de compacité du mélange. Le calcul de la quantité d'eau totale est faite sur la base du rapport E/C choisi ainsi qu'en prenant en considération l'absorption d'eau des matériaux utilisés. Ainsi, et en choisissant un rapport E/C de 0.858, la formulation de base (B0, sans sable de brique) a été déterminée. En substituant le sable calcaire par (25, 50, 70, et 100% des sable de brique, nous avons obtenu quatre autres formulations (B1, B2, B3, B4). Ainsi les quatre formulations de BCR étudiés sont présentées dans le tableau III.17.

Tableau III.17 : Formulation de BCR.

	BCR 0	BCR25%	BCR50%	BCR70%	BCR100%
Filler	133,85	134,63	132,03	132,03	131,98
sable N	892,32	199,35	355,46	497,64	-
sable Br	-	673,14	440,09	264,05	820,79
G 3/8	183,27	138,25	158,18	158,18	135,53
G8/15	343,63	322,59	338,95	338,95	316,23
G15/25	318,32	320,17	313,99	313,99	313,87
G15/50	386,53	411,65	403,70	403,70	403,54
ciment	130	130	130	130	130
eau	110,5	110,5	110,5	110,5	110,5
Adjuvant	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

III.4 Caractérisation du BCR a l'état frais

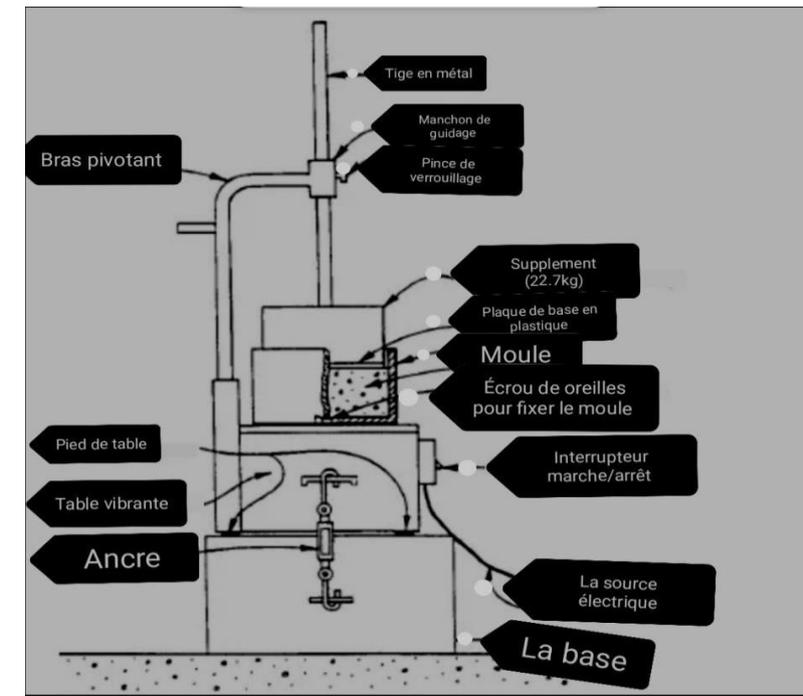
III.4.1 L'essai de VEBE :

La table vibrante de Vebe est utilisée pour mesurer la consistance des mélanges de béton rigides à extrêmement secs. La consistance est mesurée comme le temps nécessaire pour qu'une masse donnée de béton soit consolidée par vibration dans un moule cylindrique. Pour le BCR de barrage, l'essai est réalisé selon la norme ASTM C1170.



Figure III.23 : Appareille VEBE

- 1- Une table vibrante avec un plateau en acier : la table vibrante doit être construite de manière à empêcher la table de fléchir pendant le fonctionnement. Le plateau de la table doit être activé par un vibreur électromécanique
- 2- Moule cylindrique : il doit être fabriqué d'acier ou d'un autre métal dur résistant à la corrosion avec un diamètre intérieur de $(241 \pm 2 \text{ mm})$, une hauteur de $(197 \pm 2 \text{ mm})$, et une épaisseur de paroi $(6 \pm 2 \text{ mm})$.
- 3- Le moule doit être équipé de supports métalliques fendus fixés de façon permanente afin qu'il soit fixé rigidement à la table vibrante
- 4- Bras pivotant et manchon de guidage ,qui doivent être en mesure de maintenir l'arbre métallique avec le dispositif de fixation, tout en permettant à l'arbre de se déplacer vers le haut lorsque la pince est relâchée
- 5-Supplément : Une masse d'acier cylindrique avec une plaque de plastique circulaire fixée à sa base et un arbre métallique d'au moins 457 mm de long et 16 de diamètre fixé perpendiculairement à la plaque et encastré au centre de la masse
- 6- une Balance : d'une capacité suffisante pour déterminer la masse totale de la charge pour déterminer la masse totale de l'échantillon et du moule
- 7- Dispositif de chronométrage : Chronomètre capable d'enregistrer des intervalles de temps d'au moins 2 minutes au second près.



III.4.2 Procédure de l'essai :

L'essai est réalisé selon la norme ASTM C1170 et qui consiste à :

1. Prélever un échantillon représentatif d'une masse minimale de (22,7 kg), et Manipuler le béton de façon à ce que ce que les granulats grossiers ne se séparent pas du mortier.
2. Humecter l'intérieur du moule et le remplir de (13,4 = 0,7 kg) de béton, placez et distribuez le béton de façon uniformément le béton afin de minimiser la ségrégation et les poches de roche. Nivelez la surface du béton meuble.
3. Fixez le moule sur la table de Vebe en serrant à la main les écrous à oreilles. Faites glisser l'arbre de la masse de surcharge à travers le manchon de guidage,
4. et faites pivoter la surcharge jusqu'à sa position verrouillée centrée sur le moule, en veillant à ce qu'elle s'insère dans le moule une fois libérée. Lorsqu'elle est libérée
5. Démarrez le vibreur et la minuterie. À l'aide de la lampe de poche, observez le béton dans l'espace annulaire situé entre le bord de la surcharge et la paroi intérieure du moule. Le mortier remplit l'espace annulaire entre le bord extérieur de la surcharge et la paroi intérieure du moule.
6. Observez le mortier jusqu'à ce qu'il forme un anneau autour du périmètre total de la surcharge. Lorsque l'anneau de mortier se forme complètement autour de la surcharge, arrêtez le vibreur et la minuterie ; déterminez le temps écoulé à la minute et à la seconde près

III.4.3 Mise en place des éprouvettes

-Méthode de confection par compactage au marteau vibrant :

Le compactage des éprouvettes de BCR est fait selon la norme NF EN 13286-51 à l'aide d'un marteau vibrant. C'est un appareil servant à compacter le BCR et qui est muni des plaques d'aciers qui ont une superficie légèrement inférieures à celles des moules cylindriques et cubiques. La mise en place du BCR se fait en couche, deux pour les moules cubiques et trois pour cylindriques qui sont préalablement huilés. Chaque couche de BCR est compactée jusqu'au refus une minute est suffisante. Comme on peut le voir dans la figure III.24



Figure III.24 : La confection de BCR.

III.5 Caractérisation du BCR a l'état durci :

III.5.1 Résistance a la compression :

La résistance à la compression des BCR étudiés est déterminée sur des cubes de 150 × 150 mm après 7 ,28 et 90 jours. Le teste est réalisé conformément à la norme EN 12390-3 avec la presse de compression.



Figure III.25 :L'essai d'écrasement.

III.5.2 Absorption capillaire :

Dans cet essai, des blocs de BCR qu'on a utilisé sont préparées sous forme d'éprouvettes cylindriques coupées en trois échantillons. Après leur conditionnement en bassin d'eau pendant la période de maturation étudiée (28 jours et 90 jours), les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée pendant un minimum de 7 jours à 105°C, jusqu'à masse constante. Une hauteur de 1 cm de la surface latérale des éprouvettes a été enduite par de la résine, pour permettre une pénétration d'eau unidirectionnelle.



Figure III.26 : Epreuve BCR couper.

