

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



Faculté de technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Civil

Option : matériaux en génie civil

INFLUENCE DE DECHETS DE BRIQUE RECYCLE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUE DES BETONS COMPACTE AU ROULEAU BCR POUR BARRAGE

Par

- **Rahmani Oussama**
- **Mimoune Mohamed Djamel Eddine**
- **Bouzina Abdelhakim**

Devant les jury composé de :

Docteur Siahmed Mohamed	Université de Blida1	Président
Docteur Bensaci Hamza	Université de Blida1	Examineur
Docteur HADJ-SADOK Ahmed	ENSH	Encadreur
Boulghebar Khadidja	Université de Blida1	Co-encadreur

Blida 19 Novembre 2022

Remercîment

Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus profonds à Monsieur le Professeur HADJ SADOK Ahmed de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique ENSH, pour avoir dirigé ce travail de recherche. Nous lui exprimons ici notre profond respect et notre profonde gratitude.

Je voudrais également exprimer mes remerciements à Madame la Co-promotrice Khadidja Boulghebar co-directrice et l'institutrice de l'université de Blida 1 Pour partager ses connaissances et nous donner l'opportunité de mener cette recherche.

Nous tenons également à remercier tous les ingénieurs et techniciens de l'ENSH laboratoire pour leur contribution à la concrétisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir bien voulu examiner notre travail.

RESUME

Le béton est le matériau le plus couramment utilisé dans la construction. Les granulats représentent 75 % du volume de béton. Pour cette raison, nous sommes en train d'étudier comment valoriser les déchets de briques et utiliser dans le béton afin de préserver l'environnement et les matières premières. Le recyclage des déchets en générale est devenu aujourd'hui la bonne solution qui peut donner des ressources renouvelables et durables.

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 sur leur résistance mécanique et la durabilité. Dans notre étude expérimentale les deux BCR formulés avec quatre graviers (3/8, 8/15, 15/25, 15/50) un sable naturel avec des dosages en ciment de 130 et 170 kg/m³ et des rapports E/C de 0,85 et 0,75. 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, résistance à la traction par fendage, la porosité, et la perméabilité à l'eau) ont été analysés.

Les résultats obtenus ont montré que l'incorporation du sable de brique a donné un effet positif sur la résistance en compression et celle de la traction par fendage à moyen et à long terme (28 et 90 jours), notamment pour une teneur de substitution de 25%. La présence de sable de brique a engendré un effet positif sur la profondeur de pénétration de l'eau des BCR. Par ailleurs, le sable de brique recyclé affecte négativement la porosité du BCR. Enfin, nous pouvons dire qu'il est parfaitement possible de formuler des BCR pour barrage à base de sable de brique.

المخلص

الخرسانة هي المادة الأكثر استخدامًا في البناء. الركام يمثل 75٪ من حجم الخرسانة. لهذا السبب، ندرس كيفية استعادة نفايات الطوب واستخدامها في الخرسانة من أجل الحفاظ على البيئة والمواد الخام. أصبحت إعادة تدوير النفايات بشكل عام الآن الحل الصحيح الذي يمكن أن يوفر موارد متجددة ومستدام.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة استرجاع مخلفات الطوب على شكل رمل في الخرسانة المضغوطة. فضلًا عن تأثيرها على القوة الميكانيكية والمتانة. في دراستنا التجريبية، تمت صياغة اثنين من الخرسانة المضغوطة بأربعة أنواع من الحصى (50/15 25/15 15/8 8/3) رمل طبيعي بجرعات إسمنتية 130 و 170 كجم / م³ ونسبة $\frac{\text{ماء}}{\text{اسمنت}}$ بلغ 0.85 و 0.75 تم استبدال الرمل الطبيعي برمل الطوب المعاد تدويره بمعدلات 25 ، 50 ، 70 و 100٪. وبالتالي ، فإن تأثير الاستبدال على خصائص أسطوانة الخرسانة المضغوطة في الحالة الجديدة (حسب الوقت المعين عبر جهاز VEBE) والحالة الصلبة تم تحليلها عبر (مقاومة الانضغاط وقوة الشد عن طريق الانقسام والمسامية ونفاذية الماء). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن دمج رمل القرميد كان له تأثير إيجابي على مقاومة الانضغاط وشد الشد على المدى المتوسط والطويل (28 و 90 يومًا). على وجه الخصوص من اجل المحتوى للبدال المقدر بنسبة 25٪.

كان لوجود رمل الطوب تأثير إيجابي على عمق نفاذ المياه لأسطوانة الخرسانة المضغوطة. علاوة على ذلك ، فإن رمل الطوب المعاد تدويره يؤثر سلبيًا على مسامية لأسطوانة الخرسانة المضغوطة. أخيرًا، يمكننا القول أنه من الممكن صياغة على نحو تام الاسطوانة الخرسانة المضغوطة للسدود بالرمل الطوب.

Concrete is the most commonly used material in construction. Aggregates represent 75% of the volume of concrete. For this reason, we are studying how to recover waste bricks and use in concrete in order to preserve the environment and raw materials. Recycling waste in general has now become the right solution that can provide renewable and sustainable resources.

The main objective of this research is to study the recovery of waste bricks as sand in roller-compacted concrete "RCC", as well as their effect its mechanical strength and durability. In our experimental study the two RCC formulated with four gravels (3/8, 8/15, 15/25, 15/50) , natural sand with cement dosages of 130 and 170 kg/m³ and W/C ratios of 0.85 and 0.75, Natural sand was substituted with 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, tensile splitting strength, porosity, and water permeability) RCC were analyzes.

The results obtained showed that the incorporation of brick sand gave a positive effect on the compressive strength and that of the tensile splitting in the medium and long term (28 and 90 days), in particular for a substitution content of 25%. The presence of brick sand had a positive effect on the water penetration depth of the RCC. Otherwise recycled brick sand negatively affects the porosity of RCC. Finally, we can say that it is perfectly possible to formulate BCRs for dams based on brick sand.

Liste d'abréviations et notations

BCR : béton compacté au rouleau.

RCD : Rolled compacted concrete.

C3S. Silicate tricalcique (alite).

C2S : Silicate bicalcique (belite)

C4AF. Aluminate-ferrite tetracalcique

CaCO₃. Carbonate de calcium.

CSH : Silicate de calcium hydraté.

CaSO₄ : Gypse

Ca(OH)₂ : Portlandite.

CPA-CEM I, CEM II : Ciment portland avec ajout

SP. Super plastifiant.

Mf : Un module de finesse.

P_{app} : masse volumique apparente.

P_{abs} : masse volumique absolue.

ESP : Equivalent de sable avec le piston.

ESV : Equivalent de sable visuelle

P(%) : Propreté des graviers.

ρ_{moy} : la masse volumique moyenne.

F1, F2, F3, F4 : Les formulations réalisées

G1 . gravier (3/8).

G2 : gravier (8/15)

G3 : gravier (15/25).

G4 : gravier (25/40).

Rc_{moy} : la résistance q la compression moyenne

C_{moy}. la conductivité thermique moyenne.

P_w : porosité accessible a l'eau.

Cai : absorption d'eau par unité de surface S . coefficient d'absorption.

λ : la conductivité thermique.

ρ_d : densité sèche.

ρ_h : densité humide maximale mesurée.

ω : teneur en eau réelle.

ES : L'équivalent de sable au piston.

ES' : L'équivalent de sable visuel.

C : la compacté

Vs: Volume des solides.

VT : Volume total.

Fc : est la résistance en compression, exprimée en méga pascals.

F : la charge maximale, exprimée en N.

Ac : l'aire de la section de l'éprouvette..

σ_{tm} : contrainte de traction

Frup : la Force de rupture

D : diamètre de l'éprouvette et L sa longueur.

P : La porosité

Liste des figures

Figure I.1 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA.....	23
Figure I.2 : Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada.....	24
Figure I.3 : Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada.....	24
Figure I.4 : Détermination du volume de pâte minimal.....	30
Figure I.5 : Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR(Marchand et al., 1997 Gauthier & Marchand, 2001).....	32
Figure I.6 : Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001).....	32
Figure I.7 : Relation entre la masse volumique des BCR et le rapport V_p/V_{vc}	36
Figure I.8 :Effet du dosage en ciment sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression à 28 jours.....	37
Figure I.9 :Effet du rapport E/C sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression à 28 jours.....	37
Figure I.10 :Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons pour différent dosage en ciment.....	38
Figure I.11 :Absorption d'eau capillaire des bétons pour différent rapport E/C ($C=350\text{kg/m}^3$).....	39
FigureII.1 :Argile pour la formation de briques.....	42
Figure II.2 : Chaux en poudre.....	43
Figure II.3 :Poudre d'oxyde de fer	43
Figure II.4 : extraction de l'argile.....	44
Figure II.5 : Stockage de l'argile.....	44
Figure II.6 :extraction et stockage de l'argile extraction et stockage de l'argile.....	46
Figure II.7 : Emballage de briques.....	48
Figure II.8 :procédé général de fabrication de la brique.....	48
Figure II.9 ;Fluidité des mortiers à base de différents taux de substitution de sables par les DB.....	50
Figure II.10 :Evolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats de brique réfractaire en fonction de la température.....	50
Figure II.11 : Effet des déchets de brique sur la résistance à la compression des mortiers..	51
Figure II.12 :Résistance à la traction à 28 jours de durcissement.....	52
Figure II.13 : graphe de Porosité accessible à l'eau.....	53

Figure II.14 Expansion du mortier soumis aux cycles gel-dégel.....	54
Figure II.15 :Effet des déchets de brique sur le retrait des barres de mortier.....	55
Figure III.1 : les sables utilise S1 (0/1) et S2 (0/6).....	59
Figure III.2 : déchets de brique.....	60
Figure III.3 : Sable de brique fin et grossie.	61
Figure III.4 :Courbe de l'analyse granulométrique des sables.....	62
Figure III.5 : l'appareil utiliser pour l'essai d'analyse granulométrie	62
Figure III.6 : Essai de la masse volumique apparente.....	64
Figure III.7 :Essai d'équivalent de sable.....	67
Figure III.8 : Les graviers utilisés.....	68
Figure III.9 : Résultats d'analyse granulométrique.....	68
Figure III.10 : Essai de la granulométrie d'un gravier	70
Figure III.11 : masse volumique de gravier.....	70
Figure III.12 : Fillers calcaires.....	71
Figure III 13 :Granulométrie du filler calcaire.....	73
Figure III.14 : Mortier de ciment.....	74
Figure III.15 : Courbes représentant la granulométrie des mélanges choisit	75
Figure III.16 : Appareil de compactage	76
Figure III.17 : composante de l'appareille de compacité.....	76
Figure III.18 : séquence de malaxage du béton.	79
Figure III.19 : Appareille VEBE.....	81
Figure III.20 : schéma l'appareille vebe.....	81
FigureIII.21 : compactage de béton BCR.....	83
Figure III.22 : Stockage des éprouvette	84
Figure III.23 : L'écrasement des eprouvettes.....	86
Figure III.24 : écrasement d'une éprouvette cylindrique par l'essai de traction par fendage..	88
Figure III.25 : l'essai de traction par fendage.....	88
FigureIII.26 :Appareil de perméabilité.....	89
Figure III.27 :des éprouvettes écraser d'âpre essai traction par fendage pour mesure de pénétration d'eau.....	90
Figure III.28 : schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pres.....	90
Figure III.29 : la pareille de porosité accessible a l'eau.....	91

Figure IV.1 : Temps vébé en fonction de taux de substitution pour le dosage 130 (kg/m ³) et E/C=0.85.....	96
Figure IV.2 : Temps vébé en fonction de taux de substitution pour le dosage 170 (kg/m ³) et E/C=0.75.....	96
Figure IV.3 : masse volumique de béton en fonction de taux de substitution pour dosage 130 (kg/m ³).....	97
Figure IV.4 : masse volumique de béton en fonction de taux de substitution pour dosage 170 kg/m ³	97
Figure IV.5 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de pourcentage de substitution pour le dosage 130kg/m ³ et E/C=0.85.....	99
Figure IV.6 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de pourcentage de substitution pour le dosage 170kg/m ³ et E/C= 0.75.....	99
Figure IV.7 : Evolution de la contrainte de traction par fendage en fonction de pourcentage de substitution pour dosage 130kg/m ³ et E/C=0.85.....	101
Figure IV.8 : Evolution de la contrainte de traction par fendage en fonction de pourcentage de substitution pour dosage 170kg/m ³ et E/C=0.75.....	102
Figure IV.9 : perméabilité à l'eau en fonction de taux de substitution.....	102
Figure IV.10 : Porosité accessible à l'eau à 28 et 90 jours des BCR étudiés.....	104

Liste des tableaux

Tableau III.1 : MF des sables.....	63
Tableau III.2 : MF des sables de brique recyclée.....	63
Tableau III.3 : Masse volumique apparente des sables.....	63
Tableau III.4 : masse volumique apparente de brique.....	64
Tableau III.5 : Masse volumique Absolue des sables naturelle.	65.
Tableau III.6 : Masse volumique Absolue des sables de brique.....	65
Tableau. III.7 : 'Absorption de sable optimal.	65
Tableau. III.8 : Absorption de sable de brique recyclée.....	66

Tableau III.9 : résultat de l'essai d'équivalent de sable.....	67
Tableau III.10 : Propreté des graviers.....	69
Tableau III.11 : Masse volumique du gravier.....	70
Tableau III.12 : Masse volumique absolue	71
Tableau III.13 : Absorption de gravier.....	71
Tableau III 14 : Masse volumique apparente du calcaire.....	72
Tableau III.15 : Masse volumique absolue du calcaire.....	73
Tableau III.16 : la résistance a la traction et la compression.....	74
Tableau III.17 : les résultats de la compacité.....	77
Tableau III.18 : formulation pour un dosage de 130klg/m ³	78
Tableau III.19 : formulation pour un dosage de 170klg/m ³	79
Tableau IV.1 : Temps Vébe pour les mélanges réalisés.....	95
Tableau IV.2 : Temps Vébe pour les mélanges réalisés.....	96
Tableau IV.3 Résultats de la porosité accessible à l'eau des BCR étudiés	104

Sommaire

Remerciement.....	1
Dédicaces.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	5
Liste de notation	6
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux	10
Tableau des matières	12
Introduction générale.....	18
Chapitre 1 : Béton Compacte au Rouleau BCR	
I.1 Introductio.....	21
I.2 Présentation générale du BCR.....	22
I.2.1 Historique.....	22
I.2.1.1 Route (Pavages)	22
I.2.1.2 Barrage.....	23
I.2.3 Les Avantage du BCR	25
I.2.4 Les inconvénients.....	25
I.3 constituants du béton compacté au rouleau.....	25
I.3.1 Ciment	26
I.3.2 Granulats.....	26

I3.3 L'eau	27
I.3.4 Adjuvant	27
I.3.5 Filler.....	28
I.4 Les méthodes de formulations.....	29
I.4.1 Méthode de formulation empirique	29
I.4.2 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	30
I.4.3 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique	31
I.4.4 Méthode théorique.....	33
I.4.5 Méthode de formulation semi-empirique.....	33
I.5 Les propriétés du BCR	34
I5.1 L'état frais	35
I.5.1.1 L'ouvrabilité.....	35
I5.1.2 La masse volumique.....	35
I.5.2 L'état durci	36
I.5.2.1 Résistance a la compression	36
I.5.2.2 Résistance a la traction	36
I.5.2.3 Perméamétrie sous pression.....	37
I.5.2.4 L'absorption capillaire.....	38
I.6. Conclusion	39
 Chapitre II : Valorisation de la brique dans le Béton	
II.1 Introduction.....	41

II.2 Définition de brique	41
II.3 Composition et structure interne	41
II.3.1 Alumine.....	42
II.3.2 Silice.....	42
II.3.3 Chaux.....	42
II.3.4 Oxyde de fer	43
II.3.5 Magnésie.....	43
II.4 Procédés de fabrication de la brique.....	44
II.4.1 Extraction.....	44
II.4.2 Préparation de l'argile.....	45
II.4.3 Broyage et malaxage	45
II.4.4 Dosage et mélange.....	45
II.4.5 Façonnage	46
II.4.6 Séchage.....	46
II.4.7 Cuisson.....	46
II.4.8 Emballage.....	47
II.5. propriétés physiques et chimiques.....	49
II.5.1 Chaleur Massique.....	49
II.5.2 L'absorption	49
II.6 Influence sur le béton	49
II.6.1 l'ouvrabilité.....	49

II.6.2 L’essai de porosité	50
II.6.3 Résistance à la compression	51
II.6.4 Résistance à la traction	52
II.6.5 porosité accessible à l’eau.....	52
II.6.6 Effet des déchets de brique sur le gel-dégel.....	53
II.6.7 Le retrait.....	54
II.7 Conclusion	56

Chapitre III : Caractérisation Des matériaux utilisés et formulation du BCR

III.1 Introduction.....	59
III.2 Matériaux utilisés	59
III.2.1 Sables.....	59
III.2.1.1 Sable naturel.....	59
III.2.1.2 Sable de brique	60
III.2.1.2.1 Concassage de brique	60
III.2.1.2.2 Tamisage de brique :.....	61
III.2.1.3 L’Analyse granulométrique	61
III.2.1.4Module de finesse	62
III.2.1.5 Masse volumique	63
III.2.1.5.1 Masse volumique apparente	63
III.2.1.5.2. Masse volumique absolue	64
III.2.1.6. Absorption d’eau des sables :	65
III.2.1.7. Equivalant de sable :.....	66
III.2.2 Les graviers :.....	68

III.2.2.1 Propreté des graviers	69
III.2.2.2 Analyse granulométrique par tamisage	69
III.2.2.3 Absorption de gravier :	71
III.2.3 Fillers	71
III.2.3.1 Masse volumique apparente.....	72
III.2.3.2 La Masse volumique absolue.....	73
III.2.3.3 Analyse granulométrique.....	73
III.2.4 Le ciment	74
III.2.4.1 La classe vraie du ciment	74
III.3 Etude de formulation du BCR.....	75
III.3.1 Optimisation du mélange granulaire du BCR :.....	75
III.3.2 Mesure de la compacité	76
III.3.3 Dosage en ciment rapport E/C	77
III.3.4 Formulations réalisées	77
III.4 Malaxage de béton.....	79
III.5- Caractérisation du BCR à l'état frais	80
III.5.1- L'essai VEBE :.....	80
III.5.2 Mise en place des éprouvettes dans les moules et conditions de cure	82
III.6 Caractérisation du BCR a l'état durci :.....	84
III.6.1 Résistance à la compression des éprouvettes.....	84
III.6.3 Résistance à la traction par fendage	86
III.6.4 Perméabilité à l'eau (sous pression).....	89
III.6.5 Porosité accessible à l'eau	90
III.7 Programme expérimental.....	91

Chapitre IV : Analyse et Interprétation Des Résultats

IV.1 –Introduction.....	95
-------------------------	----

IV.2- Résultats	95
IV.2.1- L'état frais	95
IV.2.1.1-Temps VEBE	95
IV.1.1.2-Masse volumique théorique	96
IV.2.2- Etat durci	98
IV.2.2.1- Résistance à la compression	98
IV.2.2.2-Résistance de traction par fendage	100
IV.3. Durabilité	102
IV.3.1 Perméabilité à l'eau sous pression	102
IV.3.2 Porosité accessible à l'eau	103
IV.4. Conclusion	105
Conclusion générale	106
Références bibliographiques	107

Introduction générale

Introduction générale :

Le béton, depuis longtemps, a trouvé sa place d'application dans les différents types de construction à savoir : les constructions civiles, industrielles et hydrauliques. Ces dernières sont, toujours, en contact avec l'eau et éventuellement des milieux agressifs.

Le béton compacté au rouleau est un matériau défini comme étant un mélange, raide à affaissement nul, de granulats, ciment, eau et d'adjuvants (éventuellement avec ajouts cimentaires) qui est compacté en place en utilisant un matériel spécifique comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou un matériel couramment utilisé en travaux public tel que les rouleaux compacteurs.

Cette recherche vise à valoriser l'un des composants du béton compact au rouleau (BCR) en remplaçant le sable naturel par le de sable de brique recyclé et voir son effet sur les propriétés mécaniques et physique de BCR.

Le mémoire se compose de quatre chapitres. Le premier chapitre consiste en notre présentation d'une synthèse bibliographique sur les matériaux et composants de béton compacté au rouleau.

Le deuxième chapitre, présente la valorisation de la brique dans le Béton et l'effet de déchet de brique sur le comportement du béton.

Dans le troisième chapitre nous avons défini toutes les caractéristiques physiques et mécaniques des différents matériaux (granulats, ciment et adjuvants), comme la masse volumique, l'absorption de sable. Les analyses granulométriques de chacune des classes granulaires 0/1, 0/5, 3/8, 8/15, 15/25 et 15/50 ont été établies ainsi que la mesure de la compacité. Les procédures des essais de la caractérisation de la qualité de béton comme l'ouvrabilité, la résistance à la compression, la perméabilité sous pression et perméabilité accessible à l'eau ont été mis en œuvre.

Le quatrième et dernière partie du mémoire donne les résultats et leurs l'interprétation (résistances mécaniques, la porosité accessible à l'eau, et la perméabilité).

Chapitre I : Béton compacte au rouleau BCR

I.1 Introduction

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde : environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement [1].

Certains d'entre eux sont appelés Le béton compacté au rouleau est un béton qui se différencie grandement d'un béton traditionnel. Effectivement, son utilité, sa formulation et sa mise en place sont distinctes. Le BCR est un béton sec utilisé pour la construction de pavages et de barrages. Les matériaux utilisés lors de la confection d'un BCR sont les mêmes que ceux utilisés dans un béton classique, mais on les retrouve en proportion différente. La principale caractéristique du BCR est son faible volume de pâte, autrement dit, il contient peu d'eau et peu de matériaux cimentaires [2].

Lors d'une formulation de qualité, une composition de BCR peut développer rapidement des résistances mécaniques élevées. Par exemple, un mélange ayant une teneur en liant de l'ordre de 300 kg/m^3 et un rapport eau/liant de 0,35 peut développer une résistance à la compression de 40 MPA et une résistance à la flexion de 5,0 Mpa après seulement 3 jours de mûrissement. Le BCR possède aussi une bonne durabilité aux conditions sévères d'utilisation en ce qui concerne la résistance à la fatigue, aux chocs thermiques et à l'abrasion [3].

Le BCR est amené sur le site à l'aide de camions à benne et il est ensuite mis en place à l'aide d'une paveuse traditionnelle normalement.

Par la suite, le béton est compacté en utilisant des rouleaux compacteurs, car contrairement à un béton conventionnel, où la quantité de pâte est suffisante pour obtenir un bon compactage avec une simple vibration. Le compactage permet de réduire les vides au maximum et d'obtenir une compacité maximale [2].

I.2 Présentation générale du BCR

I.2.1 Historique

I.2.1.1 Route (Pavages) :

Dans le continent Américain, Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930[4] Gauthier et Marchand ont précisé,[5] que la première application du BCR au Canada date depuis 1976 et comporte la réalisation d'une aire de stockage de bois d'une surface de 52 000 m² sur l'Île de Vancouver par British Colomba Forest Company (BCFP). La même surface a été doublée en 1978. Ces premières applications ont été faites pour l'industrie forestière qui cherchait des pavages extrêmement résistants. Actuellement on construit des pavages en BCR avec des épaisseurs variant de 20 cm à un mètre pour la construction de rues, d'aires industrielles et d'aires d'entrepôts. Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Australie et d'autres pays.

Les chercheurs expliquent la différence entre les techniques de BCR en barrage et pavages par le fait que les procédures pour la construction, d'un pavage en BCR exigent des contrôles plus rigoureux que dans le cas des barrages. Ce matériau contient les mêmes constituants de base que ceux employés pour le BC tel que ciment, granulats (sable et gravier) et eau. Le mélange employé est raide et ferme et il faut le compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques, De plus, une fois durci, La résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPA. L'utilisation du BCR pour les pavages varie d'une épaisseur de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts [6].

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. [6].



Figure I.1 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA [6]

I.2.1.2 Barrage :

Les barrages existent depuis la préhistoire (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures) mais c'est au moyen âge qu'ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau [7].

Pour faire des économies et résoudre le problème d'utilisation des grandes quantités de terre dans les digues de retenue, le BCR en tant que matériau est utilisé dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces. L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du barrage. Ce matériau, caractérisé par un affaissement nul, est produit dans des centrales de malaxage implantées à proximité du site puis il est transporté à pied d'œuvre par des convoyeurs ou des camions, le liant utilisé est généralement le ciment alors que le dosage est nettement plus faible comparé à celui d'un BC, les résistances à la compression varient de 7 à 20 MPA. Pratiquement et après être déversé, le mélange de BCR est étalé au moyen de niveleuses ou de bulldozers mécaniques puis il est compacté au moyen de rouleaux compacteurs vibrants [8].

La première suggestion d'utilisation du BCR dans la construction de barrages remonte à 1941, et Au début des années 1970, Moffat développa davantage le concept du barrage poids en BCR et la première utilisation de BCR en volumes importants fut réalisée au barrage de Tarbela (Pakistan) en 1975, En 1985 et 1986, deux barrages situés en deux points opposés du monde introduisirent, Castilblanco de los Arroyos (Espagne) [et Kengkou (Chine) furent les premiers barrages BCR dans deux des pays où se développait le BCR pour la construction de

barrages. Peu de temps après ces barrages, la construction de barrages BCR débuta également en Afrique du Sud, au Brésil et au Mexique.[9].

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 m de hauteur. Tha Dan Canal Dam est le plus grand Barrage en BCR au monde d'une longueur de 2720 m 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 m de longueur et 120 m de hauteur [10].

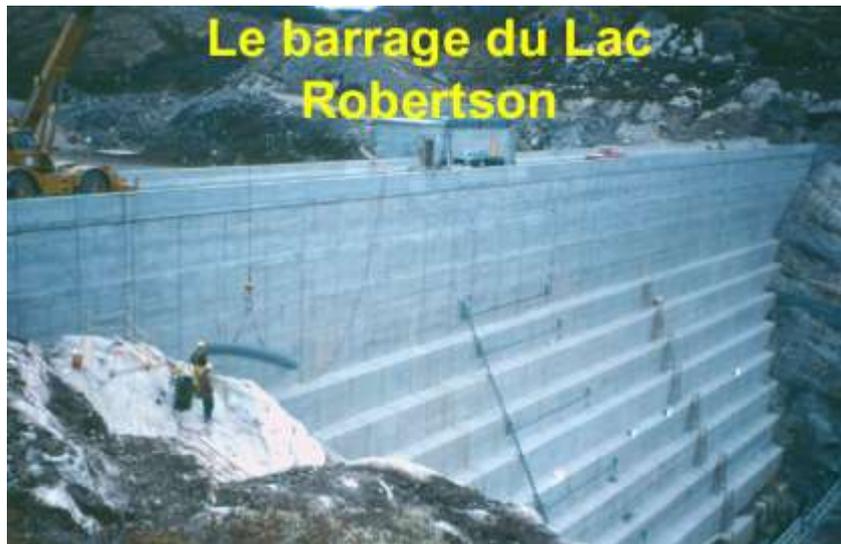


Figure I.2 : Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada [10]



Figure I.3 : Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada[10]

I.2.3 Les Avantages du BCR

- Faible chaleur d'hydratation.
- Faible coût / m³.
- Rapidité de mise en place.
- Usines en continu.
- Technologie peu complexe.
- Grande stabilité volumique Par rapport à un ouvrage en terre.
- Volume plus faible Meilleure résistance à l'érosion.
- Imperméabilité.
- Possibilité de prévoir une centrale adjacente à l'ouvrage Par rapport à un ouvrage en béton.
- Rapidité de mise en place.
- Pas ou peu de coffrages.

I.2.4 Les inconvénients

- Qualité des parements.
- Apparition des fissures transversales.
- La reprise entre couches est un point faible.
- Difficulté d'entraîner de l'air.
- Coût de transport des matières cimentaires en régions éloignées.

I.3 constituants du béton compacté au rouleau

La résistance et la durabilité du RCR sont largement affectées par le type et les propriétés du matériau choisi. Les matériaux de base qui composent le mélange BCR sont les mêmes que ceux utilisés pour fabriquer le béton ordinaire : granulats, ciment, eau et éventuels adjuvants.

I.3.1 Ciment

Pour chaque béton, le ciment est un élément très important, car il procure la résistance mécanique qui est un facteur très important, donc plus la teneur en ciment est grande, plus la résistance mécanique augmente. Mais des recherches ont été -faites sur la quantité de la teneur en liant dans le béton et elles ont conclues qu'une quantité excessive de ciment peut nuire sérieusement à la durabilité du béton [11].

Son utilisation répond à 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 choix du type de liant et de son dosage est fonction des résistances mécaniques requises et des critères de durabilité exigés. De manière générale, Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m³. [12]La teneur en liant a de grandes influences sur les propriétés des bétons compactés au rouleau. Effectivement, lorsque la teneur en liant augmente, cela permet de réduire la friction entre les granulats et donc améliorer la maniabilité.

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

Le ciment Portland: CPA-CEM I, CPI-CEM II dont la classe varie en fonction des performances voulues.

Les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre: CHF-CEM III, CLK-CEM III, CPZ•CEM IV, CLC-CEM V. Ces ciments présentent un début de prise plus lent et un durcissement plus progressif et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du béton [11].

I.3.2 Granulats

Les granulats occupent 75 à 85 % du volume total d'un mélange de BCR, Ils constituent aussi le squelette de ce matériau et représentent les 4/5 du poids du mélange. 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...). Les granulats sont définis par la norme (NF P18-101) comme étant l'ensemble de grains minéraux, désignés par les termes fines, sables, gravillons ou cailloux et de dimensions comprises entre 0 et 125 mm [13,14.] .

D'après les recherches menées par Gagné R, dans le cas du BCR, la caractéristique de base des gros agrégats est d'environ 50 mm, Par contre, l'utilisation de granulats beaucoup plus petits va entraîner une augmentation de la chaleur d'hydratation, dans le cas des barrages. L'opération de compactage est également affectée par la taille de l'agrégat. [3].

I3.3 L'eau :

La quantité d'eau dans un mètre cube de BCR, sert d'abord pour l'hydratation du ciment et le mouillage des granulats. Elle permet au BCR d'avoir les qualités de plasticité et d'ouvrabilité, qui sont contrôlées, en général, par des essais et des mesures appropriées. Une partie de cette eau peut être absorbée par les granulats alors qu'un autre reste libre et ceci en fonction de leur porosité [15]. La plage de variation de la teneur en eau, qui est le pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs, est comprise entre 4,5% et 6%. Ce dosage en eau, considéré relativement faible par rapport à celui du BC, permet d'obtenir un béton sec à un affaissement nul [15]. Alors que si on considère la teneur en eau efficace définie par la norme EN 206, cette teneur représente la différence entre la quantité d'eau totale introduite dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée par les granulats. On définit alors la quantité d'eau totale comme étant la quantité d'eau ajoutée, y compris l'eau déjà contenue dans les granulats, ainsi que la quantité d'eau mélangée avec les adjuvants [16]. D'autre part, la quantité optimale d'eau à employer permet d'obtenir des résistances maximales [17]. Expérimentalement, cette quantité d'eau est dosée en fonction du mode et des moyens de serrage disponible sans être influencée par les autres conditions telles que les moyens de transport, moyens de malaxage, etc.

I.3.4 Adjuvant :

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

les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

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

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

L'utilisation de certains adjuvants dans un chantier de RCR n'est pas courant. Ces adjuvants sont les suivants:

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

Les fluidifiants : Ces adjuvants ne sont pas employés puisque entraînant une très grande Maniabilité alors que l'effet d'une maniabilité trop élevée est néfaste pour un mélange de BCR (ressuage, déformation excessive à la suite du compactage...). [18].

I.3.5 Filler

Définition :

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 NF P 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 Bombléd. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production [21].

I.4 Les méthodes de formulations

Pour déterminer les différentes proportions de formules de béton, il faut tenir compte de critères tels que la maniabilité, la durabilité et la résistance aux dommages. En tenant compte de ces facteurs, il est possible de créer la formule de béton la plus rentable qui réponde à toutes les spécifications techniques.

En raison de ses caractéristiques spécifiques de béton à affaissement zéro, le BCR contient de grandes quantités de granulats et une faible teneur en ciment. Les méthodes conventionnelles de formulation du béton ne sont pas directement applicables au BCR ; au lieu de cela, plusieurs méthodes ont été présentées dans la littérature pour sélectionner les proportions spécifiques pour créer le BCR. Ces méthodes sont discutées dans les paragraphes suivants. Cependant, la décision entre ces méthodes dépend de la destination prévue du projet - qu'il s'agisse de routes ou de barrages - ainsi que des matériaux disponibles [20].

I.4.1 Méthode de formulation empirique :

Au début de la conception du BCR, des méthodes de formulation empiriques ont été mises en place. Ces méthodes reposent sur la réalisation de plusieurs gâchées en laboratoires afin d'obtenir le mélange adéquat pour un tel projet. Ces techniques prennent beaucoup de

temps et d'énergie, car dans certains cas plus de 25 mélanges sont nécessaires pour atteindre les caractéristiques voulues du BCR. En plus, des gâchés de réajustement sur chantier sont nécessaires pour obtenir un béton de bonne qualité [21].

Les deux méthodes les plus utilisées et les plus efficaces :

Formulation respectant certaines limites de maniabilité.

Formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

I.4.2 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 [21].

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.4** 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 [21].

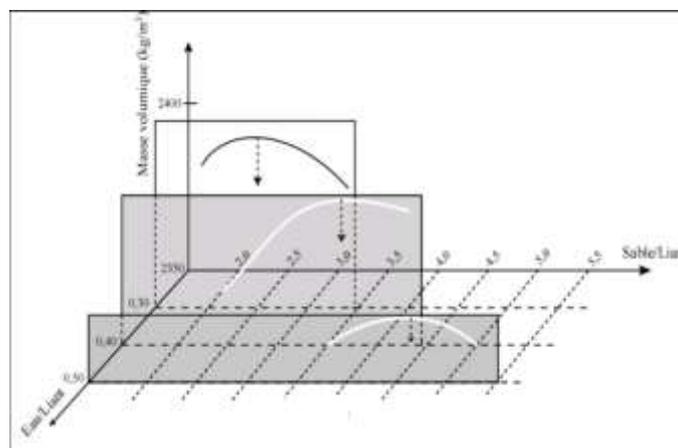


Figure I.4 : Détermination du volume de pâte minimal. [21].

I.4.3 Méthode de formulation selon des principes de géotechnique :

Dans cette méthode, le principe de la détermination des différentes proportions est basé sur le concept de compactage des sols en laboratoire. Elle consiste à utiliser l'essai Proctor modifié, suivant le mode opératoire de la norme ASTM D1557, afin d'obtenir la relation de la variation de la densité en fonction de la teneur en eau.

La teneur en ciment est déterminée selon les caractéristiques mécaniques exigées, généralement entre 200 et 350 kg/m³. Tandis que, la teneur en eau optimale est estimée sur la base des essais de compactage du béton frais.

Cette méthode est plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont utilisés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée, ce que l'on trouve généralement avec les mélanges de BCR destinés aux projets routiers. [21-22].

Les proportions en granulats fins et grossiers sont déterminées par rapport à un fuseau granulométrique **Figure I.5**. Puis une série de mélanges du béton est préparée variant chaque fois la teneur en matériaux cimentaires, entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs.

Pour chacune des teneurs en liant, des éprouvettes sont préparées à différentes teneurs en eau puis compactées dans le moule Proctor modifié à une énergie spécifique. Les éprouvettes sont fabriquées en cinq couches d'égale épaisseur et compactées de la même manière (56 coups par couche). La masse volumique du moule compacté est ensuite mesurée et la densité sèche est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_d = 100 \cdot \omega \cdot \rho_h / (100 + \omega)$$

ρ_d : densité sèche.

ρ_h : densité humide maximale mesurée.

ω : teneur en eau réelle (la teneur en moyenne calculée à partir des Pesées de prélèvement de béton frais, avant et près étuvage).

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du Mélange est tracée dans un graphique **Figure I.6**. La teneur en eau correspondant à la densité sèche maximale (sommet de la courbe) représente la teneur en eau optimale. Des essais de résistance en compression sont réalisés sur des éprouvettes.

Préparées à différentes teneurs en eau optimales. Le mélange ayant la teneur en liant minimale et possédant les propriétés mécaniques requises est alors choisi. [21].

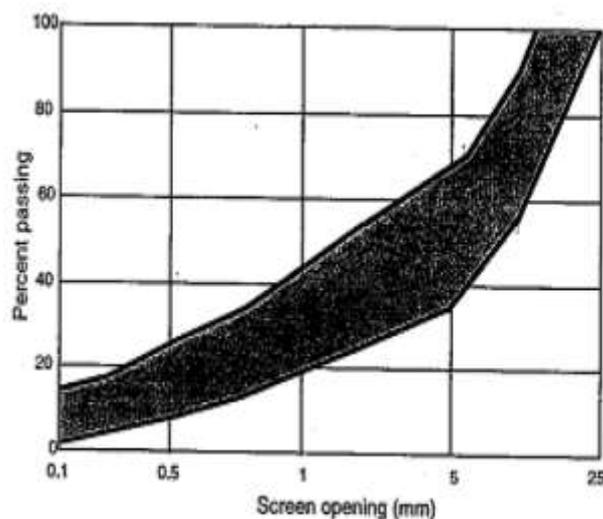


Figure I.5 : Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR . [21]..

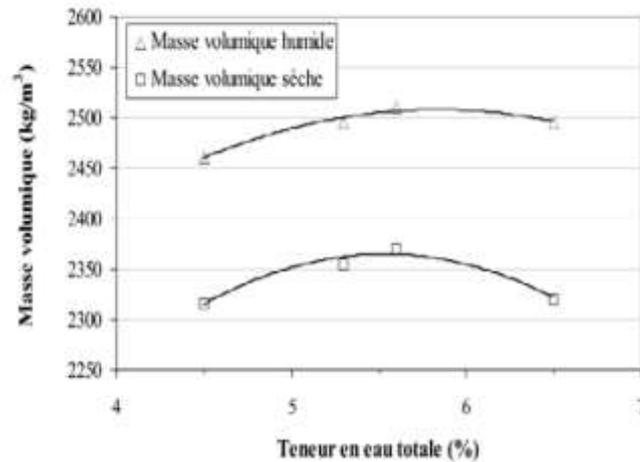


Figure I.6 : Courbes de Proctor . [21].

I.4.4 Méthode théorique

L'une des percées majeures dans le domaine de la formulation des mélanges de béton fut l'introduction des méthodes théoriques. En effet, elles permettent de minimiser la porosité (OU maximiser la compacité) du squelette granulaire en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, gravier, ciment, ajouts minéraux). La faible porosité permettra un bon enrobage des granulats par la très faible quantité de pâte de ciment, ainsi que des propriétés mécaniques optimisées Parmi les méthodes théoriques de prévision de la compacité d'un empilement granulaire, le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) anciennement appelé Modèle de Suspension Solide (MSS), développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France, fut adapté par le Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) de l'Université de Laval à la formulation de mélange de BCR [24].

Le MEC permet le calcul de la compacité d'un mélange granulaire à partir de la compacité et de la granulométrie des constituants, des proportions du mélange et d'un paramètre k, nommé indice de serrage et qualifiant l'intensité du compactage. Le MEC est basé sur l'optimisation de la compacité d'un empilement de grains de tailles différentes, La combinaison des constituants par cette méthode permet de produire un mélange sec à compacité optimale pour une maniabilité donnée. La compacité d'un mélange granulaire dépend de la granulométrie des particules, de leur forme et de l'interaction entre les grains [25].

I.4.5 Méthode de formulation semi-empirique

Cette méthode de formulation exige une approche expérimentale d'une part, et quelques formules empiriques d'autre part. La formulation par volume de pâte optimal est l'une des méthodes semi-empiriques utilisées pour la confection du BCR. Le principe de cette méthode consiste à calculer le volume de pâte par rapport à un volume de vides. Comme il a été mentionné en haut, cette méthode nécessite des mélanges d'essais en laboratoires.[21] 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.

Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des performances mécaniques. Suivant cette hypothèse, une faible dépense de pâte causera la présence de vides inter-granulaires qui vont par la suite réduire les performances mécaniques et augmenter sensiblement la perméabilité. D'autre part, une dépense excessive de pâte amplifiera la chaleur d'hydratation et le coût, sans accroître significativement les propriétés physiques ou la diminution de la perméabilité. [26].

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 [26].

I.5 Les propriétés du BCR

I.5.1 L'état frais

I.5.1.1 L'ouvrabilité

Elle désigne la facilité de mise en place et renseigne sur l'uniformité du BCR. Elle est influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels nous pouvons citer :

- Le volume et la fluidité de la pâte : la maniabilité augmente avec ces facteurs.
- La proportion des fines dans le fuseau granulométrique : plus cette proportion est élevée plus la maniabilité augmente puisque les points de discontinuité deviennent plus nombreux et il y a plus de mobilité de l'ensemble :
- La forme, la texture et l'absorptivité des granulats : la maniabilité est plus importante dans le cas de particules rondes que plates.

Les granulats poreux absorbent l'eau et réduisent la maniabilité, tandis que les granulats rugueux exigent une plus grande quantité de pâte de ciment pour une même maniabilité du fait des irrégularités de surface qu'ils comportent. La qualité du BCR est étroitement liée à sa maniabilité à l'état frais ; elle ne doit être ni trop faible, ni trop élevée. Elle est exprimée en temps Vebe Test et la plage optimale est de 40 à 90 secondes pour les pavages.

I5.1.2 La masse volumique

La masse volumique dépend principalement de la densité des granulats et de la quantité de vides. Contrairement aux bétons traditionnels, les BCR contiennent très peu de vides et ils ont une quantité plus importante de matières solides. Ainsi, la masse volumique des BCR est légèrement supérieure à celle des bétons usuels. Des masses volumiques supérieures à 2400 kg/m^3 ne sont pas rares pour les BCR [27]. Une relation entre la masse volumique et le rapport V_p/V_{vc} existe et elle est présentée à la **Figure I.7**.