III.5.2.1 Conduite de l'essai :

L'essai est réalisé selon la norme EN 13057. L'échantillon est placé sur deux appuis collés sur le fond d'un bac rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 2 ± 1 mm à partir de la base de l'éprouvette. Ce niveau d'eau est maintenu constant pendant la durée de l'essai à l'aide du dispositif montré sur la figure. La variation de la masse est mesurée après 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 240 minutes. La pesée des éprouvettes est effectuée après les avoir essuyées à l'aide d'une peau de chamois humide pour enlever les gouttes d'eau de la surface.

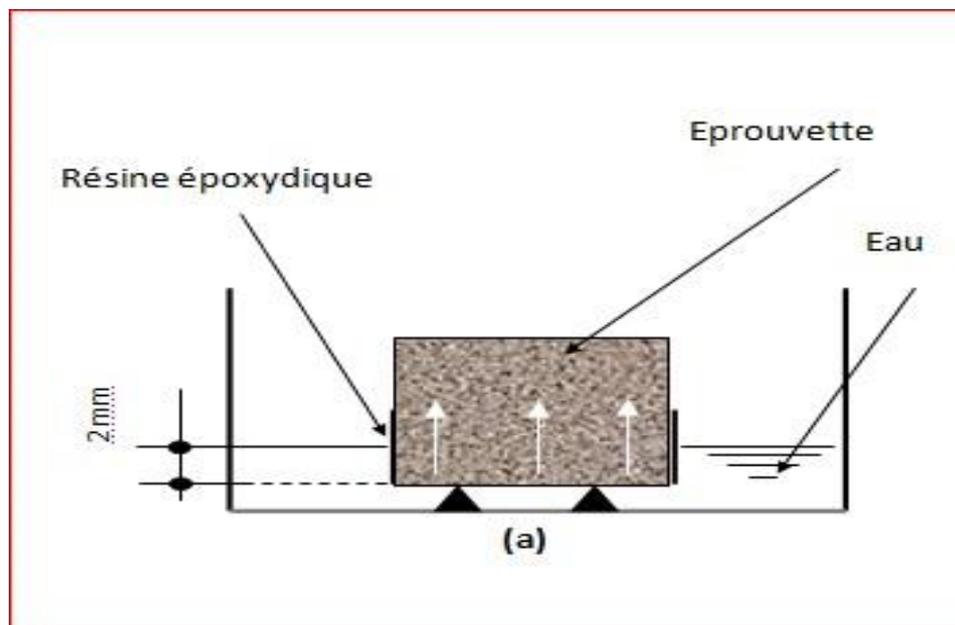


Figure III. 27 : Schéma (a) et vue d'ensemble du dispositif d'essai de L'absorption D'eau par capillarité.



Figure III.28 : L'absorption capillaire.

III.5.2.2 Coefficient d'absorption :

L'absorption d'eau par unité de surface Ca_t , après un temps t d'immersion est déterminée par l'équation suivante :

$$Ca_t = \frac{Mt - M_0}{A}$$

L'absorption d'eau Ca_t est proportionnelle à la racine carrée du temps. De ce fait, un coefficient d'absorption S est déterminé par régression linéaire de l'ensemble des mesures se trouvant dans le domaine d'évolution linéaire de l'absorption Ca_t , le plus souvent entre 1 et 8 heures. Ce coefficient indique la tendance de l'éprouvette à s'imprégner d'eau par action capillaire, sans aucune pression extérieure. La relation suivante est tracée et le coefficient S est déterminé (pente de la courbe).

$$Ca_t = S\sqrt{t}$$

III.5.3 Porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation de la durabilité. Elle est déterminée par l'absorption d'eau par immersion, qui est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. Dans cet essai, huit éprouvettes coupé séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (variation de 0,1% après 24h). Ainsi la masse sèche « M_{sec} » de l'échantillon est déterminée. Pour obtenir la porosité accessible à l'eau par immersion « P_w », les échantillons ont été immergés dans l'eau jusqu'à saturation (variation en masse de 0,1% après 24 h) selon la norme NBN B 15-215 et sont pesés dans l'air « $M_{air\ sat}$ » et dans l'eau « $M_{eau\ sat}$ ». On définit P_w comme étant la porosité ouverte du matériau.

- la porosité P_w est calculée comme suit :

$$P_w = \frac{M_{air\ sat} - M_{sec}}{M_{air\ sat} - M_{eau\ sat}} \times 100$$



Figure III.29 : Essais de porosité.

III.5.4 Conductivité thermique :

III.5.4.1 Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes cylindriques (\varnothing 160 mm, H 320 mm) sont coupées en 4 petits cylindres (\varnothing 160mm, H 70 mm) et surfacées pour rendre leurs bases planes et perpendiculaires par rapport à la hauteur. Cette planéité a été obtenue à l'aide de la machine de surfacage, Après la rectification, les éprouvettes sont séchées dans une étuve à $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ et prêtes pour l'essai de la conductivité à l'âge 28 et 90jours.



Figure III.30 : Epreuve surfacée.

III.5.4.2 Mesure de la conductivité thermique :

L'essai se fait selon la norme NF EN 993-15 et EN 1745, avec Le CTMETRE qui est élaboré dans le but d'évaluer avec précision les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux homogènes et isotropes. Il se compose de deux éléments qui sont

l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et des sondes (anneau et fil) chargées de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température et chaque sonde permet de réaliser une mesure (l'anneau donne la conductivité thermique et la chaleur spécifique et le fil donne la conductivité seulement).



Figure III.31 : Essais de conductivité thermique.

III.5.5 Perméabilité à l'eau sous pression :

L'essai perméabilité à l'eau a été effectué selon la norme NF EN 12390-8, cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de **24h±2**. L'essai est réalisé sur des éprouvettes à une pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette. Après **24 heures** de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai brésilien). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée.

III.5.5.2 Principe :

De l'eau est appliquée sous pression sur la surface du béton durci. Après rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration de l'eau.

III.5.5.3 Mode opératoire :

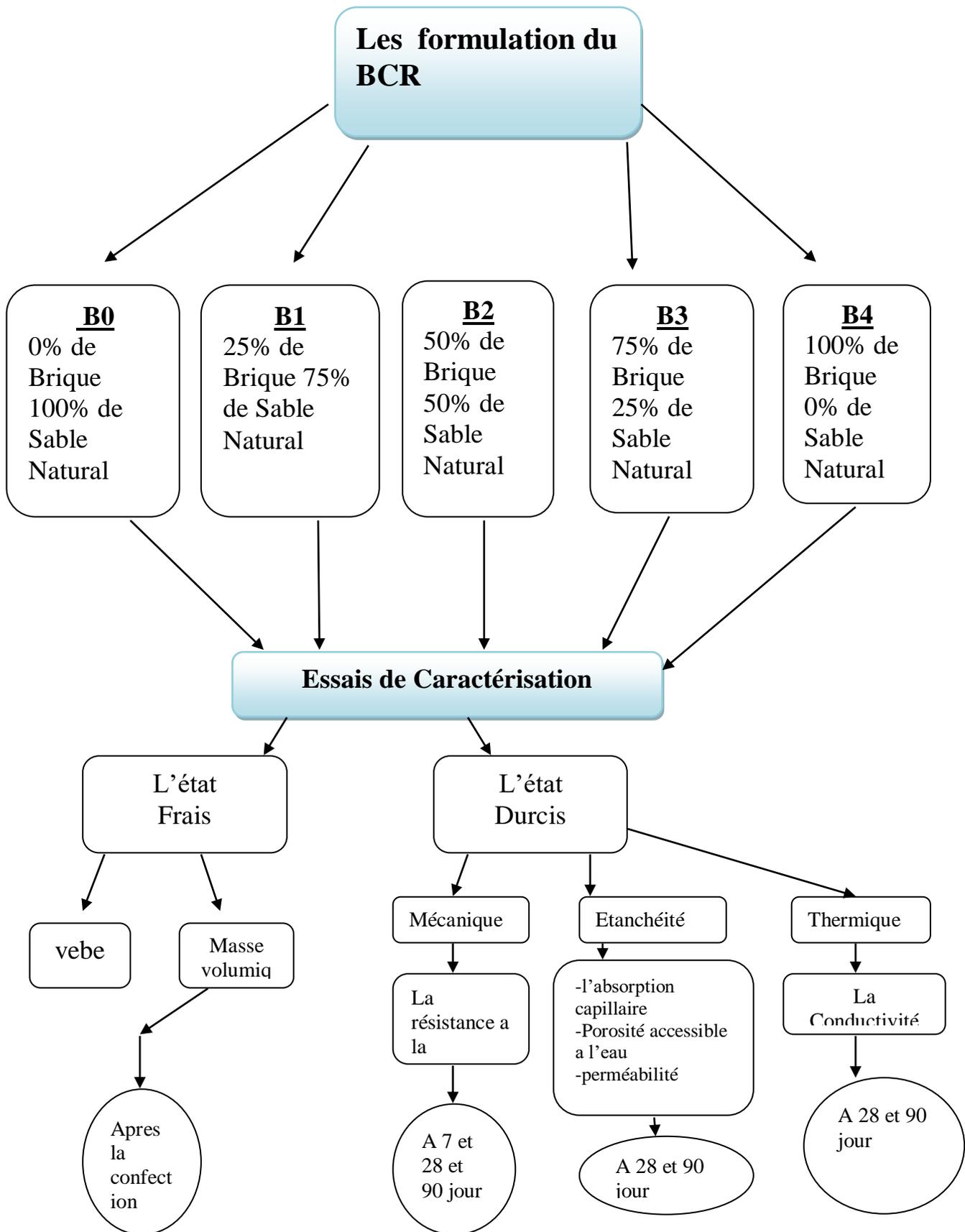
Préparation de l'éprouvette : la surface de l'éprouvette qui reçoit la pression d'eau doit être rendue rugueuse à l'aide d'une brosse métallique immédiatement après de démoulage. Application de la pression d'eau : l'essai doit être pratiqué sur des éprouvettes âgées de 28 et 90 jours, ne pas appliquer la pression d'eau sur la surface d'une éprouvette arasée à la truelle. Placer l'éprouvette dans le dispositif d'essai et appliquer la pression soignée d'eau de (500 ± 50) Kpa pendant (24 ± 2) h. au cours de l'essai, observer régulièrement l'apparence