Sur la **Figure I.7**, on remarque qu'il existe un optimum à $\pm 0,95$. Au-dessous de cet optimum, il y a un manque de pâte qui contribue à créer des vides, donc une baisse de la masse volumique. Au-dessus de cet optimum, il y a un surplus de pâte, et comme la densité de la pâte est plus faible que celle des granulats, il s'ensuit donc une perte de la masse volumique.

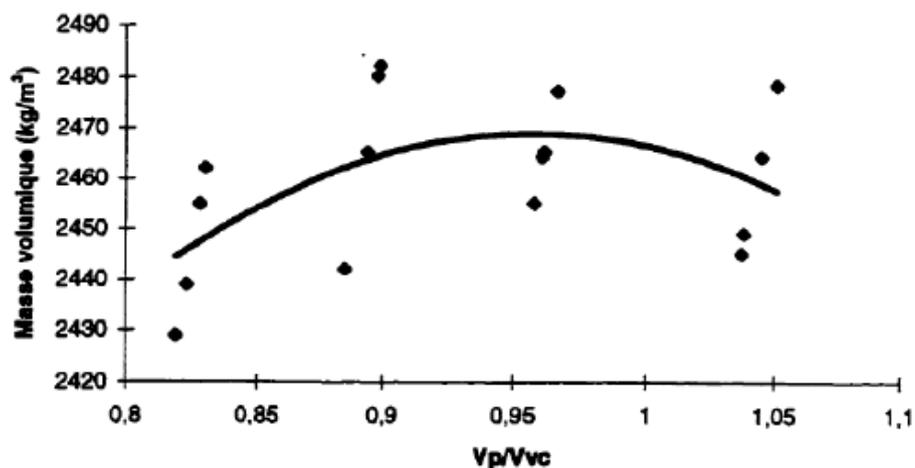


Figure I.7 : Relation entre la masse volumique des BCR et le rapport V_p/V_{vc} . [27].

I.5.2 L'état durci :

I.5.2.1 Résistance a la compression

La résistance à la compression du BCR est généralement considérée comme sa plus importante propriété. Elle nous donne une image globale sur la qualité de ce béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. [29 ,30].

la résistance à la compression est étroitement reliée au degré de compactage. Effectivement, si le compactage est insuffisant, il subsistera des vides entre les granulats, qui provoqueront une diminution de la résistance à la compression. De plus, la résistance à la compression d'un BCR dépend beaucoup de la qualité des granulats puisqu'ils représentent 80 % à 85 % du volume total du mélange. [34].

I.5.2.2 Résistance a la traction :

La résistance à la traction du B.C.R mesure avec l'essai brésilien représente approximativement de 12% à 14 % de sa résistance à la compression. La résistance à la traction du B.C.R peut donc varier considérablement d'un mélange à un autre, la variabilité de l'essai est plus grande dans le cas du B.C.R que dans le cas de béton conventionnel [33].

I.5.2.3 Perméabilité sous pression:

La mesure de la perméabilité s'effectue par plusieurs procédés. En effet, la pénétration du béton s'effectue par différents fluides tels que : le gaz, l'eau et les chlorides. Dans notre étude, la perméabilité à l'eau a été étudiée.

Des études menées par le Service d'Expertise en Matériaux (SEM) au Québec [36], ont montré que le BCR peut avoir une perméabilité à l'eau du même ordre de grandeur que ceux du béton conventionnel tout en ayant les propriétés mécaniques (Résistance en compression et en traction) supérieures à celles des bétons conventionnels. [35].

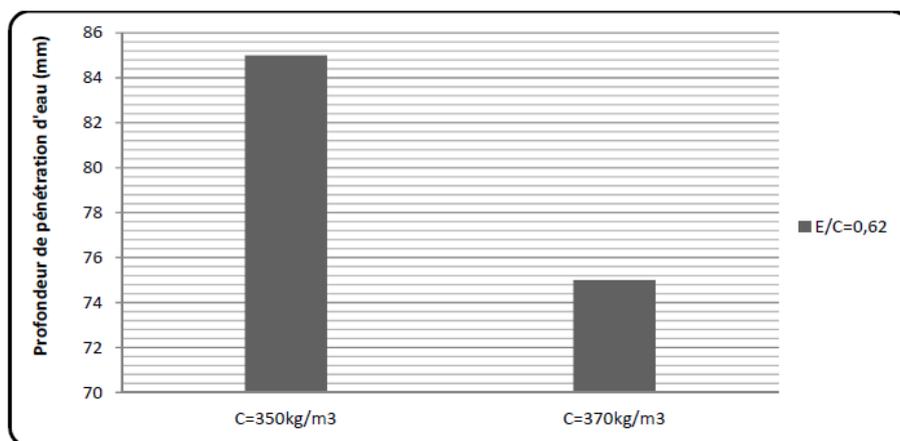


Figure I.8: Effet du dosage en ciment sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression à 28 jours [37].

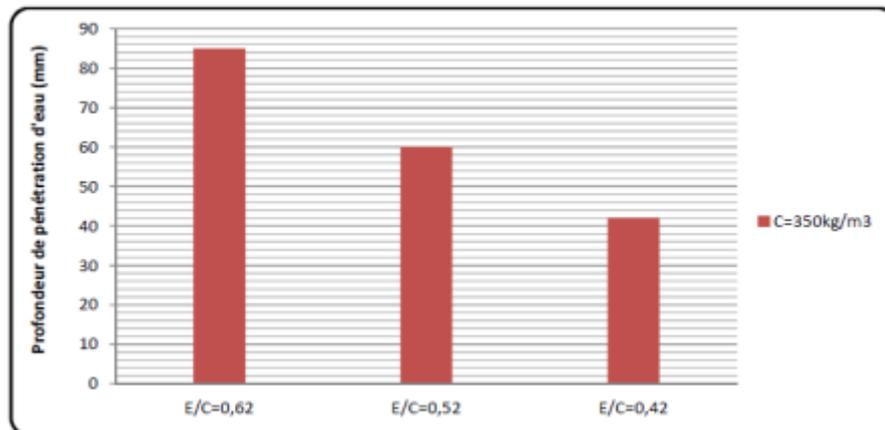


Figure I.9: Effet du rapport E/C sur la profondeur de pénétration d'eau sous pression à 28 jours [37].

Selon les **Figures I.8 et .9**, qui montrent l'effet de dosage en ciment et le rapport E/C sur la perméabilité après 28 jours, on observe une diminution de la profondeur de pénétration d'eau avec l'augmentation de dosage en ciment et la diminution de rapport E/C, pour tous les bétons étudiés. Cela est dû principalement à la diminution de la porosité du béton [39].

I.5.2.4 L'absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité d'une éprouvette de béton est directement liée à la taille et forme des pores [38].

Cette caractéristique nous permet d'avoir un aperçu sur les structures poreuses des bétons. L'absorption capillaire peut aussi nous donner une idée sur les performances mécaniques des bétons. Nous apprend que la majorité des bétons avec un faible coefficient d'absorption capillaire présentent des bonnes performances mécaniques. On peut estimer, d'après les résultats de l'absorption capillaire, la durabilité des bétons dans un milieu agressif, un béton durable doit forcément avoir un faible coefficient d'absorption ce qui minimise les transferts de fluide entre le milieu extérieur et le milieu interne du béton. [39].

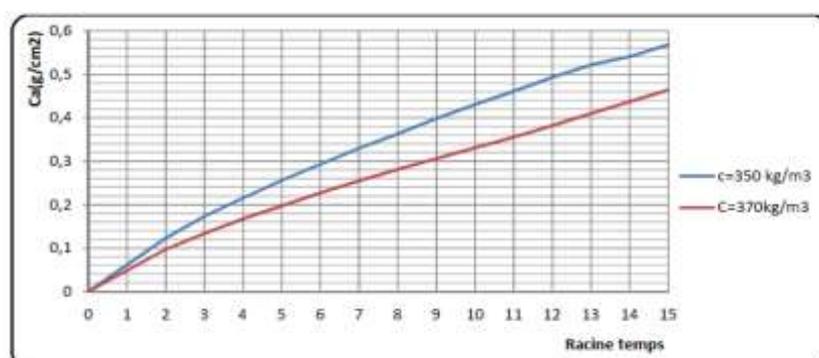


Figure I.10:Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons pour différent dosage en ciment [37].

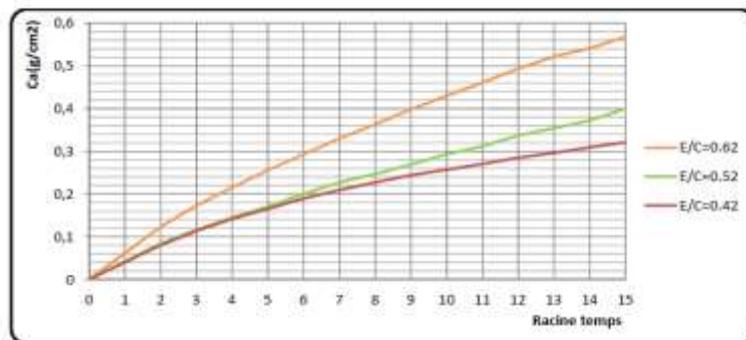


Figure I.11:Absorption d'eau capillaire des bétons pour différent rapport E/C (C=350kg/m³). [37].

DUTRON,P [35] à étudié l'effet de rapport E/C et le dosage en ciment sur l'étanchéité des béton, en effet les résultats de cette a montré que :

Lorsque le rapport E/C supérieur à 0,42, la quantité d'eau est supérieure à celle nécessaire à l'hydratation complète du ciment. Les grains de ciment sont éloignés, leur hydratation ne permet pas de combler tout l'espace. Lorsque l'hydratation arrive à son terme, il reste une quantité d'eau importante dans le matériau (sous forme d'eau libre), ce qui engendre la formation d'une absorption d'eau importante, favorisant la perméabilité du matériau et diminuant sa résistance mécanique. L'utilisation d'un E/C élevé favorise l'absorption d'eau et augmente la perméabilité du matériau et ainsi la pénétration d'agents potentiellement agressifs vers le cœur du matériau.

I-6 Conclusion

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement. La synthèse de cette partie a mis en évidence que le BCR est un matériau performant, économique et durable, Le compactage dans la confection des BCR

présente un élément clé de son comportement. De ce fait, les performance et la durabilité du BCR sont fortement liées à la qualité du compactage réalisé. .

Chapitre II : Valorisation de la brique dans le Béton

II.1 Introduction

Les considérations économiques et environnementales influencent de plus en plus l'approvisionnement en granulats. La mise en œuvre est confrontée à de grands défis, et au contraire - une grande opposition à l'ouverture de nouveaux bancs dans les carrières. Dans le même temps, certains pays connaissent des difficultés d'élimination des débris et sous-produits industriels inertes, et d'autres disposent de décharges sauvages à impact « environnemental ».

L'élimination des déchets nécessaire n'est pas simple, parfois elle est plus chère. Par exemple, le cas des déchets de démolition et l'utilisation des granulats issus de ces déchets nécessitent des connaissances spécialisées car aucun de ces matériaux n'est normalisé.

Parmi ces déchets, les débris de brique peuvent être concassés et utilisés comme granulats pour la fabrication du béton.

Historiquement, l'usage de brique concassée comme granulats dans le béton n'est pas nouveau. Le premier usage marqué de brique concassée avec le ciment portland était en Allemagne en 1860 pour la fabrication de produits en béton. Des recherches systématiques ont été exécutées depuis 1928 sur des mélanges de ciment, d'eau et de granulats en brique concassée [40].

L'utilisation de granulats de brique dans la production de béton est donc considérée comme une solution pour les zones où les granulats naturels font défaut et où il peut être souhaitable de réduire le poids de la structure [41].

II.2 Définition de brique

Une brique est un cuboïde fait d'argile crue, séchée au soleil ou cuite au four, utilisée comme matériau de construction. L'argile est souvent mélangée avec du sable [42].

II.3 Composition et structure interne

La silice, ou le sable, et l'argile sont les deux ingrédients les plus importants de l'original. Lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau dans les proportions appropriées, l'argile à briques - également connue sous le nom de brique de boue - peut être transformée en briques. Étant donné que la masse plastique est facilement moulée, elle peut sécher rapidement. Par

conséquent, il est important que le patient ne perde pas sa plasticité d'origine après avoir bu la potion. On pense que le matériau ne subit pas de déformation, de rétrécissement ou de fissuration [43].

II.3.1 Alumine

L'alumine est le composant principal de l'argile. Il agit comme un matériau cimentation dans la brique crue. l'argile de la brique est en plastique du fait de la présence d'alumine. Cette plasticité assure que les briques peuvent être façonnées. Une quantité excessive d'alumine dans l'argile peut provoquer rétrécissement, gauchissement ou fissuration des briques par séchage et brûlage comme tout autre matériau cimentaire [43].



Figure II.1: Argile pour la formation de briques. [43]

II.3.2 Silice

Les briques de bonne qualité contiennent 50 à 60 % de silice. Il se présente sous la forme libre et combiné. Au fur et à mesure que le sable est libéré, il reste mélangé mécaniquement avec argile. Sous forme combinée, il réagit avec l'alumine pour former des silicates d'aluminium. La silice empêche la fissuration, le retrait des briques de boue et déformer. Plus la proportion de sable est élevée, plus elle est importante la brique aura une texture incurvée et uniforme. Cependant, l'excès de silice détruit la cohésion entre les particules d'argile et rend la brique cassante et faible. La durabilité des briques dépend en grande partie de la proportion correcte de silice et argile [43].

II.3.3 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 de lier les particules de brique, ce qui donne des briques solides et durables. À environ 1100 °C,

la chaux agit comme catalyseur pour élever la température du four à 1650 °C à laquelle la silice fond. Cette silice légèrement fondue fonctionne comme un solide matériau de cimentation. Un excès de chaux dans l'argile de brique provoquera la vitrification des briques. Il fait fondre les briques, car plus que la quantité requise de silice ne fondra. Les briques perdent alors leur forme et se défigurent [43].



Figure II.2: Chaux en poudre. [43]

II.3.4 Oxyde de fer

Les briques contiennent une petite quantité d'oxyde de fer. L'oxyde de fer agit comme un flux de chaux, ce qui aide la silice à fondre 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 [43].



Figure II.3: Poudre d'oxyde de fer. [43]

II.3.5 Magnésie

Une petite proportion de magnésium diminue le retrait et donne une teinte jaune aux briques. Une quantité excessive de celui-ci provoque la décomposition des briques [43].

II.4 Procédés de fabrication de la brique

Les processus de production de briques sont réalisés dans un ordre séquentiel qui permet un flux continu. Son processus de stock intermédiaire est représenté comme suit. [44]

II.4.1 Extraction

La matière première naturelle pour la production de briques en terre cuite est l'argile. Il est extrait en mines d'argile situées dans la zone minière L'argile est omniprésente dans le sol L'algerien et ses propriétés varient selon l'origine géologique. Attenant à une briqueterie généralement un pot en argile. Certaines briqueteries ajoutent de l'argile à d'autres des carrières d'argile pour élargir l'assortiment. Cependant, les transports restent limités [22].



Figure II.4 : extraction de l'argile. [22].



Figure II.5 : Stockage de l'argile.[22].

II.4.2 Préparation de l'argile

La préparation comprend deux opérations principales: le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fin [45].

II.4.3 Broyage et malaxage

Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. Cette opération a également pour but de réduire les inclusions solides éventuellement présentes dans l'argile pouvant influencer négativement la structure du produit en terre cuite. Cette étape très importante s'effectue dans des broyeurs mécaniques à meules verticales ou à cylindres horizontaux. Enfin, l'argile contient également des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini, et qui ne peuvent être éliminés que par l'action bactériologique.

A cette fin, l'argile est stockée quelque temps dans un lieu humide et sombre propice au développement de ces bactéries [45].

II.4.4 Dosage et mélange

Aujourd'hui, on ne fabrique plus les briques uniquement à partir des argiles locales, comme c'était le cas auparavant. Pour obtenir une qualité optimale de la matière première, divers types d'argile sont mélangés, toujours sous un contrôle permanent. On peut ainsi garantir la qualité constante des produits en terre cuite. Les adjuvants peuvent influencer les propriétés des produits finis. Ainsi, l'ajout de pigments peut en modifier la couleur; l'ajout de sciure de bois a une influence sur la porosité. La préparation de la matière première s'accompagne également d'ajout d'eau ou de vapeur. L'ajout d'eau permet de garantir une mise en forme facile de l'argile, tandis que la vapeur augmente la plasticité de l'argile [45].

II.4.5 Façonnage

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme [45].

II.4.6 Séchage

Avant d'être cuites, les briques crues doivent encore perdre une grande partie de leur teneur en eau - du moins en est-il ainsi pour la plupart des argiles. Le séchage se poursuit jusqu'à ce que les briques ne contiennent plus qu'environ 2% d'eau. Le risque serait en effet de les voir se fendre ou éclater sous la dilatation de la vapeur dans la masse. D'autre part, la stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme du retrait consécutif à la dessiccation. [45].



Figure II.6:extraction et stockage de l'argile extraction et stockage de l'argile..[45].

II.4.7 Cuisson

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler. C'est une phase d'une grande importance qui doit se dérouler très progressivement. On augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C, en fonction du type d'argile); on diminue.

Ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet. Chaque mélange d'argile se caractérise par sa propre «courbe de cuisson». On peut modifier l'atmosphère du four. La cuisson en oxydation (= avec apport d'oxygène) est la plus fréquente et produit la teinte «normale» Dans une atmosphère réductrice (= sans apport d'oxygène), on obtient des couleurs plus foncées. Une réduction partielle produit, quant à elle, des teintes fortement nuancées.

Aujourd'hui, on utilise un four continu de type four tunnel. Dans celui-ci, le chargement de briques parcourt un tunnel rectiligne sur des wagonnets et passe successivement par les zones de «préchauffage», de «cuisson» et de «refroidissement». Dans la zone de préchauffage, les briques sont portées progressivement à température. Cet échauffement se fait grâce aux fumées émanant de la zone de cuisson du four. L'humidité résiduelle des briques est ainsi éliminée.

A partir d'une température comprise entre 450°C et 600°C, on ralentit la montée en température des produit le «point de quartz»: il s'agit de la température à laquelle la structure cristalline du quartz est modifiée.

A cette étape de la cuisson, les briques sont très sensibles à la formation de fissures. La cuisson des briques à proprement parler se fait environ à mi-parcours du four, à une température allant de 1000°C à 1200°C. Le frittage de l'argile se fait à cette température et se forme alors la structure définitive de la brique. Enfin, une troisième et dernière phase consiste à refroidir les briques. Cette opération doit s'effectue de façon très contrôlée pour éviter tout risque de fissuration [45].

II.4.8 Emballage

Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier. Pour des raisons de facilité et de sécurité, elles sont préalablement empilées sur des palettes et emballées de façon à minimiser la quantité d'emballage utilisé. [45].



Figure II.7: Emballage de briques. [45].

En conclusion, le procédé général de fabrication des briques est illustré à travers l'organigramme suivant:

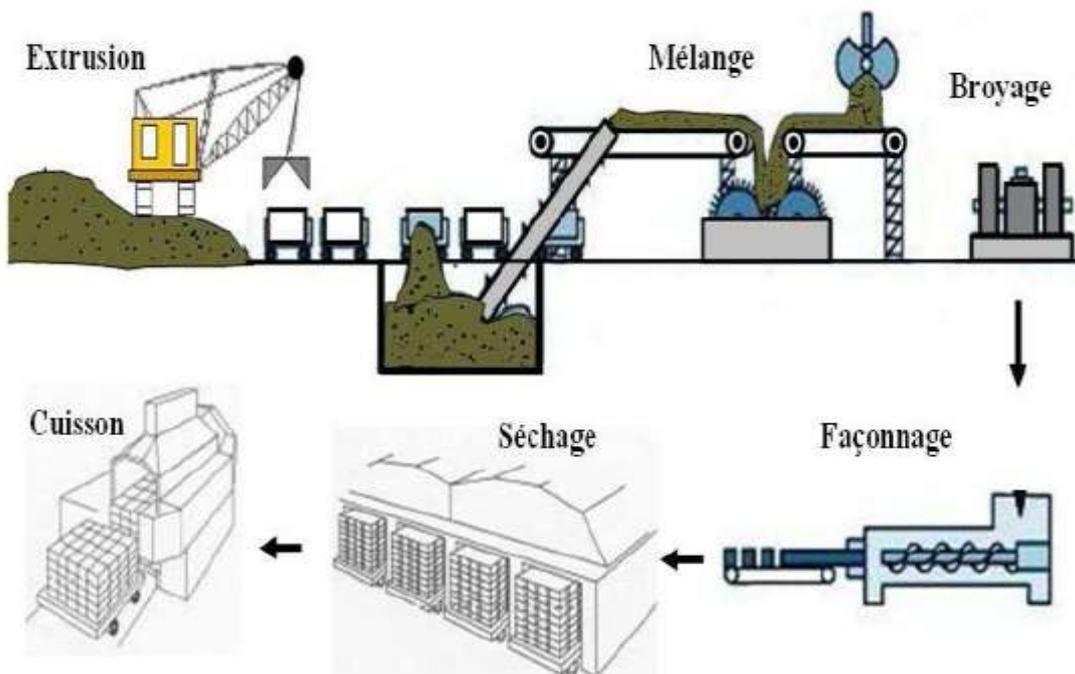


Figure II.8: procédé général de fabrication de la brique. [45].