des surfaces de l'éprouvette d'essai non exposées à la pression d'eau pour noter l'éventuelle présence d'eau. En cas de fuite, s'interroger sur la validité de l'essai de l'eau du réseau.



Figure III 32 : perméabilité a l'eau sous pression.

III.6 Programme expérimental :



Chapitre IV : Résultats Et Interprétation

IV .1. Introduction

Dans ce chapitre on présente l'analyse et l'interprétation des résultats de l'étude expérimentale et qui consiste à voir l'effet de la substitution des sables naturel par des sables de brique sur les propriétés du béton compacte au rouleau BCR pour barrage.

IV .2. Résultats :

IV.2.1 A l'état frais :

IV.2.1.1 Temps de VEBe

Les résultats d'ouvrabilité des BCR formulés sont présentés dans le **tableau IV.1** et la **figure IV.1**. Afin de mieux comprendre l'effet de substitution de brique sur l'ouvrabilité à travers différents pourcentages, on remarque une augmentation relativement faible dans la maniabilité des mélanges BCR25% ,BCR50% , BCR70% , BCR100% par rapport au BCR de référence BCR0. Autrement dit, en augmentant le taux de substitution, tout en gardant le même rapport E/C de 0,858, le temps VEBe reste peu variable. Cette variation peut être attribuée à la forme ainsi que le taux d'absorption des particules de brique. En effet, la brique est de forme angulaire contrairement au sable et absorbe beaucoup plus d'eau, ce qui mène de la perte de maniabilité des mélanges. Il est toute fois à noter que l'effet de perte de maniabilité dû à une grande absorption d'eau de la brique a été relativement atténué par la quantité d'eau ajoutée dans les formulations contenant de le sable de brique (BCR25%, BCR50%, BCR70%, BCR100%) pour compenser la quantité d'eau absorbée par la brique. Il est à noter que toutes les valeurs enregistrées pour les BCR étudiés, variant entre 19 et 25 s restent dans l'intervalle [15 ; 30] toléré pour les BCR de barrage.

Tableau IV.1. Temps de VeBe des mélanges réalisés.

Temps VéBe					
Sable de brique	0	25%	50%	70%	100%
temps(s)	19	19	20	22	25

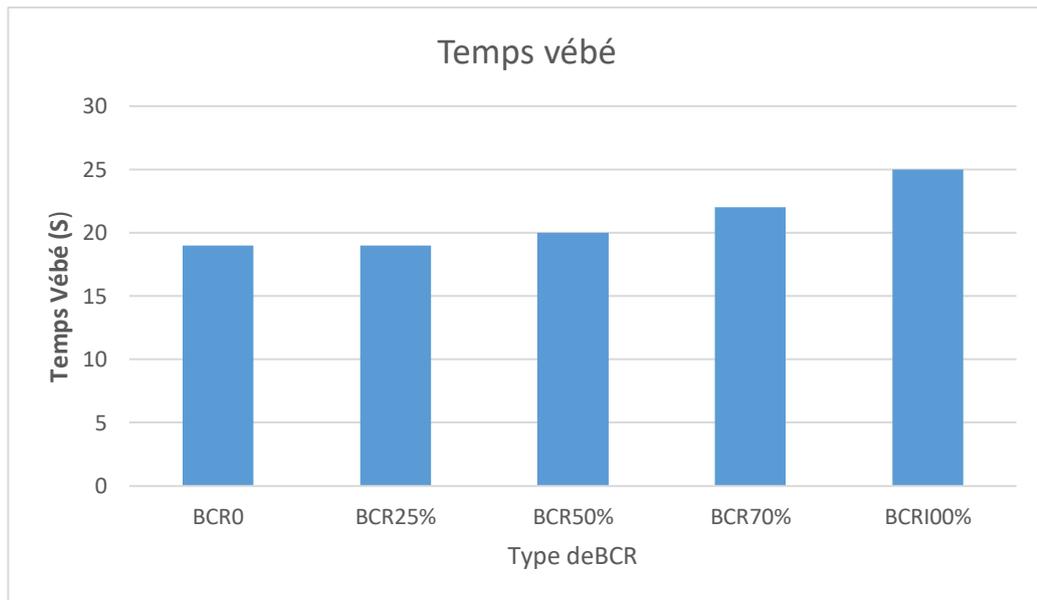


Figure IV.1. Temps VEBE fonction de taux de substitution.

IV.2.1.2 Masse volumique théorique.

Les résultats de la masse volumique des BCR formulés sont présentés dans le [tableau IV.2](#) et la [figure IV.2](#).

De ces résultats, on obtient une diminution de la masse volumique des mélanges BCR BCR25%, BCR50%, BCR70% ; BCR100% respectivement de 2.33%, 4.57%, 5.92%, 5.44% par rapport au BCR de référence BCR0. Cette diminution est très logique et peut être attribuée à la masse volumique de brique qui est inférieure à celle du sable naturel.

Tableau IV.2 Masse volumique des mélanges réalisés.

Mélanges	BCR0%	BCR25%	BCR50%	BCR70%	BCR100%
Substitutions%	0	25	50	70	100
Masse volumique [kg/m ³]	2498,41	2440,28	2384,19	2350,33	2362,43

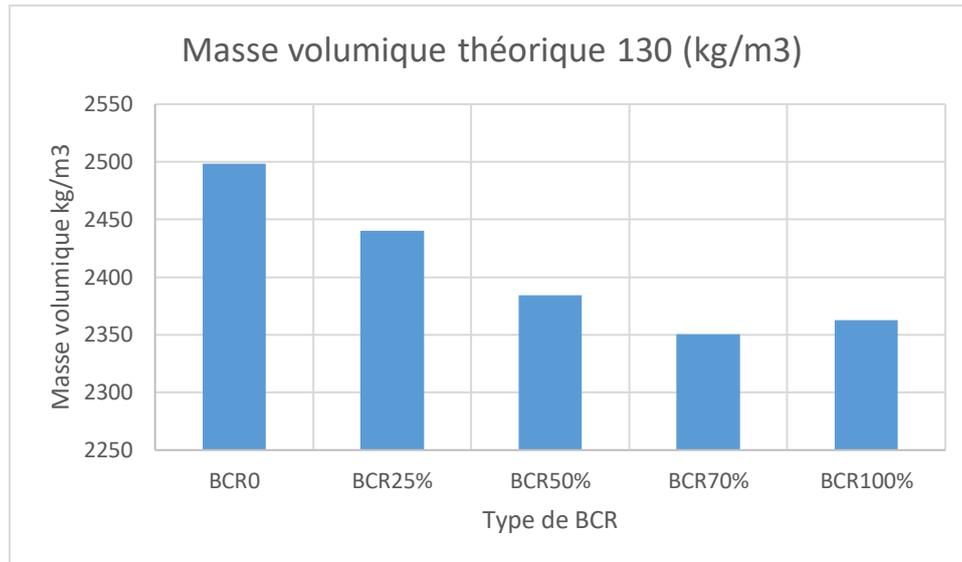


Figure IV.2 : La masse volumique en fonction de taux de substitution

IV.2.2. L'état durcis

IV.2.2.1. La résistance a la compression

Les résultats de résistance à la compression à 7 jours, 28 jours et à 90 jours de cure humide sont présentés dans la figure IV.3 et le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Les résultats de la résistance à la compression.

Type de BCR	7jours	28jours	90jours
BCR0	10,66	12,88	16,66
BCR25%	14,89	20	23,11
BCR50%	11,70	15,56	18,22
BCR70%	10,33	14,78	19,11
BCR100%	10,71	16	21

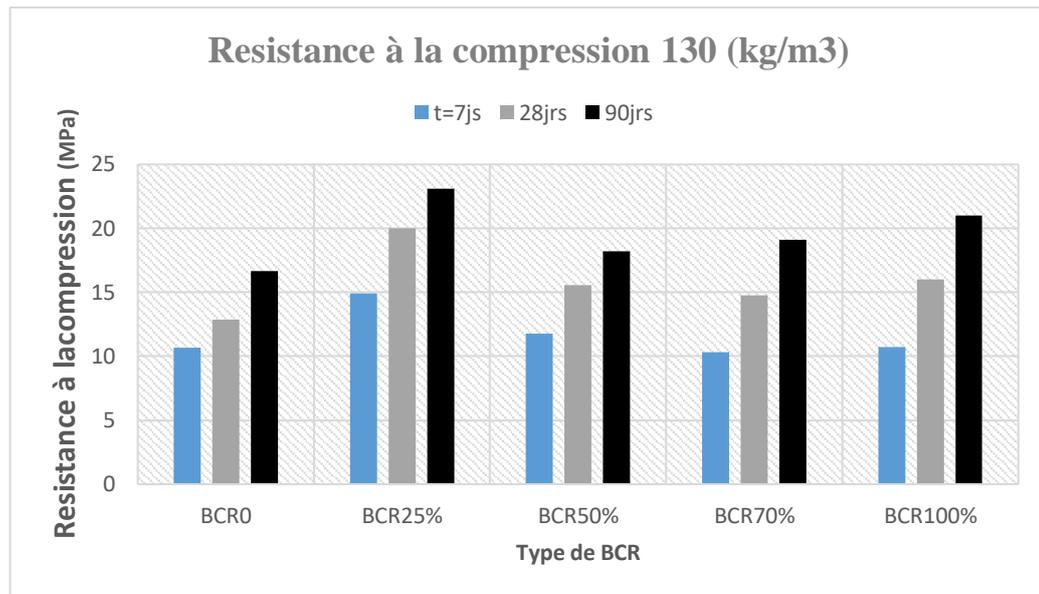


Figure IV.3 Résistance à la compression.

A 7 jours, la résistance des BCR25%, BCR50% et BCR100% à enregistré une augmentation respective de 39,68%, 10,51% et 0,47% par rapport du BCR0. La résistance du BCR70% a diminuée quant à elle 3.08% par rapport au BCR0.

Après 28 jours de cure, tous les BCR avec brique ont enregistré une résistance supérieure à celle du BCR0. Ces augmentations sont 55,28%, 20,81%, 14,75% et 24,22% respectivement pour BCR25%, BCR50%, BCR70% et BCR100%.

A l'âge de 90 jours, la même tendance est observée où on remarque une augmentation dde la résistance de 38,71%, 9,36%, 14,70%, 26,05% pour les BCR25%, BCR50%, BCR70%, BCR100% respectivement.

L'augmentation de la résistance à la compression au fil de temps (7 ,28 et 90 jours), peut être expliquée par le processus continu de l'hydratation. Le gain de résistance des BCR avec sable de brique peut être expliqué d'une part par augmentation de la compacité du mélange granulaire avec sable de brique. D'autre part, vu que le sable de brique a une partie des fines (filler) qui ont une quantité de silice varié entre 40% et 60% qui mené à l'activité pouzzolanique. Comme montre l'étude de Eva et Pavla [66], où ils ont montré que l'incorporation de la poudre de brique augmente la résistance de compression initiale et finale à cause de l'activité pouzzolanique.

IV.2.2.2 Porosité accessible à l'eau :

Les résultats de la porosité à l'eau des BCR formulés sont présentés dans la [figure IV.4](#) et dans le [tableau IV.3](#)

Tableau IV.3 Les résultats de porosité

Type de BCR	28jours (%)	90 jours (%)
BCR 0%	10.90	9.29
BCR 25%	11.34	8.01
BCR 50%	13.28	12.48
BCR 70%	14.837	13.829
BCR 100%	16.86	15.934

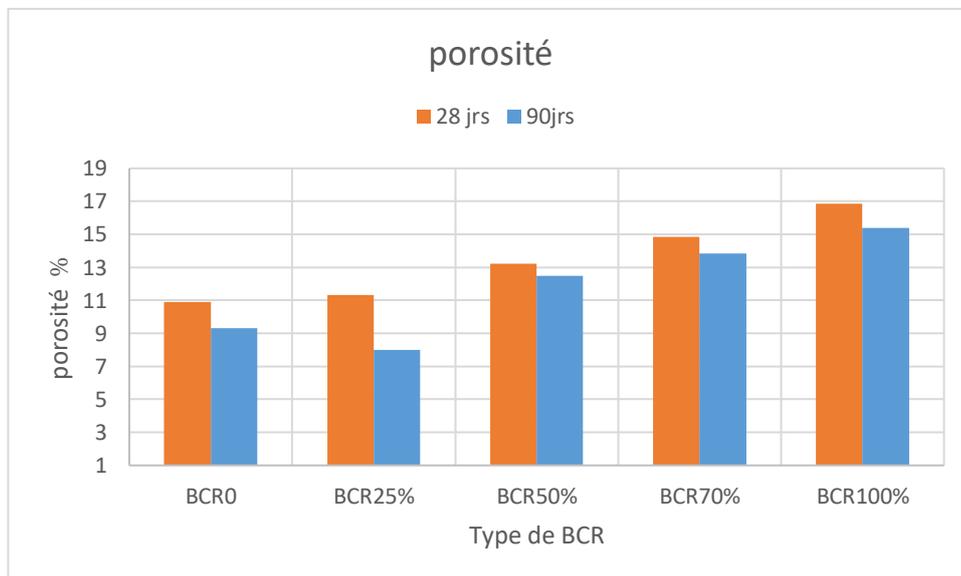


Figure IV.4 : Porosité accessible a l'eau à 28 et 90 jours.

De ces résultats on peut observer après 28 jours de cure une augmentation de la porosité des formulations BCR25%, BCR 50%, BCR70% et BCR 100% par rapport au BCR0% témoin qui sont respectivement 3.94%. 21.28 %. 36.05%. 54.67%.

D'autre part après 90 jours de cure, on obtient une diminution de 13.82% de porosité de BCR 25% par rapport au BCR 0%, par contre on observe une augmentation dans les formulations BCR50% BCR 70% BCR 100% comparé avec le BCR0%, qui sont respectivement 34.33% 48.76% 65.59%.

Cette augmentation de porosité peut être attribuée au caractère poreux des granulats de brique.

IV.2.2.3. Absorption capillaire :

Les résultats de l'absorption capillaire des BCR formulés sont présentés dans les figures IV.5 et IV.6.