II.5. propriétés physiques et chimiques

II.5.1 Chaleur Massique

La chaleur spécifique des briques - qui mesure leur énergie - 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 .[47].

II.5.2 L'absorption

On pense que les déchets de briques sont entre 5 et 15% absorbables lorsqu'ils sont secs. Par conséquent, il était crucial d'ajouter des déchets de briques humides à tous les autres matériaux avant de les combiner [48].

II.6 Influence sur le béton

II.6.1 l'ouvrabilité

Les matériaux d'origine argileuse présentent des capacités d'adsorption, qui dépendent plus au moins d'un certain nombre de paramètres.

Debieb et Kenai [49] ont remplacé le sable naturel avec des déchets de brique dans le béton à différents taux de substitution (0%, 25%, 50%, 75% et 100%). Ils ont également trouvé que la consommation en eau augmente avec l'augmentation de la substitution du sable par les déchets de brique pour une ouvrabilité constante.

Il est évident que la grande capacité d'absorption de la brique en eau diminue significativement la fluidité des mortiers. La brique est un matériau qui contient des pores, dont la porosité peut atteindre 40% en fonction de la matière première et des processus de fabrication [50]. En conséquence, les granulats qui seraient fabriqués à partir de briques posséderont alors une absorption d'eau élevée.

La **figure II.9** montre que la tendance de perte de fluidité est presque linéaire pour des taux remplacement de sable en déchets de brique respectivement de 0%, 10%, 20% et 30%.

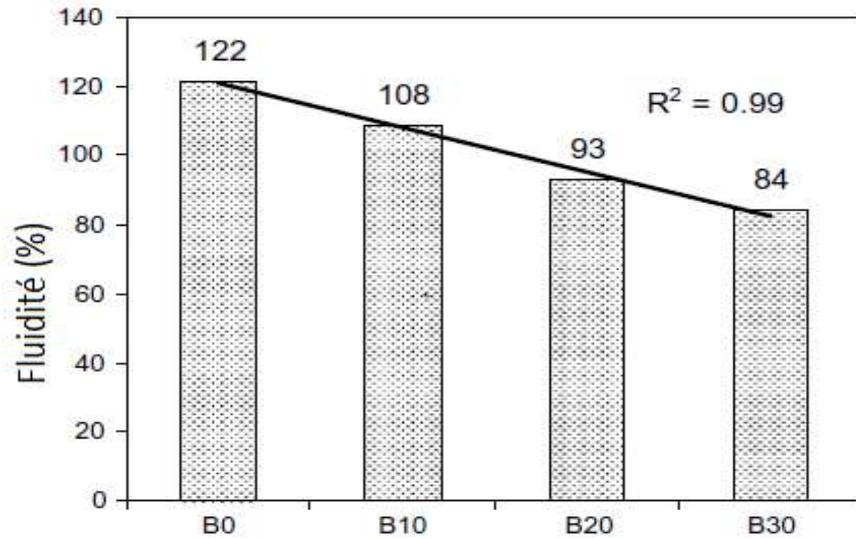


Figure II.9; Fluidité des mortiers à base de différents taux de substitution de sables par les DB [50].

II.6.2 L'essai de porosité

L'évolution de la porosité à l'eau de béton de 20 % de granulats de brique réfractaire est présentée sur la Figure II.10

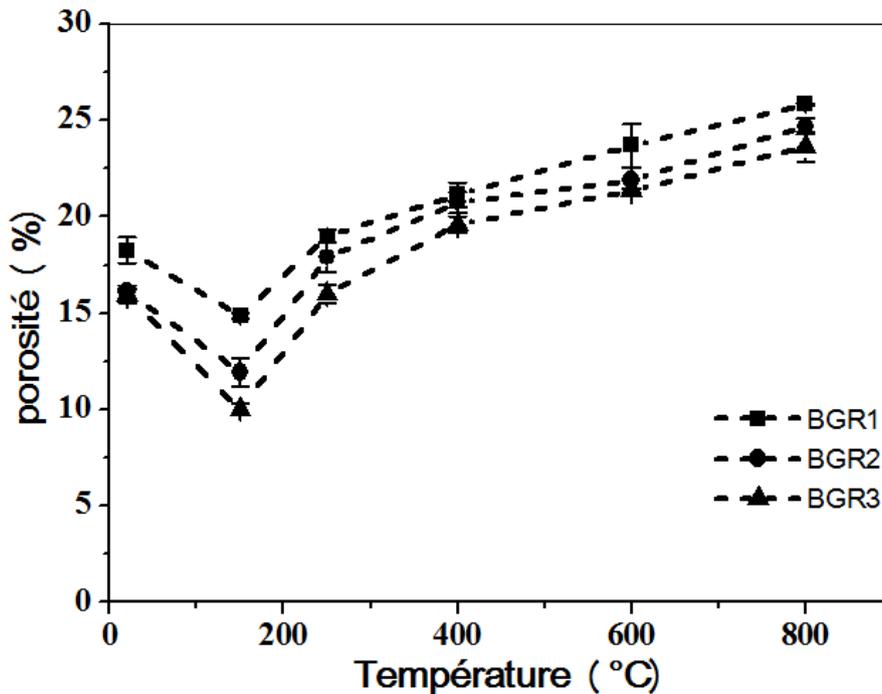


Figure II.10: Evolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats de brique réfractaire en fonction de la température [51].

Les valeurs de la variation de la porosité des trois bétons sont proches. Deux phases ont été constatées :

Dans la première phase qui varie de la température ambiante à 150°C, on peut noter une diminution de la porosité.

Dans la deuxième phase, Au-delà de 400°C, on observe, pour les trois bétons, une augmentation assez régulière de la porosité avec la température. [51].

Ceci est justifié par la déshydratation importante de la pâte de ciment et une forte fissuration de la matrice, ce qui entraîne une augmentation de la porosité du squelette solide.

II.6.3 Résistance à la compression

Bektas et al [27] montrent que les déchets de brique utilisés comme substitution partielle aux granulats jusqu'à 20% ne provoque pas de perte de résistance sur les mortiers **Figure II.11**, particulièrement à long terme.

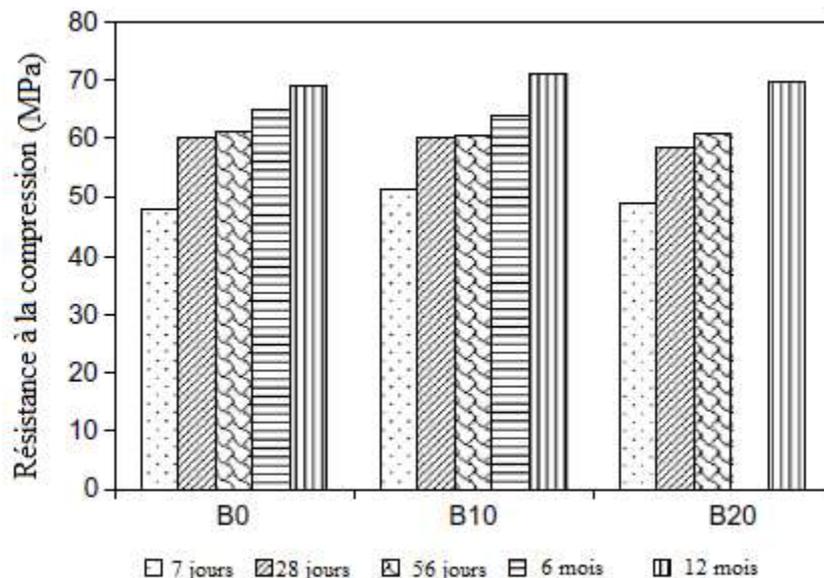


Figure II.11: Effet des déchets de brique sur la résistance à la compression des mortiers [27].

Khatib [51] a rapporté que le taux de substitution de 25% des agrégats par la brique produit la même résistance que celle du béton de référence. Le ratio à 28 jours était seulement de 0.84; le gain de résistance entre 28 et 90 jours a été attribué à l'action pouzzolanique fournie par les parties très fines de la brique.

Dans une autre étude, Debieb et Kenai [49] ont observé qu'il y'a une chute de résistance qui varie de 5% à 10% pour un taux de substitution en déchets de brique de 25%. La chute de résistance est de 30% pour une substitution totale de granulats en déchets de brique. Cette diminution de résistance, a été attribuée à l'existence de vieux mortier collé sur les granulats de déchets de brique ainsi qu'à la structure poreuse des granulats de brique qui conduit à une grande consommation en eau, provoquant ainsi la chute de la résistance à la compression.

Peu de travaux montrent que l'incorporation de la brique dans le béton produit une augmentation de la résistance à la compression [55].

La résistance à la traction est estimée à 28 jours de durcissement. Les résultats obtenus sont indiqués à la **Figure II.12**

II.6.4 Résistance à la traction

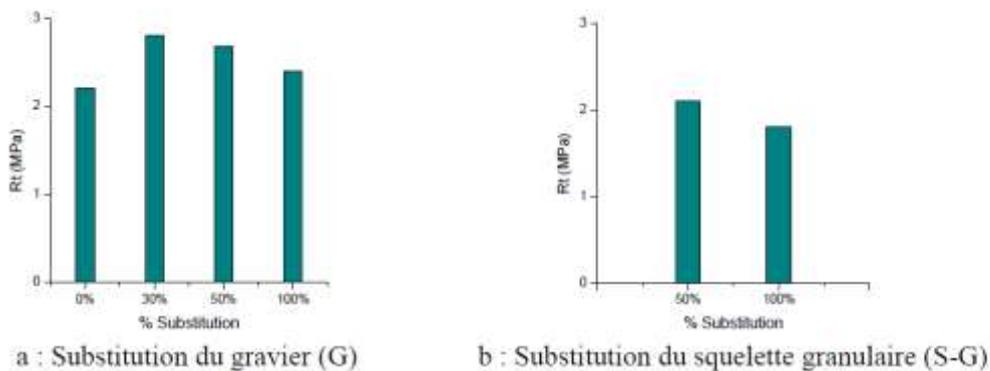


Figure II.12:Résistance à la traction à 28 jours de durcissement. .[56].

Azzeddine.L et all ont signalé que l'utilisation des granulats grossier de brique recycle améliore la résistance à la traction, en comparaison avec celle d'un béton ordinaire. La texture et la forme des granulats de brique concassée favorisent l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire.[56].

II.6.5 porosité accessible à l'eau

Le graphe de l'essai de mesure de la porosité accessible à l'eau réalisés sur des éprouvettes de mortier normalisé confectionnées avec ciment contenant, 0, 10, 20 et 30 % de déchet de brique sont illustrés dans le **Figure II.13** :

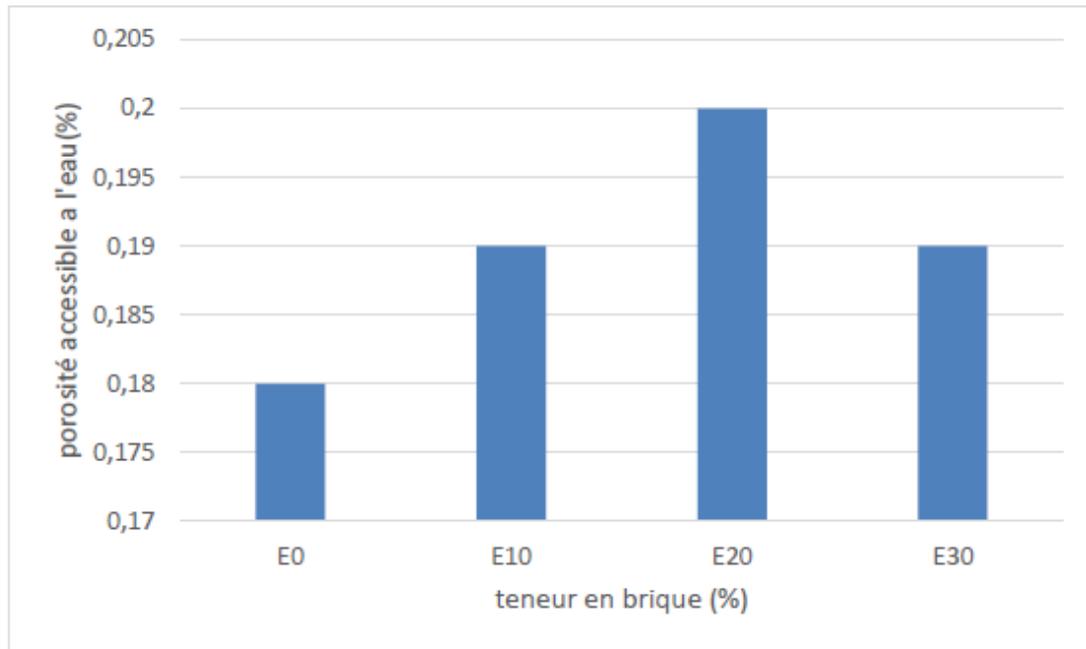


Figure II.13: graphe de Porosité accessible à l'eau.[59].

Nigri.G [59]. A à fait une étude sur quatre types de mortier tel que, un mortier de référence et trois autre avec 10%, 20% et 30% de substitutions de poudre de brique, illustré dans la **figure II.13** que montre que la porosité accessible à l'eau vraie avec le variation de la poudre de brique recyclée, donc cette augmentation est estimé de 1.05, 1.11 ; 1.05% pour les parentages 10%, 20% et 30% respectivement.

II.6.6 Effet des déchets de brique sur le gel-dégel

La **figure II.14** présente les courbes de dilatation des échantillons de mortier soumis aux cycles de gel-dégel. [50].

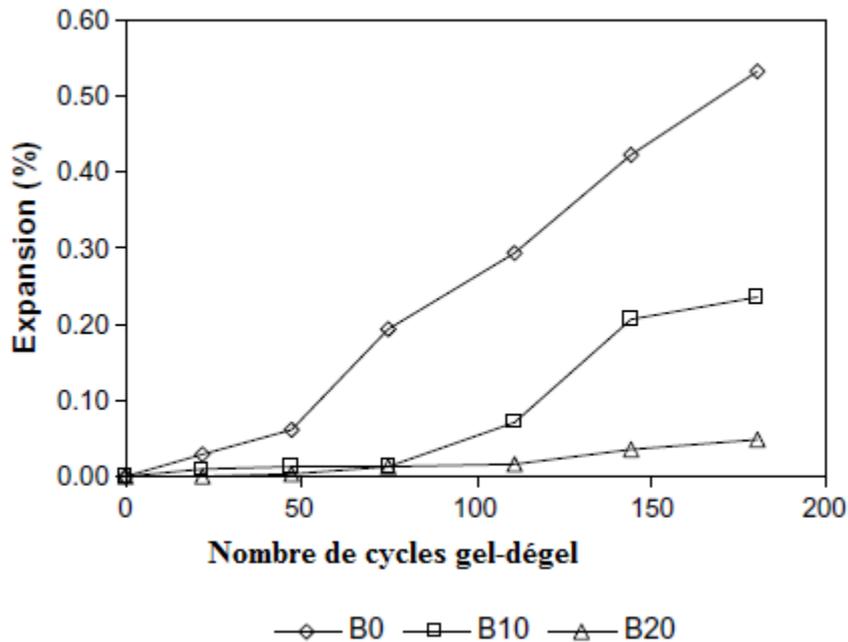


Figure II.14: Expansion du mortier soumis aux cycles gel-dégel[50].

Les éprouvettes de mortier ont subi une cure de 28 jours dans l'eau avant d'être exposées aux cycles de gel-dégel. La **figure II.14** démontre clairement que le taux de substitution de 20% en brique réalise la meilleure performance, ce qui fait que plus la quantité de brique augmente, plus la dilatation causée par les cycles de gel-dégel diminue. Après 180 cycles, le taux de substitution de 20% en déchets de brique provoque une expansion moyenne de 0.05% en comparaison à 0.53% pour les mortiers de référence..

D'après les études des Litvan et Serada , la résistance du béton au gel-dégel a été améliorée par l'incorporation de particules de brique poreuses, avec un diamètre de pores de 0.5 ± 0.08 mm. Les échantillons contenant 16% de particules de brique ont enduré 1260 cycles gel-dégel sans endommagement [57].

II.6.7 Le retrait

Le retrait de dessiccation attire le plus souvent une préoccupation particulière pour le béton fabriqué avec des agrégats recyclés, donc poreux. La **figure II.15** montre les résultats de l'essai de retrait effectué sur du mortier.

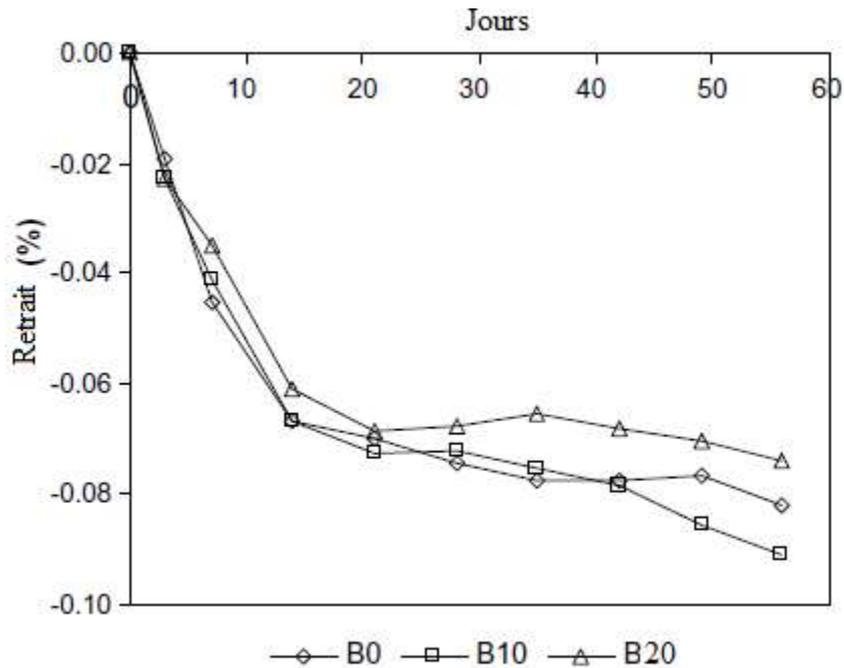


Figure II.15 : Effet des déchets de brique sur le retrait des barres de mortier [27].

Bektas et al. [50] trouvent que le mortier contenant 10% de déchets de brique provoque la plus forte contraction, tandis que le mortier contenant 20% de déchets de brique conduit à la plus faible valeur de retrait. Néanmoins, l'écart entre les différents résultats est relativement faible.

Khatib [52] révèle que plus le taux de substitution en déchets de brique n'augmente et plus le retrait est réduit. Cela a été expliqué par une création d'un gel pouzzolanique qui imbibe de l'eau. Les particules de brique peuvent favoriser le durcissement du béton ou du mortier : il maintient l'eau initialement absorbée du mélange dans les pores de la brique pour des périodes plus longues et par conséquent, l'hydratation continue et le retrait de dessiccation sera retardé [58].

II.7 Conclusion

De nos jours, le recyclage est devenu la meilleure solution pour protéger l'environnement, préserver les matières premières et contribuer à la construction dans le domaine du génie civil. Les déchets de briques rouges sont une alternative intéressante dans ce cas, car ces déchets sont disponibles sur les chantiers.

Pour cela dans ce chapitre, nous avons parlé sur la possibilité de recycler et d'utiliser les briques avec ses effets physico-mécaniques sur le comportement de béton.

Et nous avons cité des nombreux résultats de plusieurs chercheurs qui ont travaillé sur le recyclage et la valorisation des déchets de briques.

Chapitre III

Caractérisation Des matériaux utilisés et formulation du BCR

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons détailler les caractéristiques des matériaux utilisés pour mettre en œuvre quelques essais d'identification qui nous aident à choisir les matériaux pour la formulation du béton compacté rouleau à base de sable de brique recyclé et comparer avec un BCR témoin. Ainsi un programme expérimental détaillé sera présenté.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 Sables

III.2.1.1 Sable naturel

Les sables utilisés sont de provenance de Bougazoul, et Baghlia . Ils sont deux types de sables (**figure III.1**)

Sable fin S1 (0/1)

- Sable lave S2 (0/6).



Figure III.1: les sables utilise S1 (0/1) et S2 (0/6).

III.2.1.2 Sable de brique

Les déchets de brique utilisés dans cette étude ont été apportés d'une usine à Tipasa, Sidi Rachad, à environ 50 km à l'ouest d'Alger, en utilisant deux types d'argile, l'argile jaune et l'argile grise. Cette usine fabrique deux types de briques : des briques rouges à 8 trous de dimensions 10x20x30 et des briques à 12 trous de dimensions 15x20x30.