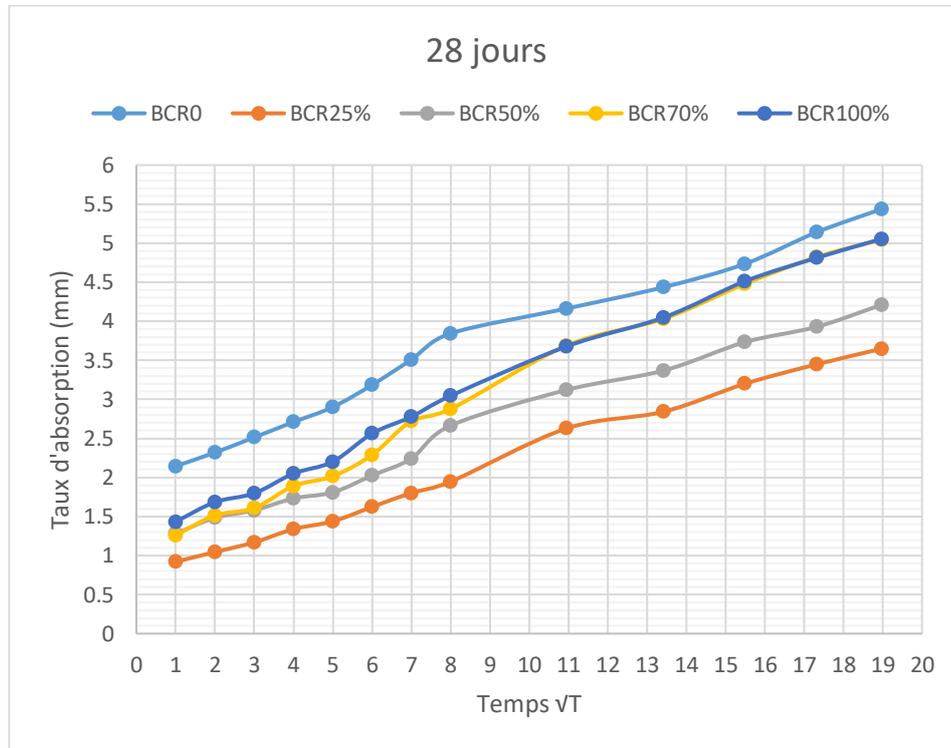


Figure IV.5 Absorption capillaire a 28 jours.

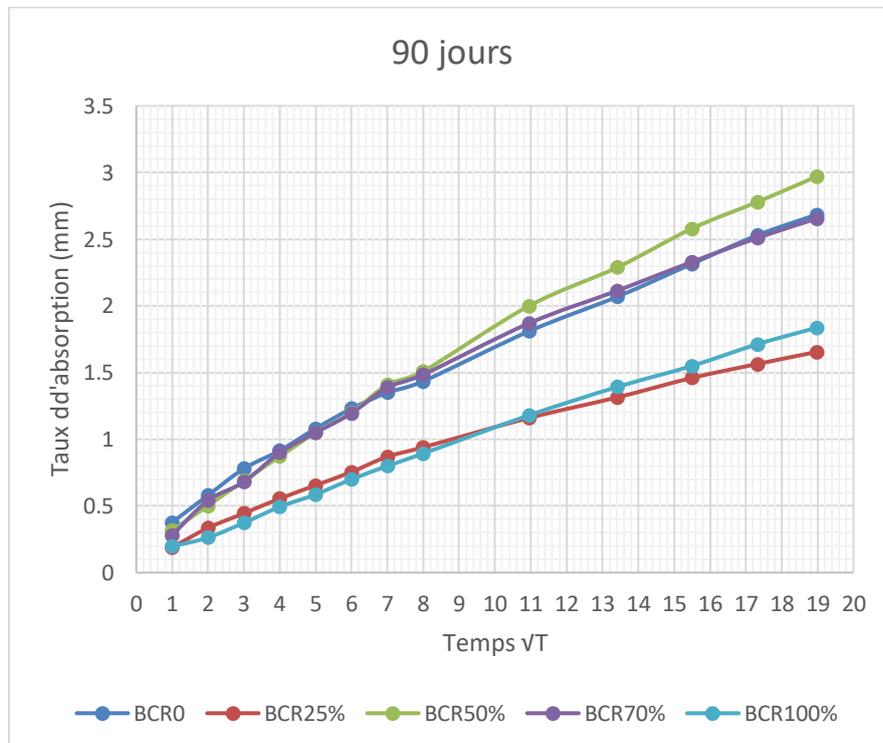


Figure IV.6 Absorption capillaire a 90 jours.

Des figures IV.4 et IV.5, on calculant la pente des tronçons linéaire des courbe d'absorption capillaire, nous avons déterminé la sorptivité des différents BCR. Les résultats de la sorptivité, représenté par le coefficient d'absorption capillaire sont présentés dans le [tableau IV.4](#) et la [figure IV.7](#).

Tableau IV.4 : les résultats de la sorptivité

Type de BCR	28jours (mm/s ⁻¹)	90jours (mm/s ⁻¹)
BCR 0	0.18	0.12
BCR 25%	0.15	0.07
BCR 50%	0.16	0.14
BCR 70%	0.21	0.12
BCR 100%	0.20	0.09

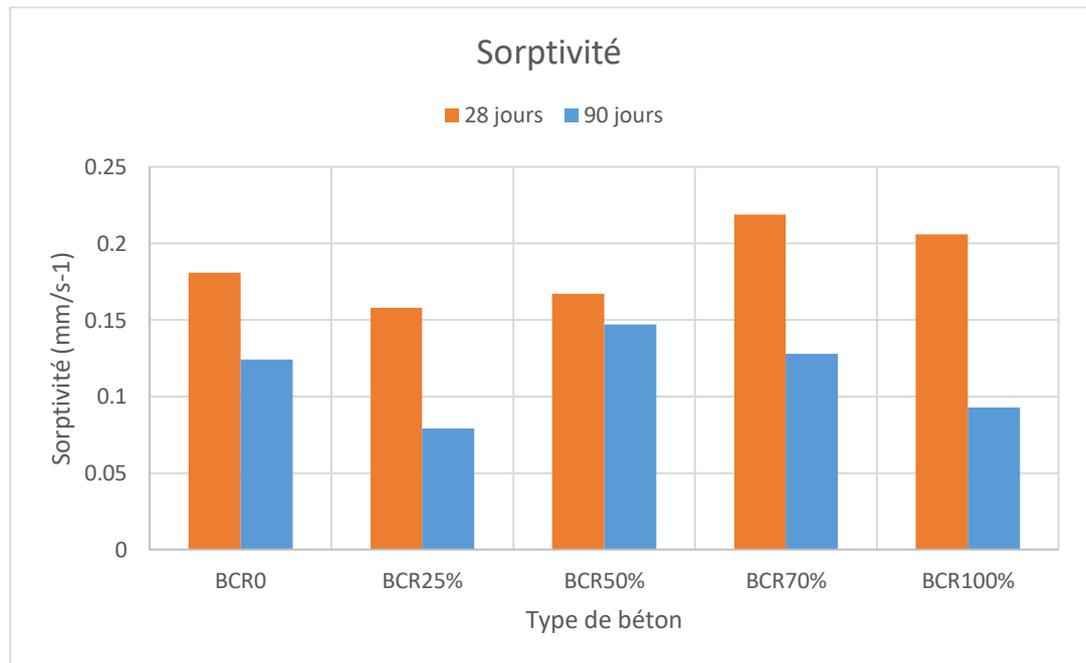


Figure IV.7 Sorptivité des BCR avec et sans brique.

De ces résultats, on peut constater à 28 jours une diminution de 26.44 %, 24.85%, 7.094 % et 5.26 % respectivement pour les BCR 25%, BCR 50%, BCR70% et BCR100% par rapport au BCR0% témoins. A l'âge de 90 jours on observe une diminution de sorptivité des formulations BCR25%, BCR50% et BCR70% de 42.15%. 17.13%.13.73%, respectivement. Par contre on remarque une augmentation de 13.42 % de la sorptivité du BCR 100% par rapport au BCR témoin.

IV.2.2.4 Perméabilité d'eau sous pression :

Les résultats de la perméabilité à l'eau sous pression des BCR à 28 et 90 jours en fonction de taux de substitution de sable naturel par sable de brique recyclée est illustré sur le [tableau IV.5](#) la [figure IV.8](#).

Tableau. IV.5 : Les résultats de perméabilité a l'eau sous pression

Type de béton	Profondeur de pénétration d'eau H (cm)	
	28 jours	90jours
BCR 0%	H =13,4	H=14,25
BCR 25%	H=10,5	H=12,5
BCR 50%	H=8	H=12,1
BCR 70 %	H=7	H=11,5
BCR 100%	H=6,5	H=8

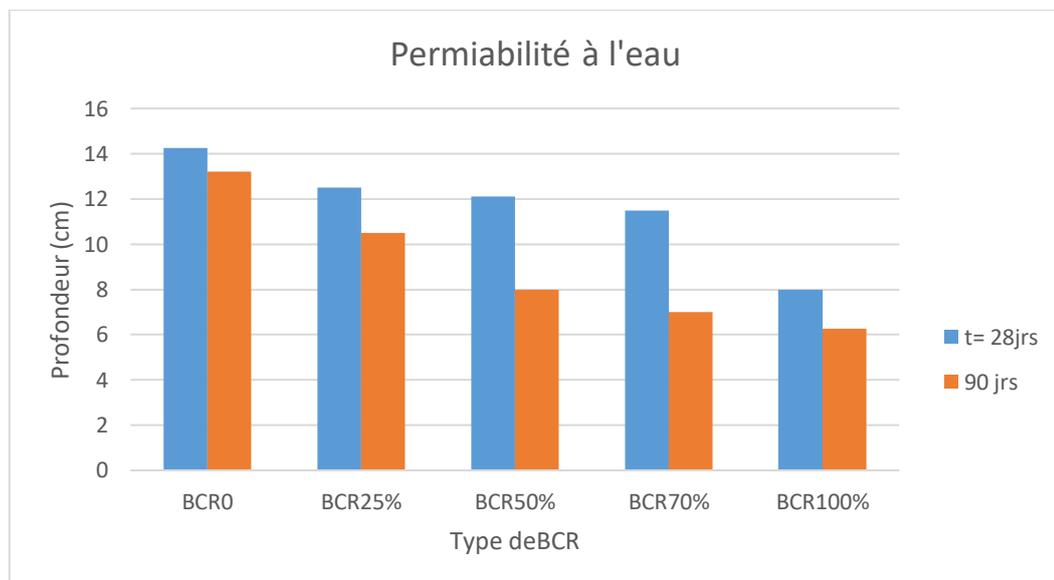


Figure IV.8. Perméabilité d'eau sous pression

De ces résultats, on observe un effet positif de la présence du sable de brique sur la perméabilité à l'eau des BCR. En effet, que ce soit à 28 ou à 90 jours, la profondeur de pénétration d'eau (H en cm) est moins importante pour les BCR avec sable de brique.

Selon la figure IV.8, on observe une diminution de la profondeur de pénétration d'eau avec l'augmentation de taux de substitution de sable de brique recyclée par le sable naturel. A l'âge de 90 jours, en comparaison avec le BCR de référence, cette diminution est de l'ordre de 20.45%, 39.39%, 46.97% et 54.55% respectivement pour 25%, 50%, 70% et 100% de sable de brique recyclée.

Cette tendance décroissante qui est un effet bénéfique sur la durabilité du BCR pour

barrage, peut être expliquée d'une part par le compactage élevé de ce type de béton qui va aider à compléter le maximum des vides. D'autre part, la présence de fines de brique dans le sable (fraction dont le diamètre est inférieur à 80 μm), qui est considérée comme fillers peut contribuer largement dans le processus d'hydratation de la matrice par une réaction pouzzolanique. Les briques, caractérisées par sa quantité d'oxydes, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 (+\text{CaO}) \geq 70 \%$, peut être incluse dans les pouzzolanes et en partie dans les verres en fonction de la quantité de phase amorphe. Rappelons qu'une pouzzolane c'est un matériau silico-alumineux, réagissant chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés de CSH (gel de silicates de calcium hydraté) possédant des propriétés liantes et une porosité très fine (de l'ordre de 10 nm) [53]. La formation de CSH additionnels suite à une réaction pouzzolanique, conduit à une densification de la matrice et donc à une diminution de la perméabilité à l'eau.

IV.2.2.5 Conductivité thermique :

Les résultats de conductivité thermique des BCR étudiés sont présentés dans le [tableau IV.5](#) et les [figures IV.9, IV.10](#).

Tableau IV.5 Les résultats de conductivité

Type de béton	λ (W/m.k)	
	à 28jours	90jours
BCR0	3,03	2,36
BCR25%	2,28	2,72
BCR50%	2,23	2,1
BCR70%	1,99	1,88
BCR100%	1,70	1,61

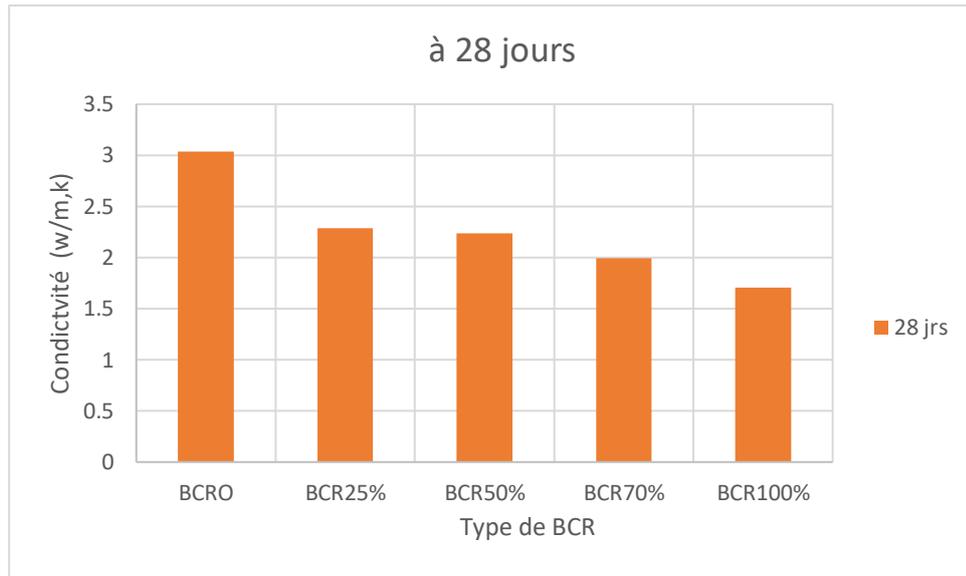


Figure IV.9 : Conductivité thermique à 28 jours.

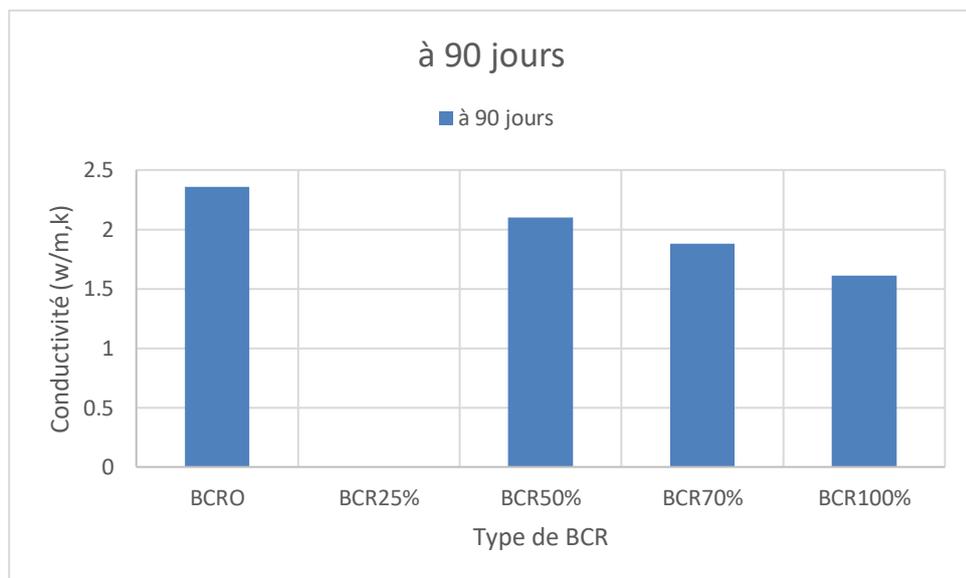


Figure IV.10. Conductivité thermique a 90 jours.