Dans notre étude, nous avons utilisé des briques rouges Comme représenté sur la **FigureIII.2** :



Figure III.2: déchets de brique

III.2.1.2.1 Concassage de brique

Le rôle du concassage est de réduire la taille et changer la forme des déchets de brique telle que ces déchets sont transformé en sable fin de fraction 0/1 et sable grossie 0/5.

III.2.1.2.2 Tamisage de brique :

Dans notre étude, nous avons tamisé les briques concassées en deux types de tamisage. Le premier tamisage est (1 mm, Brique fin) et le deuxième tamisage est (5 mm, Brique grossier), comme le montre la **figure III.3**.



Figure III.3 : Sable de brique fin et grossie.

III.2.1.3 L'Analyse granulométrique

L'essai est réalisé selon la norme NA 2607 et NF EN 933-2, consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes au haut vers le bas (**figure III.5**). 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. Le nombre et diamètre des tamis sont choisis selon la nature de l'échantillon. Après tamisage les masses des différents refus ou celle des différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériaux.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont illustrés dans la **Figure III.4** suivante :

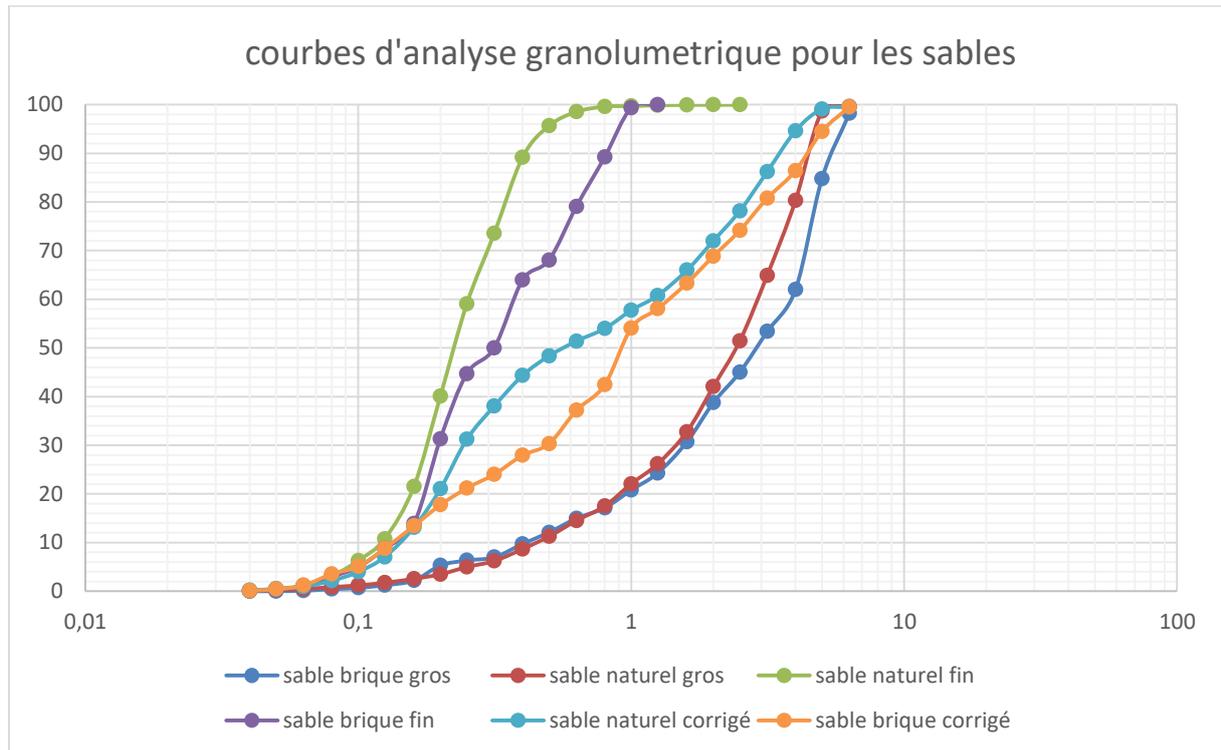


Figure III.4: Courbe de l'analyse granulométrique des sables.



Figure III.5: l'appareil utiliser pour l'essai d'analyse granulométrique

III.2.1.4 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 (Mf) 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.

Les résultats de module de finesse sont présentés dans le **tableau III.1**

Tableau III.1 : MF des sables

	Sable grossie naturel	Sable fin naturel
MF	4,249	1,067

Tableau III.2 : MF des sables de brique recyclée

	Sable grossie de brique recyclée	Sable fin de brique recyclée
MF	4,218	1,57

III.2.1.5 Masse volumique

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

III.2.1.5.1 Masse volumique apparente

Il s'agit de mesurer la masse de récipient cylindrique d'un volume connu : 1litre et 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.

a-1 Masse volumique apparente de Sable naturel

Tableau III.3 : Masse volumique apparente des sables.

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

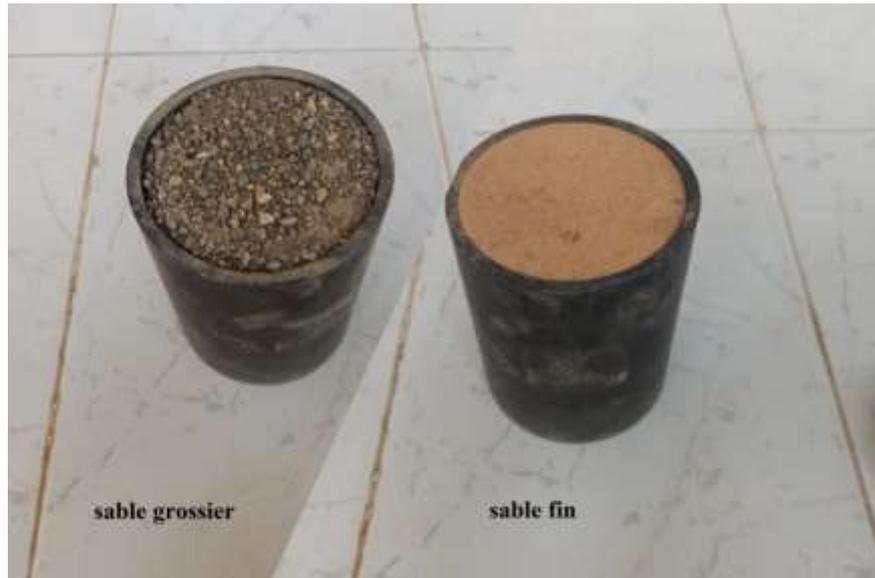


Figure III.6 :Essai de la masse volumique apparente.

a-2 Masse volumique apparente de Sable de brique

Tableau III.4 : masse volumique apparente de brique

Masse de récipient= 504.3g
Volume de récipient = 1L
$\rho_{app} = 1,164(g/l)$

III.2.1.5.2. Masse volumique absolue

La méthode de l'éprouvette graduée est appliquée. Cette méthode est réalisée selon la norme NF EN 1097-6 est consistée à

- remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 .
- Peser un échantillon sec M 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 et la masse volumique absolue est alors donné par la formule suivante :

$$p_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

a-1 Sable de naturelle

Tableau III.5 : Masse volumique Absolue des sables naturelle.

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

a-2 Sable de brique

Tableau III.6 : Masse volumique Absolue des sables de brique.

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

III.2.1.6. Absorption d’eau des sables :

On détermine un coefficient d'absorption selon la norme NF P 18-555, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption Ab est défini par la relation suivante :

$$\text{Absorption \%} = \frac{\text{Masse sature} - \text{Masse sec}}{\text{Masse sec}} \times 100$$

Les résultats de L’absorption de brique est dans le **tableau III.7 et III.8** pour les sables naturel et de brique :

Tableau. III.7: Absorption de sable optimal.

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

Tableau. III.8: Absorption de sable de brique recyclée.

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

III.2.1.7. Equivalant de sable :

L'essai de l'équivalent de sable permet de mesurer la propreté du sable en séparant les particules fines contenues dans le sable des éléments plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de sable. Cette essai est réalisé selon la norme NFP 18-597 et NFP 18-598, en suivant le mode opératoire suivant :

- Tamiser le sable dans le tamis 5mm et déterminer sa teneur en eau.
- Prendre une prise d'essai Mh : $Mh=120*(1+W/100)$.
- 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 réglé (hauteur visuelle).

Calcul et expression des résultats :

- Pour chaque éprouvette on calcul :
- L'équivalent de sable au piston $ES=H2/H1*100$.

- L'équivalent de sable visuel $ES' = H'2/H1 * 100$.
- 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.
- Nature et qualité :
- $Es < 60$: sable argileux : risque de retrait ou de gonflement.
- $60 < Es < 90$: sable légèrement argileux : de propreté admissible pour des bétons de qualité.
- $Es > 80$: sable très propre : absence des fines.



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

À partir de l'essai d'équivalent sable, nous avons trouvé du sable propre comme indiqué dans le **tableau III.9** suivant :

Tableau III.9 : résultat de l'essai d'équivalent de sable

	ESV	ESP
--	-----	-----

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

III.2.2 Les graviers :

Dans notre étude, nous avons utilisé quatre types de gravier qui sont les suivants :

G1:3/8, G2:8/15, G3:15/25, G4:25/50

Leurs granulométries sont présentées dans la **figure III.8**:



Figure III.8: Les graviers utilisés.

III.2.2.1 Propreté des graviers

L'essai est réalisée selon la norme NFP 18-591

Mode opératoire :

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

$$p(\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_0}$$

Tableau III.10: Propreté des graviers

Propreté du gravier 3/8		Propreté du gravier 8/15		Propreté du gravier 15/25		Propreté du gravier 15/50	
M₀ (g)	343,5	M₀ (g)	521.6	M₀ (g)	386,7	M₀ (g)	409,2
M₁ (g)	337.5	M₁ (g)	510.0	M₁ (g)	383.6	M₁ (g)	406.6
P(%)	1,74	P(%)	2,22	P(%)	0,80	P(%)	0,63

III.2.2.2 Analyse granulométrique par tamisage

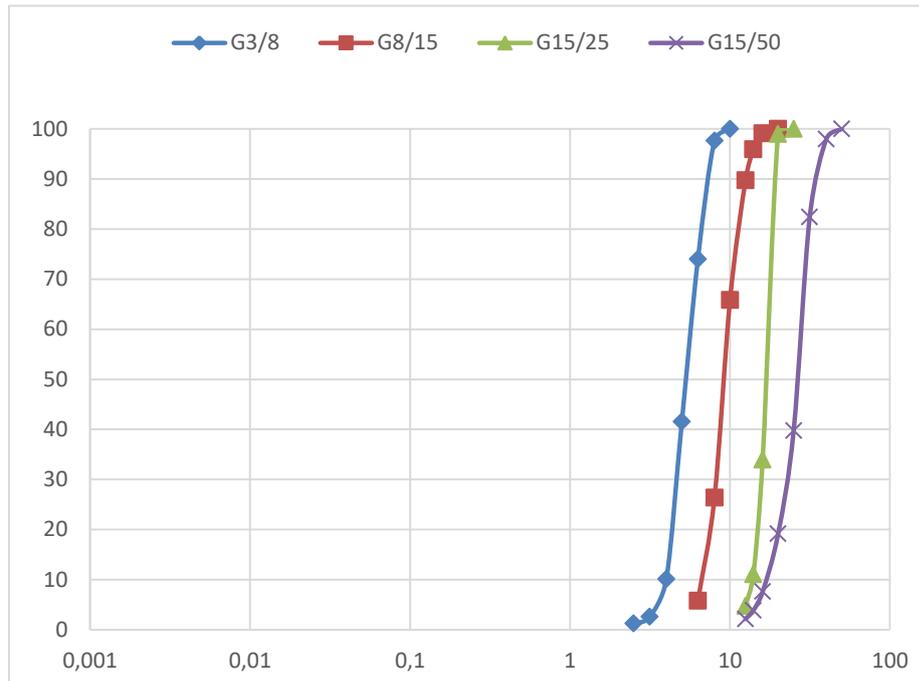


Figure III.9: Résultats d'analyse granulométrique



Figure III.10: Essai de la granulométrie d'un gravier

Tableau III.11: 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
$\rho_{app} = 1,447 \text{ (kg/l)}$	$\rho_{app} = 1,336 \text{ (kg/l)}$	$\rho_{app} = 1,358 \text{ (kg/l)}$	$\rho_{app} = 1,287 \text{ (kg/l)}$

Tableau III.12: 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
$\rho_{\text{abso}} = 2.67 \text{ (kg/l)}$	$\rho_{\text{abso}} = 2.67 \text{ (kg/l)}$	$\rho_{\text{abso}} = 2.65 \text{ (kg/l)}$	$\rho_{\text{abso}} = 2.65 \text{ (kg/l)}$



Figure III.11: masse volumique de gravier

III.2.2.3 Absorption de gravier :

L'essai ce fait selon la norme NF P 18-554 Les résultat sont dans le **tableau III.1**

Tableau III.13: 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
Gravier 15/25	300	303	1.00
Gravier 15/50	500	502.9	0.58

III.2.3 Fillers

Fillers ou fines ou aussi intitulé fines d'addition est un granulat fin, de diamètre allant de 0 à 125 μm environ. Les fillers utilisées sont de provenance de la région de MOSTAGANEM.



Figure III.12 : Fillers calcaires

III.2.3.1 Masse volumique apparente

Tableau III 14 : Masse volumique apparente du calcaire.

Masse volumique apparente du calcaire ρ_{app}	
M1(g)	1,097
M2(g)	1,0636
M3(g)	1,05
M_{moy}(kg)	1,0702
ρ_{app} (kg/l)	1,0702

.2.3.2 La Masse volumique absolue

Tableau III.15 : Masse volumique absolue du calcaire

1	ρ_{toluene}(kg/l)	0,868
	M_{toluene} (kg)	0,01224
	V_{calcaire} (l)	0,01410138
	ρ calcaire (kg/l)	1,77287582

III.2.3.3 Analyse granulométrique

La granularité du filler calcaire a été mesurée par sédimentation. Les résultats sont présentés par la **figure III.13**.

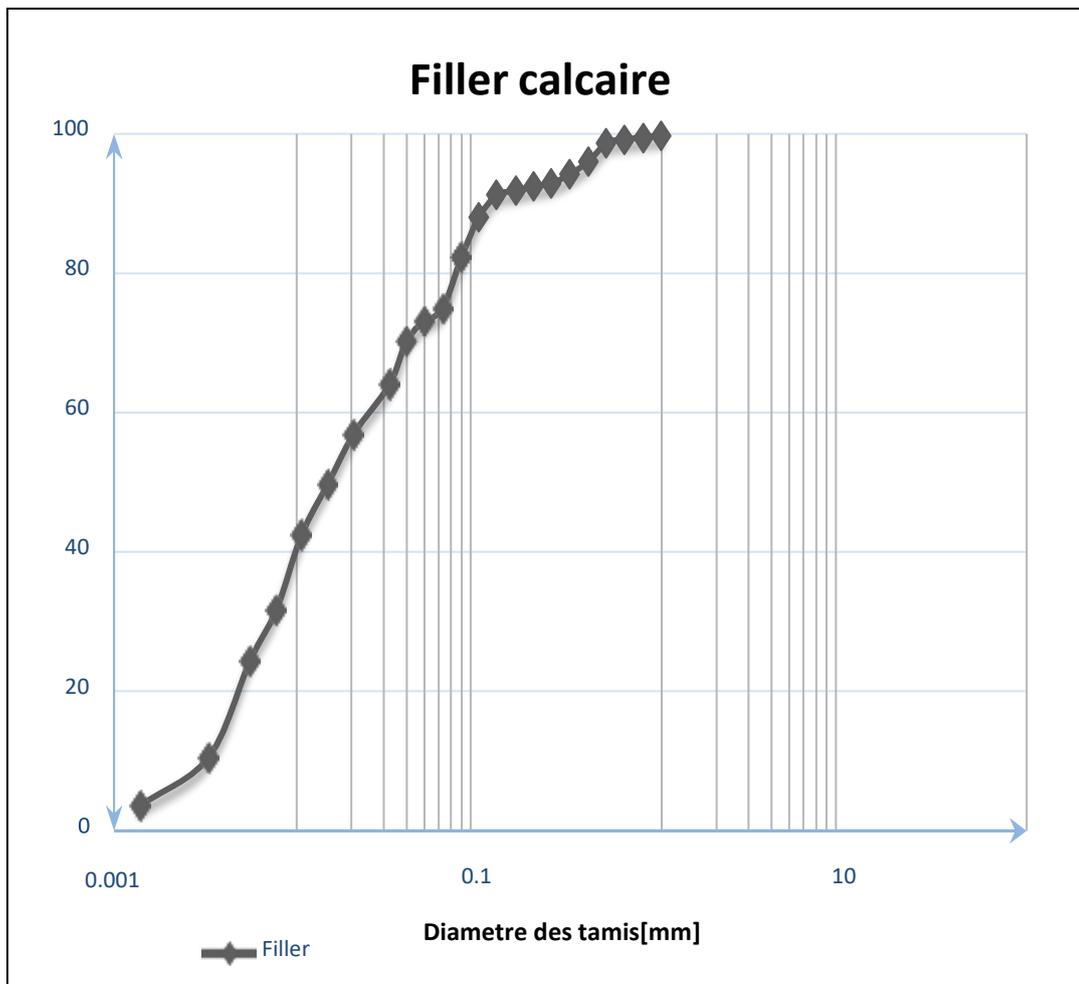


Figure III 13:Granulométrie du filler calcaire.

III.2.4 Le ciment

Pour notre étude on a utilisé le ciment portland provenant du MEFTAH, de type CEM II 42.5.

III.2.4.1 La classe vraie du ciment

La résistance vraie du ciment a été mesurée sur des éprouvettes de mortier 4x4x16 (figure III.14) selon la norme EN 196-1. Les résultats sont présentés dans le **tableau III.16**



Figure III.14 : Mortier de ciment

Tableau III.16: la résistance a la traction et la compression

	Contrainte à la traction (MPA)	Contrainte à la compression (MPA)		
		Eprouvette1	Eprouvette2	Eprouvette3
7Jour	4,715	22.99	26.924	
	5,404	27.1664	27.489	
	4,715	26.774	24.92	
28Jour	8,44	45.91	42.92	
	7,063	20.209	42.120	
	7,321	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 basalte. 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 III.15** a été extrait du rapport d'activité de laboratoire du barrage en BCR de Tabellout, réalisé par l'entreprise RAZEL-Bec.

Plusieurs mélanges ont été réalisés, entrant tous dans fuseau (**figure III.15**). 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.

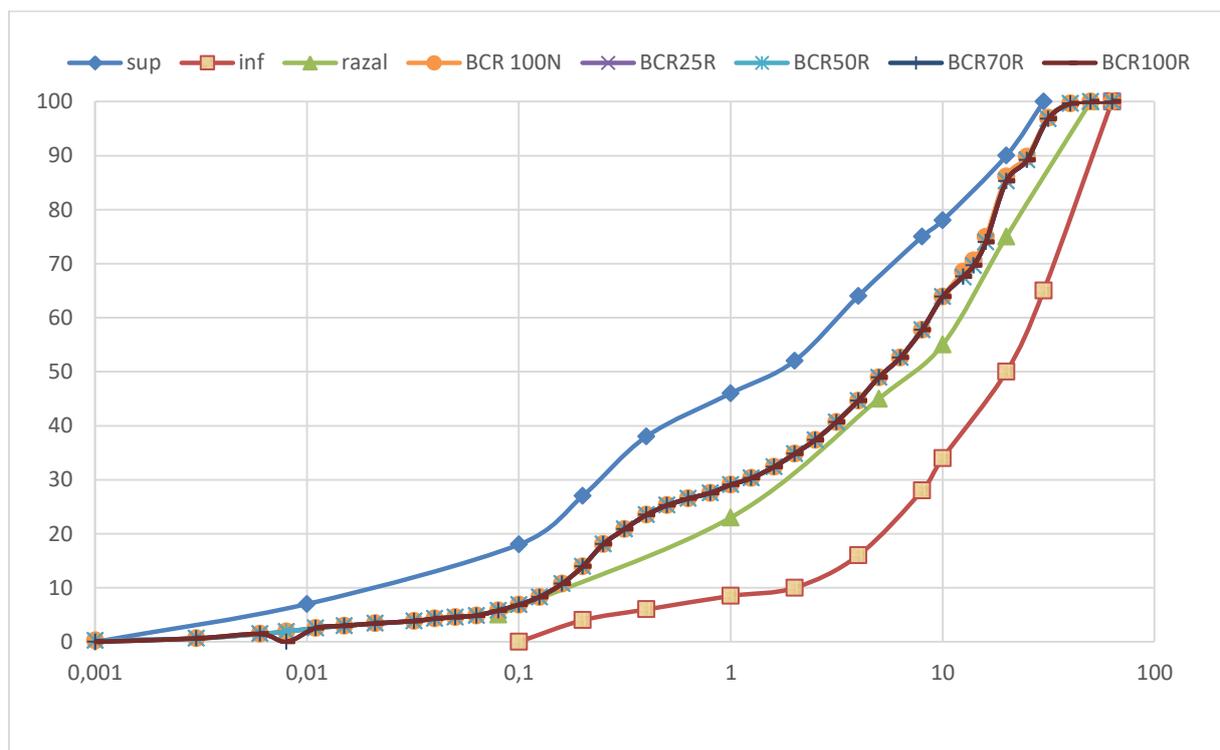


Figure III.15 : Courbes représentant la granulométrie des mélanges choisis

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 d'une table vibrante avec une fréquence de 50Hz, un moule cylindrique de diamètre 265mm et hauteur de 254mm 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.16 : Appareil de compactage .

➤ Mode Opérateur :

Pesage des différentes fractions du mélange, -Introduire les éléments pesés dans le sac d'homogénéisation du mélange

- Introduire le mélange dans le moule, avec une faible hauteur de remplissage.
- Racler le surplus de mélange après le remplissage.
- Pesé l'échantillon avant l'essai, la masse est notée « m_l ».

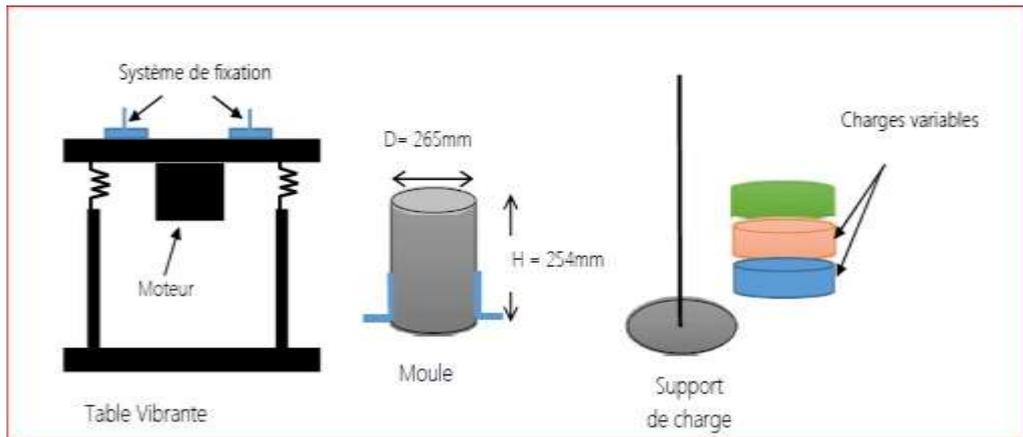


Figure III.17 : composante de l'appareille de compacité

- Poser et fixe le moule sur la table, et démarrer l'essai.
- Après une minute de l'essai arrêter la table vibrante et à l'aide d'un pied à coulisse numérique mesure la hauteur « h ».
- Pesé l'échantillon après l'essai, la masse est noter « m2 ».
- Réintroduire l'échantillon dans leur sac.
- La compacité est mesurée par cette méthode :

$$C = \frac{V_s}{V_t}$$

- Tel que :
- : $V_s = S \times h = S \times (H - H_{vmoy})$.
- VT Volume total tel que : $V_T = S \times H$.
- H : Hauteur de l'échantillon avant compactage.
- H_{vmoy} : Hauteur de l'échantillon après compactage.

Tableau III.17: les résultats de la compacité.

	B0	B1 25%	B2 50%	B3 70%	B4 100%
H_{moy} mm	3,6	3,49	3,48	3,336	3,9
Compacité	0,858	0,863	0,862	0,867	0,846

III.3.3 Dosage en ciment rapport E/C

Le choix du ciment a été effectué à partir de la littérature et des rapports d'activités des barrages construits [130 et 170 Kg/m³], tandis que le rapport E/C a été fixé en fonction du Temps VEBE souhaité.

III.3.4 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 (BCRI 0, BCRI 25, BCRI 50, BCRI 70 BCRI 100%). Ainsi les cinq formulations de BCR étudiés sont présentées dans **les tableaux 18 et 19** :

Tableau III.18 : formulation pour un dosage de 130kg/m³

Matériaux	BCRI0	BCRI25%	BCRI50%	BCRI70%	BCRI100%
Filler	133,848	134,628	132,026	132,026	131,976
sable naturel	892,32	673,14	440,089	264,053	
sable de brique		199,353	355,457	497,639	820,789
G 3/8	183,2688	138,252	158,178	158,178	135,529
G8/15	343,629	322,589	338,953	338,954	316,234
G15/25	318,318	320,173	313,987	313,987	313,866
G15/50	386,529	411,651	403,697	403,698	403,542
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

Tableau III.19 : formulation pour un dosage de 170kg/m³

Matériaux	BCR10	BCR25%	BCR50%	BCR70%	BCR100%
Filler	127,303	134,628	127,302	127,303	127,303
sable naturel	848,684	673,14	424,341	254,605	-
sable de brique	-	199,353	342,737	497,833	791,724
G 3/8	174,607	138,2526	152,517	152,518	130,731
G8/15	326,825	322,5894	326,824	326,825	305,037
G15/25	302,752	320,173	302,751	302,752	302,752
G15/50	367,627	411,651	389,252	389,252	389,252
Ciment	170	170	170	170	170
Eau	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5
Adjuvant	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

III.4 Malaxage de béton

Le malaxage est un des paramètres qui influencent les caractéristiques des bétons et affectent leur performance. Le meilleur mélange qui a une bonne répartition de ses ingrédients, et par conséquent plus grande est la chance d'avoir un meilleur béton.

La méthode de mélange est représentée dans la **Figure III.18**

1 Min de
malaxage à sec:
G+S+F+C

3 Min de malaxage + eau + adjuvant

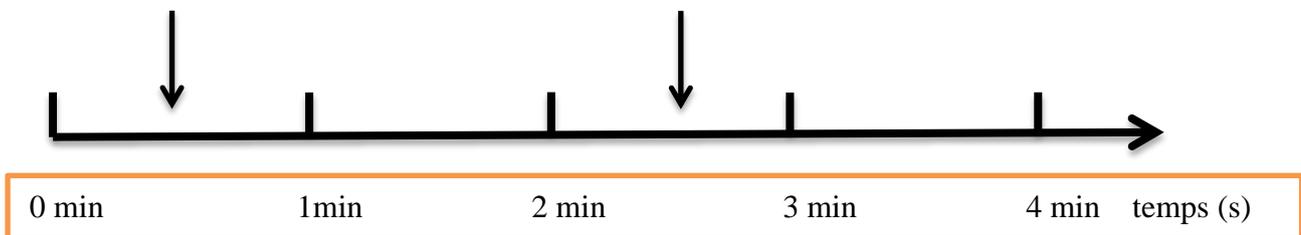


Figure III.18 : séquence de malaxage du béton.

III.5- Caractérisation du BCR à l'état frais

III.5.1- L'essai 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. Le système est composé de :

- 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.
- 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 $(6 \pm 2 \text{ mm})$.
- Le moule doit être équipé de supports métalliques fendus fixés de façon permanente afin qu'il soit fixé rigidement à la table vibrante.
- 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.

- 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.
- 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.
- Dispositif de chronométrage : Chronomètre capable d'enregistrer des intervalles de temps d'au moins 2 minutes au second près.



Figure III.19: Appareille VEBE

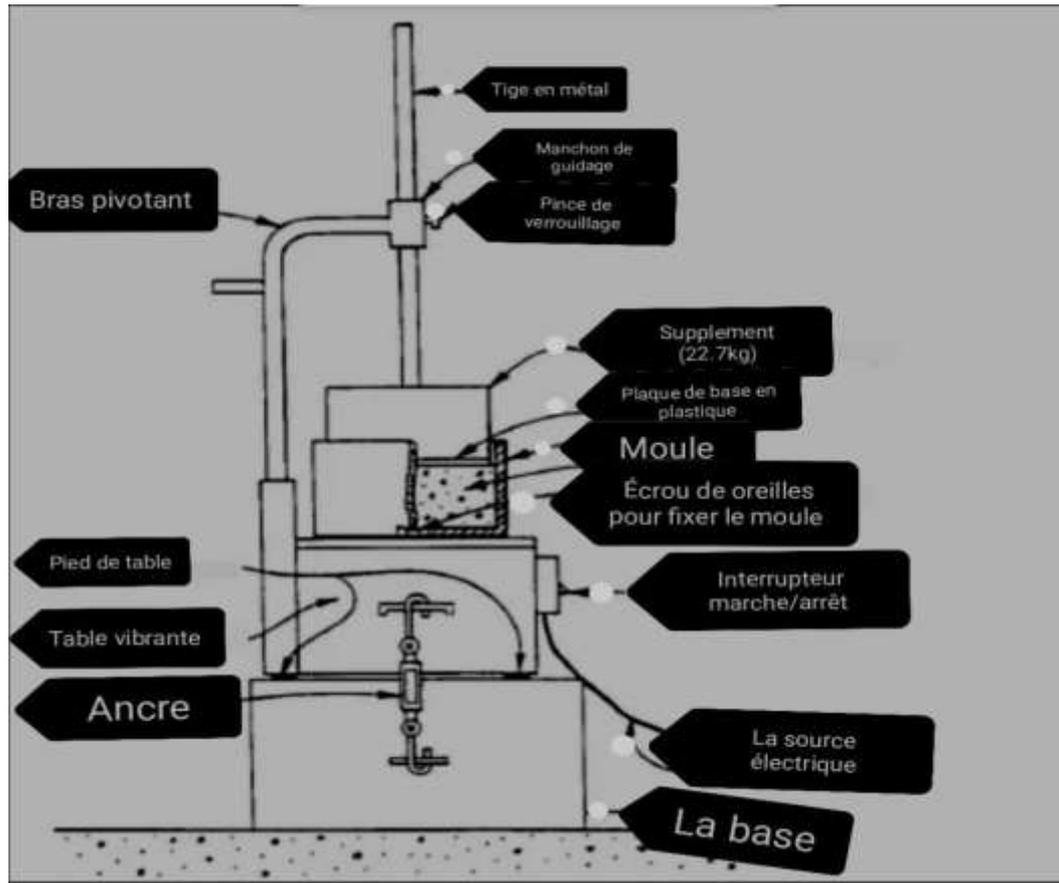


Figure III.20: schéma l'appareille vebe

➤ **Procédure de l'essai :**

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

- 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.
- 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.
- 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, 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
- 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.
- 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
- Après avoir déterminé le temps de Vebe, enlever la surcharge. Vibrer l'éprouvette sans la surcharge pour une durée totale cumulée (incluant le temps de consistance initiale) de 2 min
- Retirer le moule contenant l'éprouvette consolidée de la table Vebe, et essuyez tout le mortier de la paroi intérieure du moule cylindrique au-dessus du niveau du béton consolidé. Placez la plaque plate sur le moule cylindrique et déterminez à 4,5 g près la masse du moule cylindrique, de l'échantillon de béton consolidé de la plaque plate. Déterminez la masse de l'éprouvette en soustrayant la masse du moule cylindrique et de la plaque plate
- Déterminer la masse totale de ce qui suit du moule cylindrique, de l'éprouvette consolidée, et de la plaque plate.
- Déterminer le volume de l'éprouvette

III.5.2 Mise en place des éprouvettes dans les moules et conditions de cure :

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.21**

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et stockées dans un bac d'eau à 20°C (**figure III.22**).



Figure.21: compactage de béton BCR



Figure III.22 : Stockage des éprouvette

III.6 Caractérisation du BCR a l'état durci :

III.6.1 Résistance à la compression des éprouvettes

L'essai de la résistance à la compression faire selon la norme : NF EN 12390-3 2001.

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

Procédure de l'essai

➤ Préparation et positionnement des éprouvettes

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.
- Enlever tout appareillage, autre que les plateaux auxiliaires ou éléments d'espacement, (voir l'EN 12390-4), entre l'éprouvette et les plateaux de la machine d'essai.
- Positionner les éprouvettes cubiques de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou du diamètre pour les éprouvettes cylindriques.
- Si des plateaux auxiliaires sont utilisés, les aligner avec la face supérieure et la face inférieure de l'éprouvette.
- Avec des machines d'essai à deux colonnes, il convient de placer la surface moulée des éprouvettes cubiques en face de l'un des montants.

➤ Mise en charge

Sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage 0,2 MPa/s (N/mm².s) à 1,0 MPa/s (N/mm² . s). Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante sélectionnée 10 % jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

En cas d'utilisation de machine d'essai commandée manuellement, compenser, lorsque la rupture d'éprouvette est proche, toute tendance au ralentissement de la vitesse sélectionnée de charge, par un réglage approprié des commandes.

La charge maximale obtenue doit être enregistrée.

➤ Expression des résultats

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

où :

- f_c est la résistance en compression, exprimée en mégapascals (Newtons par millimètres carrés) ;
- F est la charge maximale, exprimée en N.
- A_c est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette (voir l'EN 12390-1) ou à partir des mesures d'éprouvettes selon l'annexe B, exprimée en millimètres carrés. La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPA (N/mm^2) près.



Figure III.23: L'écrasement des éprouvettes

III.6.3 Résistance à la traction par fendage

Cet essai permet de déterminer expérimentalement la résistance en traction du béton par la norme (NF-EN-12390-6).

Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre une éprouvette de béton durci à un effort de compression appliqué sur une zone étroite au moyen d'un dispositif de fendage qui permet la rupture de l'éprouvette.

Appareillage d'éprouvettes

- Machine de compression

- Dispositif de fendage
- Bandes de chargement
- Les éprouvettes essayées sont de forme cylindrique

Mode d'opérateur

Essuyer toute humidité ou corps étrange de l'éprouvette, des bandes de chargement et des plateaux de la machine. -Placer le dispositif de fendage dans la machine de compression, placer l'éprouvette, mettre les bandes de chargement, puis centrer l'ensemble entre le plateau inférieur et supérieur de la machine.

Expression des résultats

Calcul et expression des résultats A la rupture, la force appliquée est affiché sur l'écran de la machine. La résistance au fendage est donnée par la relation suivante :

$$F_{ctm} = \frac{2 \times F_{rup}}{\pi \times D \times L}$$

Avec :

σ_{tm} : contrainte de traction ; F_{rup} la Force de rupture, D , le diamètre de l'éprouvette et L sa longueur.



Figure III.24 : écrasement d'une éprouvette cylindrique par l'essai de traction par fendage.

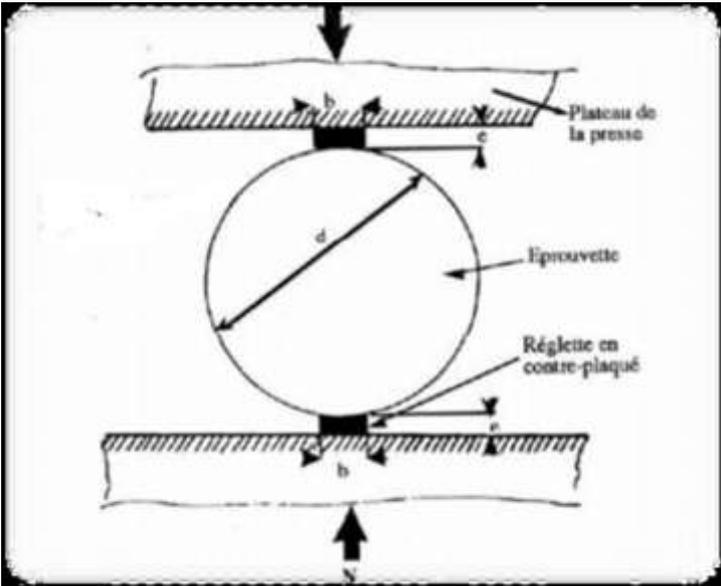


Figure III.25 : l'essai de traction par fendage .

III.6.4 Perméabilité à l'eau (sous pression)

L'essai de pénétration d'eau sous pression est effectué selon la norme DIN EN 1048 sur les bétons étudiés, après un mûrissement dans l'eau à 20°C jours. Avant l'essai, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

L'essai consiste à appliquer de l'eau sous pression sur la face inférieure de l'éprouvette, pendant un temps donné et de mesurer la profondeur de pénétration de l'eau **Figure III.26 et III.28**. Dans notre cas, une pression de 5 bars est appliquée pendant 24 heures ont été choisis comme paramètre d'essai. À la fin de l'essai, l'éprouvette est fendue en deux parties par un essai de traction par fendage et la profondeur de la pénétration de l'eau est mesurée **Figure III.27**. Pour chaque variable, deux éprouvettes sont testées et la valeur moyenne est calculée.



Figure III.26 : Appareil de perméabilité.



Figure III.27 : des éprouvettes écraser d'après essai traction par fendage pour mesurer la pénétration d'eau.

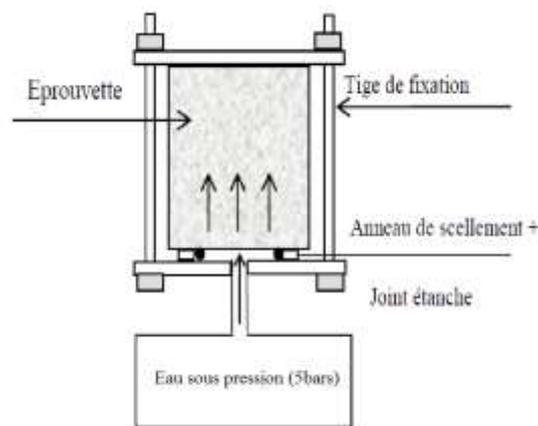


Figure III.28 : schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pres

III.6.5 Porosité accessible à l'eau :

Il existe une norme pour la détermination de la porosité accessible à l'eau (NF P 18-459)

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides et du volume apparent du matériau. La porosité des bétons se mesure classiquement par imbibition d'eau sous vide : on parle de porosité accessible à l'eau. La porosité est un paramètre global dont dépendent toutes les propriétés de transfert, comme le coefficient de diffusion du CO₂. C'est donc un indicateur de première importance vis-à-vis des agressions extérieures.

L'essai de porosité accessible à l'eau a consisté à mesurer la porosité des éprouvettes de béton afin de déterminer le pourcentage de vide pouvant être occupé par l'eau. La technique utilisée est une variante de la porosité à l'eau par pesée hydrostatique

La porosité à l'eau est déterminée selon l'équation :

$$P = x = \frac{M_{set} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{satimm}} \times 100.$$

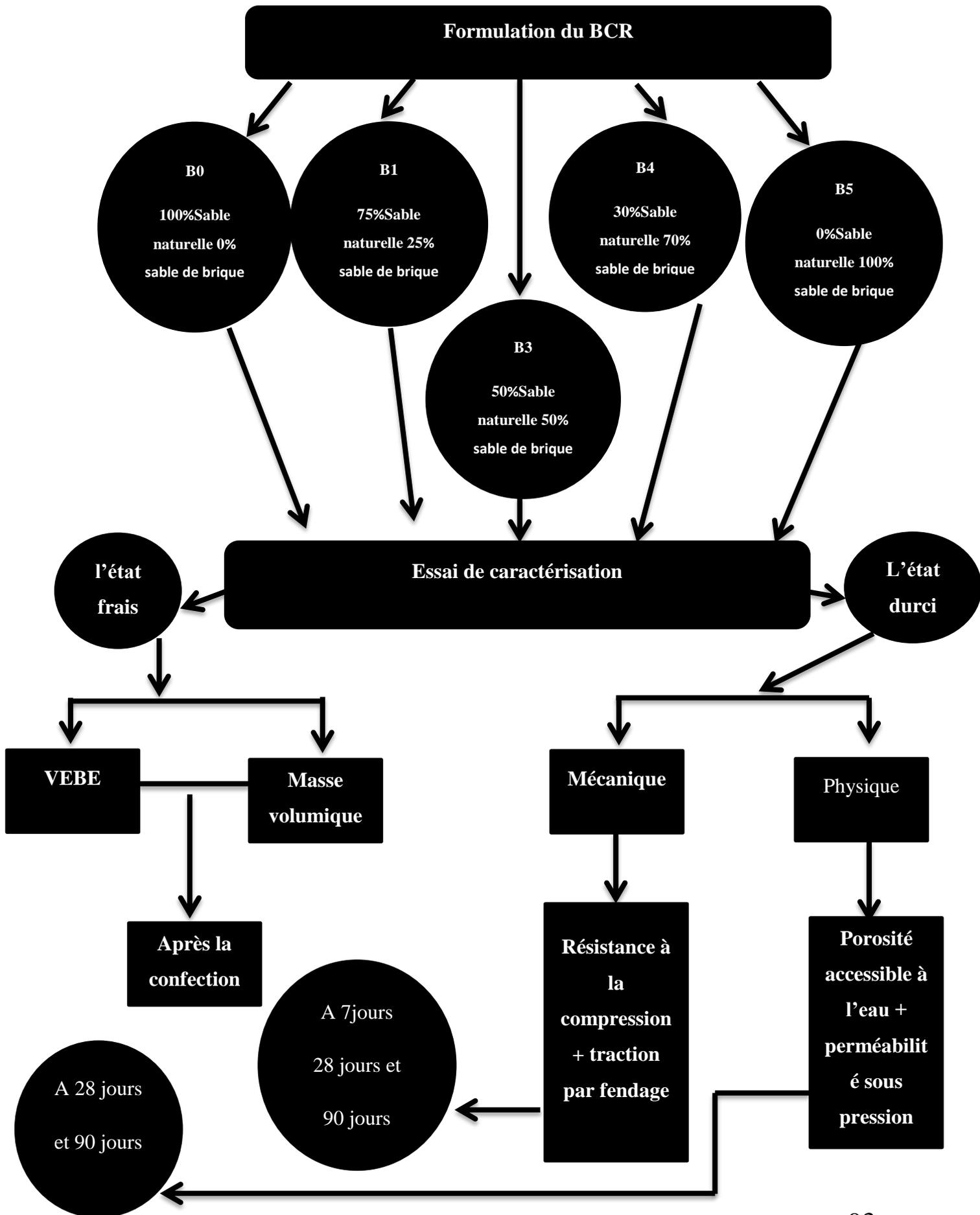
P s'exprime en % (c'est un rapport volumique). La connaissance de la masse de l'éprouvette dans ces trois états (sèche, saturée immergée et saturé dans l'air).