De ces résultats de conductivité thermique, après 28 jours de cure, on peut voir clairement que quand le pourcentage de sable de brique augmente la conductivité diminue. Cette diminution est de 24.45%, 26,26%, 34,31% et 43.72% pour les BCR25%, BCR50%, BCR70% et BCR100% respectivement, comparés au BCR témoin. Après 90 jours de maturation, la même tendance est observée. En effet, mise à part une augmentation recensée de la conductivité pour le BCR25 par rapport au BCR0% (Cette augmentation, estimée à 15.25% est considérée une valeur aberrante suite à nos observation visuelles sur l'état des éprouvettes testées), on observe une diminution de la conductivité pour les autres BCR à

savoir le BCR50%, le BCR 70%, et le BCR100%. Ces diminutions sont de l'ordre de 11,01%, 20,34% et 31,77% respectivement.

Cette tendance est très logique et peut être attribuée à deux phénomènes : premièrement, la porosité interne de la brique qui est assez importante et qui engendre un ralentissement de la propagation de la chaleur dans le matériau BCR. D'autre part le matériau brique a lui-même un coefficient de conductivité très faible, de l'ordre de 0.9 W/m.k, ce qui contribue nettement à abaisser la conductivité du BCR. Cela effet est bien sûr proportionnel au pourcentage de la brique dans le BCR.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du remplacement de sable de brique recyclé par le sable naturel sur la résistance à la compression et quelques propriétés d'étanchéité et thermique des BCR pour barrage. Les résultats obtenus montrent que :

- La présence de sable de brique recyclé a conduit à une légère diminution du temps VEBE des BCR, avec l'augmentation des taux de substitution. Cependant, le temps VEBE reste peu variable et répond largement aux exigences de la gamme des BCR pour barrage.
- L'incorporation du sable de brique a donné un effet mitigé à court terme (7 jours) et un effet positif sur la résistance en compression à moyen et à long terme (28 et 90 jours). Les meilleures performances, à tout âge ont été enregistrées pour une substitution de 25% de sable.
- Une diminution de la profondeur de pénétration de l'eau est remarquée en augmentant le taux de substitution de sable de brique recyclé. Cela est dû au processus d'hydratation du ciment continu et à l'effet pouzzolanique.
- Le sable de brique recyclé affecte négativement la porosité du BCR. Une augmentation de la porosité a été constatée avec l'augmentation du taux de substitution du sable de brique recyclé.
- Le sable de brique recyclé affecte négativement la sorptivité des BCR à moyen terme. A long terme (90 jours), et à jusqu'à 50% de sable de brique l'effet sur la sorptivité est positif.
- Une diminution de la conductivité thermique est remarquée en augmentant le taux de substitution de la brique .Cela est dû à la à l'augmentation de la porosité du BCR en présence de la brique

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le béton compacté au rouleau BCR (pour barrage) est reconnu en tant que matériau économique et durable avec une qualité de sa mise en œuvre. Il est toutefois nécessaire à préciser que ces propriétés (mécaniques, physiques ou thermiques) sont très sensibles à sa composition (Dosage et type de ciment, addition et mélange granulaire). Les chercheurs en génie civil ont trouvé que les déchets de brique pouvaient être une solution pour remplacer les sables naturels. Le remplacement des sables de brique ca donne l'avantage de pénurie les déchets à l'environnement. Notre recherche expérimentale a été effectuée pour étudier l'effet des sables de brique recyclée sur les propriétés mécaniques, thermiques et d'étanchéités. Les pourcentages de sable de brique utilisée sont 25%, 50%, 70% et 100%. Les résultats obtenus nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La présence de sable de brique recyclé a conduit à une légère diminution du temps VEBE des BCR, avec l'augmentation des taux de substitution. Cependant, le temps VEBE reste peu variable et réponds largement aux exigences de la gamme des BCR pour barrage.
- L'incorporation du sable de brique a donné un effet mitigé à court terme (7 jours) et un effet positif sur la résistance en compression à moyen et à long terme (28 et 90 jours). Les meilleures performances, à tout âge ont été enregistrées pour une substitution de 25% de sable.
- Une diminution de la profondeur de pénétration de l'eau est remarquée en augmentant le taux de substitution de sable de brique recyclé. Cela est dû au processus d'hydratation du ciment continu et à l'effet pouzzolanique.
- Le sable de brique recyclé affecte négativement la porosité du BCR. Une augmentation de la porosité a été constatée avec l'augmentation du taux de substitution du sable de brique recyclé.
- Le sable de brique recyclé affecte négativement la sorptivité des BCR à moyen terme. A long terme (90 jours), et à jusqu'à 50% de sable de brique l'effet sur la sorptivité est positif.
- Une diminution de la conductivité thermique est remarquée en augmentant le taux de substitution de la brique .Cela est dû à la à l'augmentation de la porosité du BCR en présence de la brique

Enfin nous pouvons dire que la formulation de BCR pour barrage avec une substitution partielle ou même totale du sable naturel par du sable de déchet de brique est possible sans affecter considérablement les propriétés de résistance et de durabilité des BCR. Il est même possible d'améliorer sensiblement ces propriétés en choisissant un taux de substitution optimale avec une conception optimisée.

Référence

Et Bibliographique

1. (choi 2005) : choi, Y.K.H, K.D (2005). RCC/soir cement; what's the difference? Journal of materials, en civil engirinnng 17 (4) -371-378.
2. Tremblay's – (1997),, méthodes de formulation de bétons compactés au rouleau et effet des agents entraîneur d'air sur la maniabilité. Université de laual.
3. J. marchaud, R.G.g.E ouellet and s.lepag (1997) miscture propositioning of roller compacted -A revieu.
4. ACI committee (2001). Report on roller- compacted concreate pavements – ACI 325-10R-95'reapproved 2001).
5. Forbes B.B.a.B.A- (2007) ahigh RCC dam with on RCC dams.
6. ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT: conception et réalisation des revêtement rn BCR 2001.
7. Grauthér P. et marchand J. (2004) conceprion et realisation de revêtements en béton cpmacté au rouleau au québec. Canada , pagination multiple.
8. Grauthjier P, marchand J Boi.
9. (ASTM-c469 (2011). « standard tensile test method for splitting for splitting strength of cylindrical concrete specimens. » AMIRICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS)
10. Iluang , Y.H (2004), pavement Avalysis and design second edition; university of Kentucky.
11. ZDIRIM (2008), etude de formulation et de comportement mécanique des bétons compactés au de gissement, l'université de tunis el manar (tunisie) l'ecole nationale supérieure des mines de douai, 2008, 244.
12. ZDIRIM (2008), etude de formulation et de comportement mécanique des bétons compactés au de gissement, l'université de tunis el manar (tunisie) l'ecole nationale supérieure des mines de douai.
13. ERES, C (1998) revien of life- cycle conting analysis procedures étude faite pour le ministère des transports de l'ontario, canada.
14. "Béton p rovincial," 1960.
15. A. B. D. E. M. Locaux, "Publication List Book Contents," *Concrete*.
16. Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes. Chaussée en béton de ciment. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France, pp. 29-47 et 112-133.
17. Belaïd M., (2004), Etude des Matériaux du Béton Compacté au Rouleau et du remblai dur, Annales de l'Equipement, Volume XIV, N° 02, Tunisie.
18. G. abdellah, ghezouli, A. rahali, L etude des caractéristique rhéologique et mécanique d'un mortier auto- plaçant a base de fillers calaire. Mémoire de master 2, faculté de technologie, université de m'sila2019.
19. ZDIRI, Mustapha NEJI, Jamel BEN OUEZDOU, Monji EL OUNI Mohamed Ridha : Formulation et Simulation des bétons compactés au rouleau : application aux matériaux de gisement locaux, Colloque CMEDIMAT 2005.
20. R. Karsten, H. Otmar, revêtements routiers en béton compacté au rouleau : expériences Faites en Allemagne 2006.