Figure III.29 : la pareille de porosité accessible a l'eau

III.7 Programme expérimental

Pour avoir une bonne vue d'ensemble, l'organigramme suivant montre un rescapé du programme expérimental réalisé dans notre étude. Il est à noter que les BCR II, avec 170 Kg de ciment ont été confectionnés mais pas encore testés. Seule la résistance mécanique à 7 a été mesurée.



Chapitre VI : Analyse et Interprétation Des Résultats

IV.1 -Introduction :

Dans ce chapitre, sont exposés les résultats des différents essais réalisés sur le BCR aux deux états frais et durci, après avoir fixé tous les paramètres de formulation on étudiera par la suite l'effet du sable recyclé de brique sur l'ouvrabilité des BCR, les caractéristiques mécaniques et les propriétés relatives à la durabilité du BCR tel que perméabilité sous pression et porosité accessible à l'eau.

IV.2- Résultats :

IV.2.1- L'état frais :

IV.2.1.1-Temps Vébé :

Afin de faciliter la comparaison des BCR entre eux, tous les bétons ont été fabriqués à un rapport E/C constant, pour le premier BCR un rapport E/C=0.85 et pour le deuxième BCR un rapport E/C=0.75. La **figure IV.1** et le **tableau IV.1** présente les résultats de l'ouvrabilité pour le dosage 130kg/m^3 et E/C=0.85. On remarque une augmentation de temps VEBE des mélanges 50% ,70% et 100% de sable de brique, qui sont respectivement 5.31% ,15.79% et 31.58% par rapport au BCR témoin. **La figure IV.2** et le **tableau IV.2** présentent les résultats de l'ouvrabilité pour le dosage ($C=170\text{kg/m}^3$) où une augmentation du temps VEBE dans les mélanges avec 50%, 70% et 100% de brique, qui sont de 5.26%, 10.53% et 26.32% respectivement, par rapport au BCR témoin. Le BCRII25% a enregistré le même temps que celui du BCRII0% de référence. Cette augmentation de temps VEBE peut être attribuée à la forme ainsi que le taux d'absorption de sable de brique. En effet le sable de brique a une forme angulaire contrairement au sable naturel et absorbe beaucoup plus d'eau, ce qui mène de la perte de maniabilité des mélanges même si la quantité d'eau a été ajustée par l'eau absorbé des différents granulats.

Tableau IV.1 : Temps Vébé pour les mélanges réalisés.

	temps Vébé $c=130(\text{kg/m}^3)$ E/C=,85				
Type de béton	BCRI0	BCRI25%	BCRI50%	BCRI70%	BCRI100%
Temps (s)	19	19	20	22	25

Tableau IV.2 : Temps Vébé pour les mélanges réalisés.

	temps vébé $c=170(\text{kg}/\text{m}^3)$ $E/C=0,75$.				
Type de béton	BCRII0	BCRII25%	BCRII50%	BCRII70%	BCRII100%
temps(s)	19	19	20	21	24

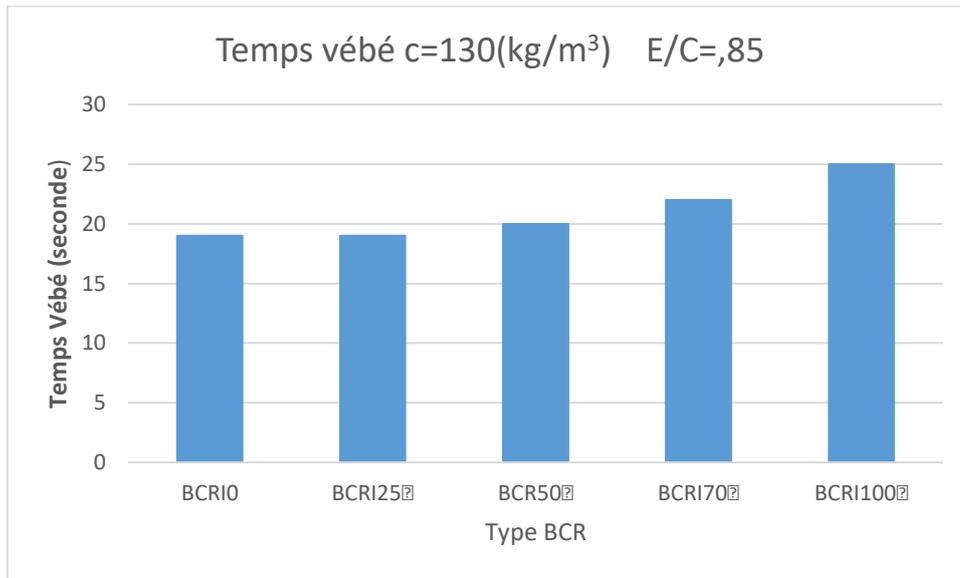


Figure IV.1 : Temps vébé en fonction de taux de substitution pour le dosage 130 (kg/m^3) et $E/C=0.85$.

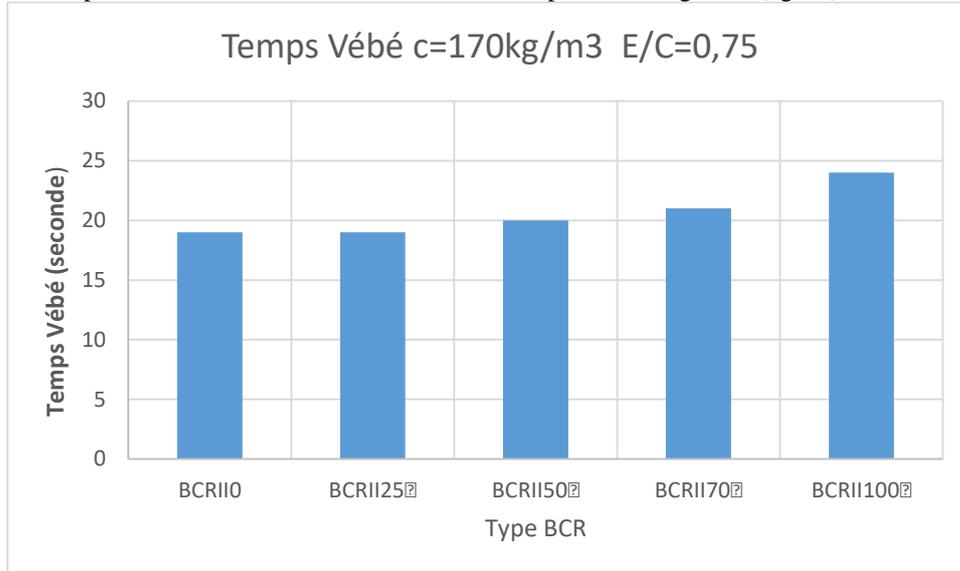


Figure IV.2 : Temps vébé en fonction de taux de substitution pour le dosage 170 (kg/m^3) et $E/C=0.75$.

IV.1.1.2-Masse volumique théorique :

Les **figures IV.3 et IV.4** présentent la variation de la masse volumique théorique des différents BCRI et BCR II respectivement en fonction de pourcentage de remplacement de sable naturel par le sable de brique recyclée. Les figures montrent une baisse de la masse volumique du BCR avec l'augmentation de la quantité de brique. Cette diminution est d'environ 2.3%, 4.57%, 5.93% et 5.44% avec les taux de substitution 25% ,50%,70% et 100% respectivement par rapport au BCRI de référence de 130 kg/m³. Pour les BCR II (C= 170kg/m³) elle est de 2.28%, 6.49%, 7.93% et 7. 36%. Cette diminution de densité est due relativement à la densité faible de sable brique recyclé. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenue par nombreux chercheurs [60].

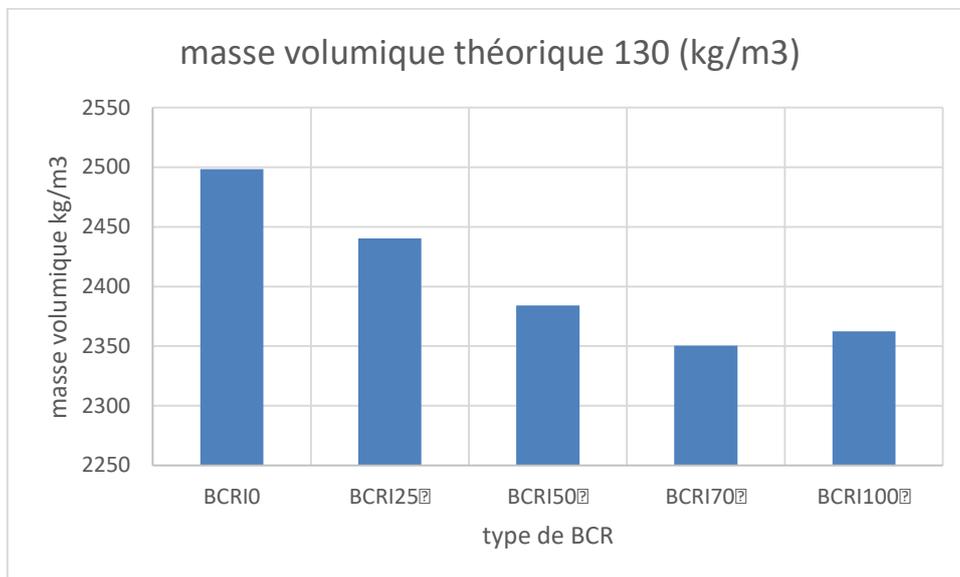


Figure IV.3 : masse volumique de béton en fonction de taux de substitution pour dosage 130 (kg/m³).

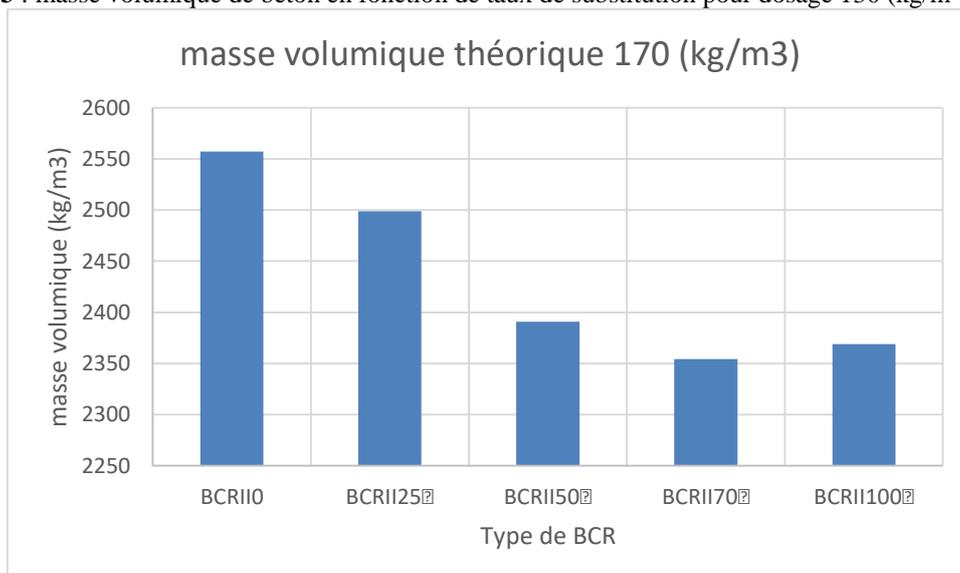


Figure IV.4 : masse volumique de béton en fonction de taux de substitution pour dosage 170 kg/m³.

IV.2.2- Etat durci :

IV.2.2.1- Résistance à la compression :

Les variations de la résistance en compression des BCR formulés en fonction du pourcentage de sable de brique recyclée pour chaque dosage à savoir 130kg/m^3 et 170kg/m^3 sont illustrés sur les **figures IV.5 et IV.6**. Par manque de temps, les résultats de la deuxième formulation sont limités à 7 jours (les éprouvettes pour 28 et 90 jours ont été confectionnées et attendent leurs échéances d'écrasement).

Les résultats obtenus montrent que le remplacement de sable naturel par le sable de brique recyclée engendre une divergence dans les tendances selon l'âge du BCR :

- A jeune âge (7 jours), on note pour les deux dosages (130kg/m^3 et 170kg/m^3) pour les formulations contenant 25%, 50% et 100% de brique recyclée, l'augmentation est de l'ordre 39.68%, 10.51% et 0.47% et une diminution de 3.08% pour 70%. Pour le BCR II avec un dosage $C = 170\text{ kg/m}^3$, la même tendance a été observée (gain de résistance pour les BCR avec sable de brique), sauf que la substitution de 100% de sable de brique recyclée qui a conduit à une diminution de 2.83% par rapport au BCR II 0%, qui reste minime. Il faut noter que les résistances à la compression des BCR II sont nettement supérieures à celles des BCR I de même % de sable. Cela est dû à l'augmentation du dosage en ciment (de 130 à 170 kg/m^3) et de la diminution du rapport E/C (de 0,85 à 0,75).
- A l'âge de 28 jours, pour les BCR I l'augmentation est de 55.28%, 20.81%, 14.75%, et 24.22% respectivement pour 25, 50, 70 et 100% de sable de brique.
- A l'âge de 90 jours, pour les BCR I l'augmentation est de 38.72%, 9.36%, 14.71% et 26.05% cure respectivement pour 25, 50, 70 et 100% de sable de brique, comparé au BCR témoin.

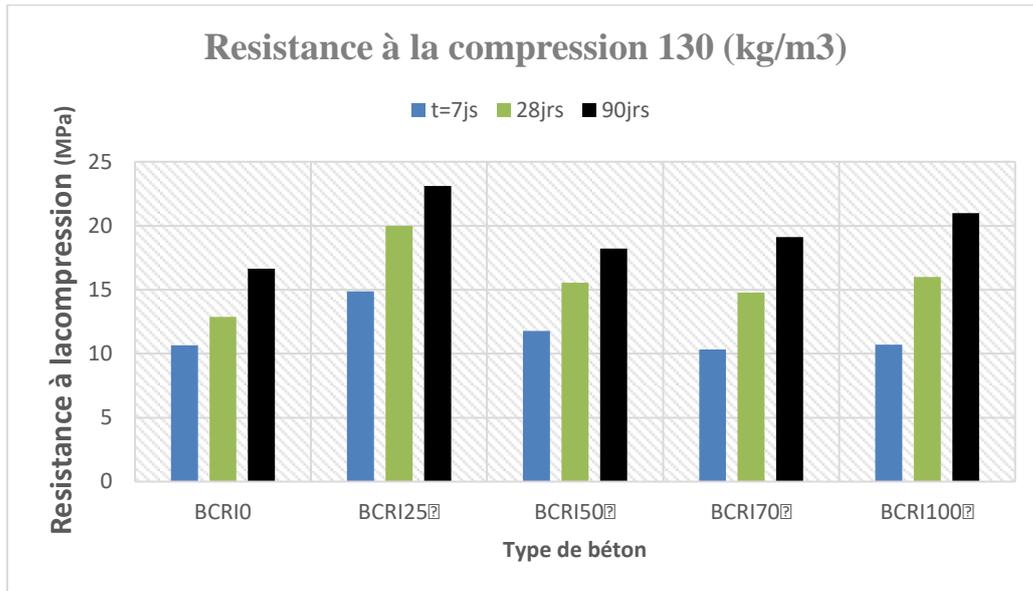


Figure IV.5 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de pourcentage de substitution pour le dosage 130kh/m³ et E/C=0.85.

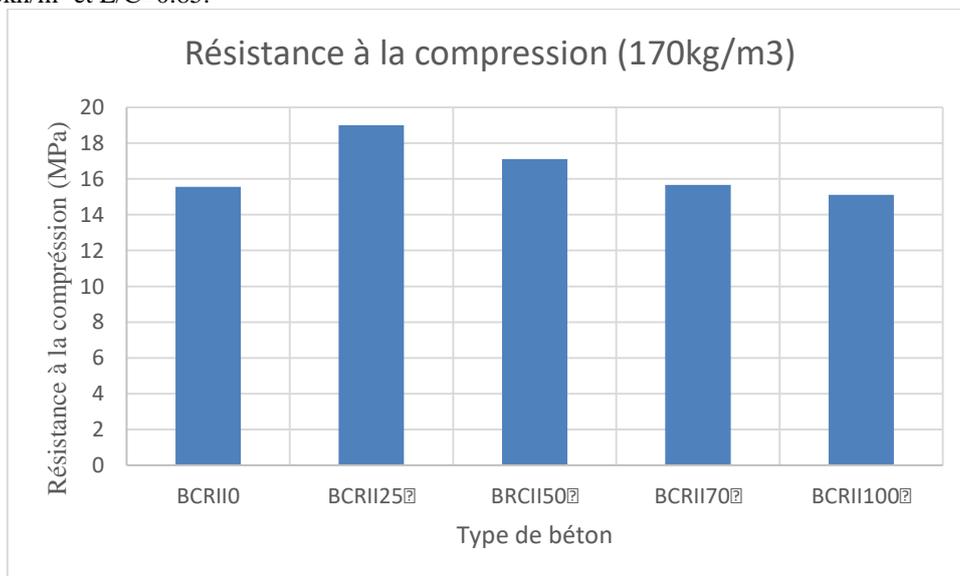


Figure IV.6 : Evolution de la contrainte de compression en fonction de pourcentage de substitution pour le dosage 170kh/m³ et E/C= 0.75.

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 varie entre 40% et 60% qui mené à l'activité pouzzolanique. Comme montre l'étude d'Eva et Pavla [61], 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. Des résultats similaire ont été reportés par Zehang et al[62],

ils ont montré que la résistance à la compression du mélange avec 100% de brique est légèrement supérieure de 1.7 MPa à celle du mélange avec 50% de brique, les auteurs ont jugé que l'augmentation de résistance est dû à les 16% de phase amorphe présente dans les déchets de brique (composition minéralogique des déchets de brique) pourrait réagir avec l'oxyde de calcium et former des produits hydratés comme les silicate hydraté de calcium C-S-H et alumine de calcium C-A-H qui améliore progressivement les propriétés de résistance et durabilité des bétons.

IV.2.2.2-Résistance de traction par fendage :

L'influence de sable de brique recyclée sur le développement de la résistance à la traction par fendage des BCR est représenté sur les **figures IV.7 et IV.8.** pour les BCR I et BCR II respectivement. Par manque de temps, les résultats de la deuxième formulation sont limités à 7 jours (les éprouvettes pour 28 et 90 jours ont été confectionnées et attendent leurs échéances d'essai).

Comme on peut l'observer, l'augmentation de pourcentage de sable recyclée de brique a un effet positif sur la résistance à la traction à partir de 28 jours de cure humide. En effet :

- A court terme (7 jours), une amélioration a été notée de l'ordre 32.56% et 26.74% dans formulations de 25% et 50% de substitution, par contre, une diminution de résistance a été constatée pour 70% et 100% de sable de brique. Cette baisse est de l'ordre 8.14% et 25.46% respectivement.
- A l'âge de 28 jours de murissement on observe une augmentation de résistance à la traction presque linéaire d'environ 56.48%, 44.44%, 42.78% et 61.85% pour 25%, 50%, 70% et 100% de substitution par le sable de brique.
- Après 90 jours de cure humide, la tendance est la même : un gain de la résistance à la traction par flexion de 42.06%, 39.68%, 46.83% et de 66.67% pour les 25%, 50%, 70% et 100% respectivement, comparé au BCR de référence.
- Au regard de la figure 4.8, pour les BCR II (Avec $C=170\text{kg/m}^3$), la résistance à la traction par fendage des BCR chute en fonction de pourcentage de substitution en sable de brique sauf pour le BCR II 25% qui a enregistré une augmentation de 14.29% par rapport au BCR de référence. Par ailleurs, la diminution est de l'ordre 31.43%, 44.91% et 35.14% pour les pourcentages 50%, 70% et 100% respectivement, par rapport au BCR de référence.

La résistance à la traction du béton est généralement fonction de l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment et la résistance des granulats, en revanche l'augmentation de la résistance à 28 jours et 90 jours peut être liée à l'activité pouzzolanique résiduelle de la brique.

Eva et Palva [61] ont conclu que la réaction pouzzolanique des déchets des briques est fonction de la composition chimique, la teneur en phase amorphe et la granulométrie des granulats de brique.