21. M. Löfsjögård, “Functional Properties of Concrete Roads – Development of an Optimisation Model and Studies on Road Lighting Design and Joint Performance Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology,” 2003.
22. “Frost Durability of Frost Durability of.”
23. D. U. D. D. E. Maîtrise, “National Library of Canada to,” *Glass*, no. October, 1998.
24. S. Aissa, “Etude du comportement d’un béton compacté au Rouleau (BCR) à base des granulats recyclés.,” 2018.
25. F. Der Zementindustrie, *Verein Deutscher Zementwerke e.V. 125 Jahre Forschung für Qualität und Fortschritt.*
26. E. Betons, “Zusatzstoffe auf die Dichtigkeit gegenüber organischen Flüssigkeiten und aufweitere.”
27. K. Hermann, “Les ajouts : les fillers,” *Bull. du Cim.*, vol. 63, 1995.
28. A. I. T. Ahmed, “Le béton compacté au rouleau (BCR) à base de filler calcaire et ciment,” 2019.
29. A. U. Rouleau, P. A. R. Addition, D. E. C. D. E. Ciment, and D. Un, “D’un de de par de de&lange,” 1996.
30. G. Calis, S.A. Yıldız, Investigation of roller compacted concrete: Literature review, *Challenge Journal of Concrete Research Letters*. 10 (2019) 63.
<https://doi.org/10.20528/cjcr.2019.03.003>.
31. ACI Committee 207, Roller-Comacted Mass Concrete, American Concrete Institute, U.S.A, 1999.[http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20207.5R-11%20Report%20on%20Roller Compacted%20Mass%20Concrete_MyCivil.ir.pdf](http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20207.5R-11%20Report%20on%20Roller%20Compacted%20Mass%20Concrete_MyCivil.ir.pdf).
32. U. Mohamed, E. E. L. Ibrahim, and B. Bou, “Etude de l ’ influence des ajouts minéraux sur lecomportement physico- mécanique des BCR a base des granulats recyclés.”
33. “NQ80273.pdf.” .
34. D. E. S. Facult *et al.*, “Valorisation des granulats de béton recyclé et des granulats de verrerecyclé dans les pavages industriels en béton compacté au rouleau,” 2016.
35. A. A. U. T. Diarniadio-mbour, “Ge 485 ,” 2007.
36. P.D. Tennis, M.L. Leming, D.J. Akers, *Pervious Concrete Pavements*, (n.d.) 32.
37. Mohd. Ahmed, J. Mallick, Mohd. Abul Hasan, A study of factors affecting the flexural tensile strength of concrete, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 28 (2016) 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.04.001>.
38. C. Chhorn, S.J. Hong, S.W. Lee, Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 5 (2018) 215–223.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.09.002>.
39. J. Kalla, S. Karri, K.V. Sathi, Experimental analysis on modulus of elasticity of slag based concrete, *Materials Today: Proceedings*. (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.537>.
40. A.T. Amlashi, S.M. Abdollahi, S. Goodarzi, A.R. Ghanizadeh, Soft computing based formulations for slump, compressive strength, and elastic modulus of bentonite plastic concrete, *Journal of Cleaner Production*. 230 (2019) 1197–1216.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.168>.

41. B. Bissonnette, M. Pigeon, Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations, (2000) 108–111.
 42. D. Walid, L. Nordine, K. Abdelhafid, and O. Mohammed, “L ’ EFFET DES FILLERS CALCAIRE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET L ’ ABSORPTION CAPILLAIRE DU B ETON Constituants K₂O MgO So₃ LOI Ciment (%) Fillers calcaire Masse volumique Surface spécifique de Début de prise (min) Béton Ciment E / L Fillers Ci,”no. December 2017, 2016.
 43. Desmyter J., Van Dessel J., Blockmans S., “The use of recycled concrete and masonry aggregates in concrete: Improving the quality and purity of aggregates. In: Proceedings of the international conferenc, Dundee University, 1999, pp. 139–49.
 44. Ambroise J., Maximilien S., Pera J., “Properties of metakaolin blended cements”, *Advanced Cement Based Materials*, 1994, Vol. 1, N° 4, pp. 161–168.
 45. Kibriya T. and Speare P.R.S., “The use of crushed brick coarse aggregate in concrete”, In: Proceedings of the international conference, Dundee University; 1996, pp. 495–503.
 46. Giovanni piers la brique fabrication et traductions constructives Edition EYROLLES (édition EYROLLES) 2005.
 47. BARKAT ABDEREZZAK. : « valorisatioon des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton ». Magister en génie civil Filière : Aménagement Hydraulique et Génie Civil.Ouargla :Université KASDI MERBAH ,05/11/2006
 48. Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton,CBD-215-F,juin1981.
 49. M. karatas, K, turk, M. acikgence , and Z. C. ulucan, Effect of elazing region waste brivk powder on strength and viscosity properties of self compacting mostar, international congress on advances in civil engineering, Trabzon turkey, vol 37, no, September, PP.27-30,2010.
 50. Composition of bricks -function og ingredients- civil engineering-
[Http://civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/132-brick-composition-ingredients-with-functions](http://civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/132-brick-composition-ingredients-with-functions).
 51. (O.) (Buchsenschutz) and O. Buchsenschutz, “Fabrication de la céramique,” *des Gaulois aux Gall.*, pp. 149–159.
 52. L. Horckmans, P. Nielsen, P. Dierckx, and A. Ducastel, “Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 140. pp. 297–304, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.025.
- M. Charai, H. Sghiouri, A. Mezrhab, M. Karkri, and K. El Hammouti, “Comparative study of a clay before and after fired brick-making process,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 31, pp. S103–S108, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.250.

53. Grellier, D. Bulteel, M. El Karim Bouarroudj, S. Rémond, Z. Zhao, and L. Courard, "Alternative hydraulic binder development based on brick fines: Influence of particle size and substitution rate," *J. Build. Eng.*, vol. 39, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102263.
54. G. Baronio and L. Binda, "Study of the pozzolanicity of some bricks and clays," *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 1, pp. 41–46, Feb. 1997, doi: 10.1016/S0950-0618(96)00032-3.
55. Anonyme, "Terres cuites et Maçonneries Breve historique Quelques repères," pp. 1–33.
56. B. Definition *et al.*, "Manuel maçonnerie de terre cuite 01/05/2005," 2005.
57. SPERANDIO K : identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.
58. José Marcos Ortega et all, 2018 « Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars », *Construction and Building Materials* Volume 182 (2018) 691–702.
59. J. M. Khatib, "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 763–769, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.017.
60. P.B. Cachim "Mechanical properties of brick aggregate ," *Constr .Build .Mater .*, vol .23,no .3, pp.1292-1297,Mar .2009,doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT .2008.07.023.
61. F. Bektas, K wang, and H, ceylan, effects of crushed clay brick aggregate on mortar duravlity, *constr build master*, vol 23, no5, pp. 1909-1914, 2009, doi 10.1016/j.conbuildmat. 2008.09.006.
62. J.M khatib, properties of concrete incorporating fine recycled aggregate Elsevier, vol 35, no June 2004, pp.763-769, 2005, doi: 10.16.16/jcomcores.2004.06.017.
63. Frías M., de Rojas M.I.S., Cabrera J., "The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars", *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, N° 2, pp. 209–216.
64. M. si-ahmed and s. kenai? bechaboir of self- compacting mortars based on waste brick powder, *curr, master, sci.* vol 13, no 1, pp, 39-44, 2020. doi: 10.2174/2666145413666200219091459.
65. JiahuShaoet all, 2019 « Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes », *Construction and Building Materials* Volume 213, pp 209-215.
66. N.Eva et R.Pavla-pozzolanic proppetier of brick powders ans their effect on the CAS v.v.i.kalovopoiska 147.612.64 Bmo, Czech Republic

NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fût de 230 kg ▪ Cubi de 1100 kg ▪ Vrac
Aspect / Couleur	Liquide brun clair à foncé
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact.
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Densité	1,06 ± 0,01
Valeur pH	4,5 ± 1,0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE et NF selon la norme NF EN 934-2 tab 3.1 et 3.2.
PV CNERIB : DTEM/108/2017

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage

Plage de dosage : 0,2 à 3,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa
16111 Les Eucalyptus
ALGERIE
Tél.: 0 21 50 16 92 à 95
Fax: 0 21 50 22 08
dza.sika.com



Notice produit
Sika® ViscoCrete® TEMPO-12
Septembre 2021, Version 01.02
021301011000000110

SikaViscoCreteTEMPO-12-fr-DZ-(09-2021)-1-2.pdf