Par ailleurs Oluwarotimi et al [63] ont étudié l'effet de taux de substitution de 10 à 50% de sable naturel par le sable de brique recyclée les résultats de cette étude montrent que les mélanges contenant 10,20% et 30% de sable de brique recyclé couplé avec 10% d'argile calcinée ont une amélioration significative de la résistance à la traction par rapport au témoin, en effet avec 10% de brique recyclée la résistance s'améliorait de 8% pour 28 jours de cure.

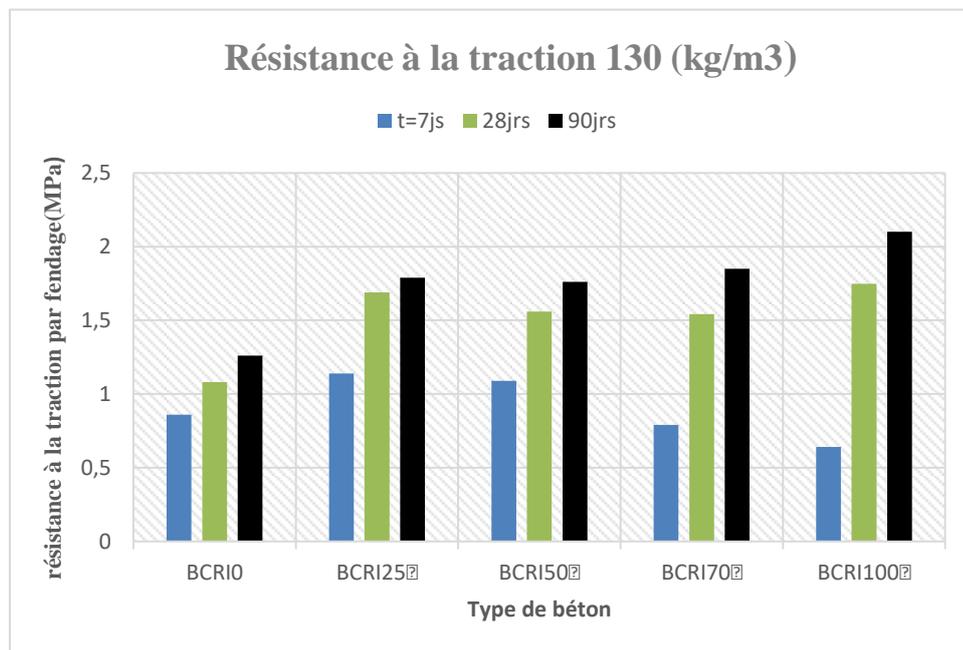


Figure IV.7: Evolution de la contrainte de traction par fendage en fonction de pourcentage de substitution pour dosage 130kg/m^3 et $E/C=0.85$.

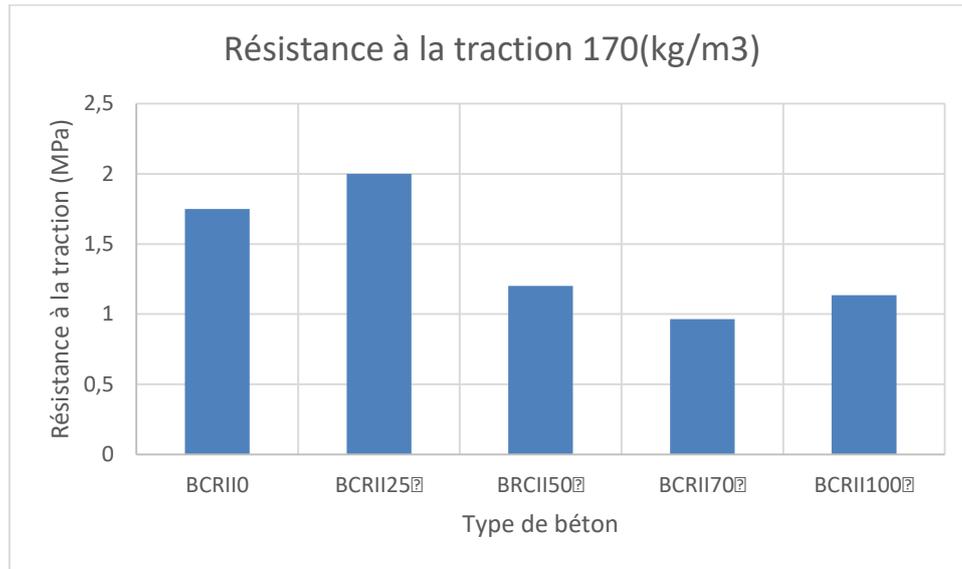


Figure IV.8: Evolution de la contrainte de traction par fendage en fonction de pourcentage de substitution pour dosage 170kg/m3 et E/C=0.75.

IV.3.-Durabilité :

IV.3.1-Permiabilité à l'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 la **figure IV.9**

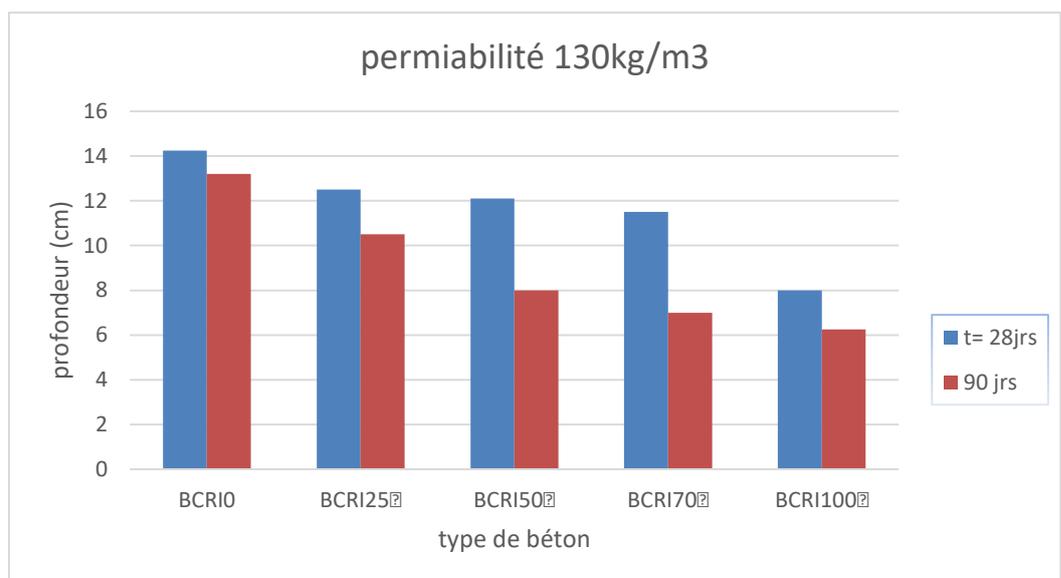


Figure IV.9 : perméabilité à l'eau en fonction de taux de substitution.

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.9**, 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). 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.3.2-Porosité accessible à l'eau :

Les résultats de la porosité accessible à l'eau des BCR formulés en fonction de pourcentage de substitution de sable de brique recyclée à 28 jours et 90 jours, sont donnés dans le **tableau IV.3** et illustrés sur la **figure IV.10**.

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

Chapitre VI : Analyse et Interprétation Des Résultats

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.

Tableau IV.3 Résultats de la porosité accessible à l'eau des BCR étudiés

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

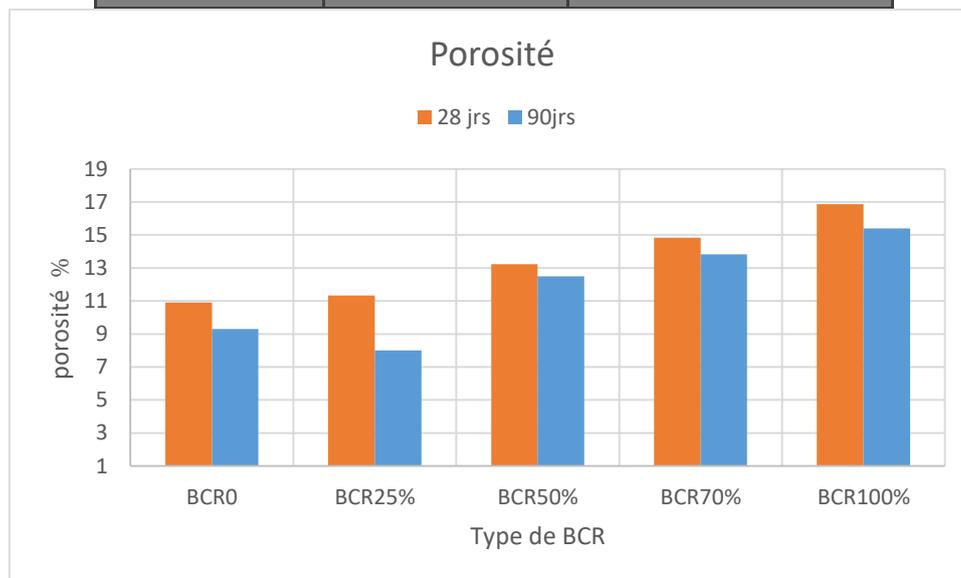


Figure IV.10 : Porosité accessible à l'eau à 28 et 90 jours des BCR étudiés..

IV.4.-Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du remplacement de sable de brique recyclé par le sable naturel dans des mélanges de BCR pour barrage. Les résultats obtenus montrent que : En présence de sable de brique recyclé et avec l'augmentation des taux de substitution avec le même rapport E/C, le temps VEBE reste peu variable et rentre dans la gamme des BCR pour barrage.

- L'incorporation du sable de brique a donné un effet positif sur la résistance en compression et celle de la traction par fendage à moyen et à long terme (28 et 90 jours). Cette observation est plus accentuée pour une teneur de substitution de 25%.
- 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.

Conclusion générale

Notre travail consiste d'étudier les paramètres physiques et mécaniques (masse volumique, analyse granulométrique, compression traction perméabilité sous pression porosité accessible à l'eau) de béton BCR destiné aux barrages avec un nouveau composant non conventionnel, et ce nouveau composant est de changer le sable avec sable de brique recyclée, et le recyclage des déchets de brique est devenu une bonne solution qui peut donner des ressources renouvelables, et c'est l'essence de notre étude Suite aux résultats obtenus, on peut conclure que ces paramètres ont permis de donner quelques résultats satisfaisants permettant de l'amélioration des propriétés mécaniques physiques, Ainsi de ce travail on peut tirer les conclusions suivantes:

- La méthode de formulation selon le cahier de Ghazel s'avère très intéressante pour la recherche de telles formulations.
- La résistance à la compression et la résistance à la traction sont bonnes et peuvent être comparées à la BCR témoin à toutes les doses sauf 25 % dans laquelle la résistance à la compression a atteint son maximum et a dépassé celle de la BCR témoin.
- Le sable de brique affecte sur la perméabilité sous pression et ainsi que la porosité accessible à l'eau on a constaté une déamination de la perméabilité sous pression par contre la porosité accessible à l'eau il a obtenu des résultats élevés à cause de sa forme poreuse.

Enfin, nous pouvons avancer à l'issue de cette modeste étude de contribution, qu'il est possible de valoriser les déchets de brique dans le BCR en tant sable de brique à des proportions

Références bibliographiques

- [1] DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C. (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p
- [2] Gauthier, P., & Marchand, J. (2002). Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association des constructeurs de routes et de grands
- [3] A. B. D. E. M. Locaux, "FORMULATION ET ETUDE D ' UN BETON DE ROUTE."
- [4] Anderson R., (1986) Roller Compacted pavements- Physical Properties, CBI report No. Ra 3:86, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, pp. 18-24.
- [5] Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.
- [6] Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>
- [7] hydrolique barrage
- [8] Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>
- [9] BERGA L., BUIL J.M., JOFRE C., CHONGGANG S. (2003), Roller Compacted Concrete Dams, Université de HANNOVER, A.A. BALKEMA Editions.
- [10] Site web de Ciment de Québec, <http://www.BCR.CC.html>
- [11] B, Abderrahim, B,Fateh. Etude de l'influence des ajouts minéraux sur le comportement physico-mécanique des BCR a base des granulats recyclés :mémoire ;Génie Civil, Matériaux. Bordj Bou Arreridj,algie , UNIVERSITE MOHAMED EL-BACHIR EL IBRAHIMI. 2020.,86p
- [12].NDIAYE, Diawoye, SALL, Aboubakry. Conception, formulation et mise en oeuvre d'un béton compacte au rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées : application au tronçon Diamniadio-Mbour : Université Cheikh AntaDiop de Dakar, 2007,109 p.
- [13] Baron J. et Olivier J. P., (1997), Les Bétons: bases et données pour leur formulation, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Eyrolles Paris, pp. 20-149.
- [14] (Gauthier P& Marchand J, 2004). Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté

- [15] (Gauthier P& all, 2000), Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M., (2000), Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple
- [16] (Belaïd M, 2004) Belaïd M., (2004), Etude des Matériaux du Béton Compacté au Rouleau et du remblai dur, Annales de l'Équipement, Volume XIV, N° 02, Tunisie.
- [17] (Huang. Y. H, 2004). Huang Y. H., (2004), Pavement Analyses and Design, seconde édition, Université de Kentucky USA, pp. 5-8
- [18] B,KAMEL. Effet de la haute température sur le comportement mécanique d'un béton compacté au rouleau (BCR) :mémoire : Génie Civil, Matériaux. M'SILA,algerie , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF. 25 Juin 2018,8p
- [19] Z,Boudjema,K,Omar. Le béton compacté au rouleau (BCR) à base de filler calcaire et ciment : Mémoire : GENIE CIVIL, Matériaux. BOUIRA,algerie, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULADJE.2019.8p
- [20] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p
- [21] J. Marchand, R. G., E. Ouellet and S. Lepage (1997). " Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete-A Review." ACI Special Publication 171.
- [22] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- [23] Pouliot, N., 2001. Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. Bulletin de LPC, Réf. 4370, pp.23–36
- [24] GAGNE, Richard: Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR. CRIB 2004.
- [25] D, Ndiaye.A,Sall. Conception, formulation et mise en oeuvre d'un béton compacte au rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées : Application Au Tronçon Diamniadio-Mbour. Thés ; Génie Civil. Université Cheikh Anta Diop De Dakar : Ecole supérieure polytechnique, 2007,97p

- [26] GAGNÉ, R. (2000). "High-performance roller-compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability." International symposium on engineering materials for sustainable development, Okayama, Japon: 74-88
- [27] S. (1996). Étude d'un nouveau procédé de production de béton compacté au rouleau par addition de coulis dans un mélange granulaire. Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke
- [28] Neville A. M., (2000), Propriétés des bétons, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Sherbrooke, Laval, Eyrolles, France, pp. 255-401
- [29] N, MERIEM. CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE VULNÉRABILITÉ THERMIQUE PAR UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'UN BARRAGE-POIDS EN BCR :mémoire, Aménagement et Ouvrages Hydrauliques.Blida,algerie , ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE, ARBAOUI Abdellah. 2017 ,94p
- [30] Ville de Montréal. (2010). Devis technique normalisé 3VM-30 : Béton compacté au rouleau (BCR). Montréal, Québec
- [31]A. A. U. T. Diamniadio-mbour, "Ge 485 ," 2007.
- [32] S. BASTIEN. VALORISATION DES GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ ET DES GRANULATS DE VERRE RECYCLÉ DANS LES PAVAGES INDUSTRIELS EN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU : Mémoire de maîtrise, génie civil, Sherbrooke (Québec) Canada.UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE , Avril 2016,17p
- [33] ZENAGUI Safia. L'utilisation du BCR pour la conception des petits barrages. Mémoire de projet de fin d'études master : Hydraulique, Tlemcen : Université Abou Bekr BELKAID, 2016,152 p
- [34] Service d'Expertise en Matériaux, Inc: Comparaison de la perméabilité à l'eau du béton compacté au rouleau et d'un mélange de béton conventionnel, 2005
- [35]-DUTRON P. (1985) ; Introduction, in Le béton et l'eau, Saint-Rémy-lès-Chevreuse (France): Conseil International de la langue française. p. 1-211.
- [36] P. Rheologiques, E. T. Mécaniques, D. U. Béton, C. Au, J. Paul, and O. Mba, "Université de sherbrooke," 1997.
- [37] A, Faycel. CONCEPTION D'UN BÉTON DESTINÉ AUX OUVRAGES HYDROTECHNIQUES : MEMOIRE :Aménagement des Ouvrages Hydrauliques. Blida, Algérie, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE–ARBAOUI Abdellah. Avril-2015.63p

[48] K. Beck, M. A.-M., O. Rozenbaum (2003). « Pierres des Monuments Historiques : Caractérisations et mécanismes d'altération du tuffeau. » AFGC 26(27): 1-16

[39] B,Abdelatif . Étude du comportement d'un béton compacté au rouleau armé de fibres : THESE : Génie Civil ,Matériaux . M'SILA,algerie, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF. 24/07/2019. 63p

II.8 Références bibliographiques

[40] **Devenny A.** et **Khalaf F.M.**, “ The Use of Crushed Brick as Coarse Aggregate in Concrete ”, Masonry International, Vol. 12, N°. 3, 1999, p. 81 – 84.

[41] B,boucif B,o,soufyane . Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température :these : Génie Civil. Ain-Temouchent, algerie : Universitaire Belhadj Bouchaib, 2018.87p

[42] B.Moufida. Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci : Mémoire : Génie Civil. Skikda, Algérie : L'Université 20 Aout 1955 Skikda, 11 Juin 2015.117p

[43]Composition des briques – Fonction des ingrédients (<https://civiltoday.com/civilengineering-materials/brick/132-brick-composition-ingredients-with-functions>)

[44] R, FAYZA, M,SAMIRA. Caractérisation physiques et de durabilité Des ciments composés à base de brique : Mémoire : Génie Civil . Guelma, Algérie : l'Université 08 mai 1945 , JUIN 2018.64p

[45] Fédération Belge de la brique. www.brique.be.

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/1789> visite le cite 17.06.2018

Mémoire : Génie Civil . Guelma, Algérie : l'Université 08 mai 1945 , JUIN 2018.64p

[46] Anonyme, “Terres cuites et Maçonneries Breve historique Quelques repères,” pp. 1-33.Chaleur massique

[47] B. Definition et al., “Manuel maçonnerie de terre cuite 01/05/2005,” 2005.

[48] D. L. E. Jury, “Remerciements,” 2019.

[49] Debieb F. and Kenai S., "The use of coarse and fine crushed brick as aggregate in concrete", *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, N° 5, pp.886-93.

[50]. Bektas F., Wang K., Ceylan H., "Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability", *Construction and Building Materials*, 2009, Vol. 23, pp.1909-1914.

[51] B ,Hicham : Influence des granulats de brique réfractaire (gros et fine granulats) sur le comportement à haute température des bétons :mémoire :genie civil : Biskra, Algérie : Université Mohamed khider.2020.87p.

[52] Khatib J.M., "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and Concrete Research*, 2005, Vol. 35, N° 4, pp. 763-9.

[53] Desmyter J., Van Dessel J., Blockmans S., "The use of recycled concrete and masonry aggregates in concrete: Improving the quality and purity of aggregates", *Proceedings of the international conference. Dundee; 1999. pp. 139-49.*

[54] Kibriya T. and Speare P.R.S., "The use of crushed brick coarse aggregate in concrete", *Proceedings of the international conference, Dundee; 1996, pp. 495-503.*

[55] Akhtaruzzamana A. and Hasnat A., "Properties of concrete using crushed brick as aggregate," *Concrete International*, 1983, Vol. 2, pp. 58-63.

[56] L , Azzeddine, Z, Leila, B,Zied : L'influence de la substitution des granulats naturels par les déchets de brique sur le comportement mécanique du béton :these : génie civil et d'hydraulique : M'sila, B.P. 166, Ichbilia, M'sila 28000, Algérie. 09-12 Mai, 2012

[57] Litvan G.G. and Sereda P.J., "Particulate admixture for enhanced freeze-thaw resistance of concrete", *Cement and Concrete Research*, 1977, Vol. 8, N° 1, pp. 53-60.

[58]. Hansen I.C., "Recycling of demolished concrete and masonry. RILEM Report of Technical Committee 37-DRC (demolition and recycling of concrete)", *RILEM Report 6. London, UK: E&FN Spon; 1992*

[59]. Nigri. G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique. Thèse de doctorat. Université 08 Mai 45. Guelma.Algérie. 2018.

[60].S.Kenai et F.Debieb. : caractérisation de la durabilité des béton recyclés à base de gros fins granulats de briques et de béton concassés génie civil : université saad dahleb

[61]. N.Eva et R.Pavla . pozzolanic proppetier of brick powders ans their effec on the CAS v. v. i. kalovopiska 147 , 612 , 64 Bmo, Czech Republic

[62] J.Zhang et all . performance evaluation of cement stablized recycled mixture with recycled concreteaggregate and cruched brick : National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, China

[63].O.Oluwarotimi et O.Joshua . workability, stength, and microstructure of high strength sustainable concrete incorporating recycled clay brick aggregate and calcined clay : department of civil engineering covenant university, PBM, 1023, Ota, Nigeria