

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

Université SAAD DAHLAB -Blida 1-



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

**Valorisation des déchets de brique dans les bétons compactés au
rouleau « BCR » pour barrage**

Présenté Par :

Melzi Khadidja

Boubekeur Fouzia Amira

Devant le jury :

**Professeur HADJ-SADOK Ahmed
Docteur Si-Ahmed Mohammed**

**ENSH
Université Blida 1**

**Promoteur
Co-promoteur**

Blida 2021.

Remerciement

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

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à Monsieur le docteur ***SI-AHMED Mohammed*** de l'université de Blida 1 de nous avoir fait part de son savoir et de nous avoir donné l'opportunité de réaliser cette recherche.

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

On remercie tous les ingénieurs et techniciens du laboratoire de l'ENSH et ceux du laboratoire géo matériaux et génie civil de l'Université de Blida1 pour avoir contribué à concrétiser ce travail.

On voudrait aussi remercier vivement Monsieur le docteur ***CHAKALI Youcef*** pour ses conseils et sa bienveillance.

On souhaite enfin remercier toute personne ayant contribué à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs Zoubida, Bouchra et Aziza pour leurs encouragements permanents, et leurs soutiens moral,

A mes chers frères, Abdel Malek et Abdel Hamid pour leurs appuis et leurs encouragements,

A toute ma famille et mon binôme aussi pour leurs soutiens tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Khadidja

Dédicaces

À la mémoire de mon cher grand-père.
À mes parents à qui je dois tout.
À mes petites sœurs *Neila* et *Nouhed*.
À mon binôme.

Amira

المخلص

في الوقت الحاضر، تولد صناعة البناء كمية هائلة من النفايات، خاصة أثناء تفكيك وهدم المباني. يمثل الطوب، موضوع دراستنا، جزءًا كبيرًا من هذه النفايات الخاملة، لذا فإن إعادة تدويرها يوفر لنا مزايا بيئية وخاصة اقتصادية. يتم بالفعل إعادة تدوير الطوب في شكل مجاميع مستخدمة بشكل خاص في سدود الطرق. ولكن هذا يشكل ما يسمى بعملية "إعادة التدوير إلى أسفل". الدراسة التي أجريناها عبارة عن تقييم ذي قيمة مضافة أعلى "لإعادة التدوير"

الهدف من بحثنا هو تحليل الأداء المعياري لأسطوانة السدود الخرسانية المضغوطة التي تحتوي جزئيًا على نفايات الطوب. ينتج عن هذا استخدام حشوات الطوب كبديل لحشوات الحجر الجيري. تأتي آلات حشو الطوب من مصنع إنتاج محلي. إنها نتيجة الطحن الذي تم على مستوى أعضاء هيئة التدريس لدينا.

أظهرت النتائج الملاحظة أنه في حالة جديدة، تقل قابلية التشغيل بشكل طفيف بزيادة معدلات استبدال الطوب. تزيد قابلية التشغيل بنسبة 5.25% للإحلال بنسبة 100%. مقارنة بالخرسانة المضغوطة مع الأسطوانة المرجعية.

في الحالة المتصلبة، تتأثر مقاومة الضغط، لاستبدال ما يصل إلى 60% من الطوب، بشكل طفيف فقط. من ناحية أخرى، فإن الخرسانة المدمجة مع بكرات مع حشو طوب 100% لديها مقاومة منخفضة، بالإضافة إلى ذلك، تقل الموصلية الحرارية للخرسانة المدمجة مع البكرات بشكل كبير مع زيادة استبدال الطوب مما يجعلها مادة عازلة أكثر.

الكلمات الرئيسية:

نفايات الطوب، الخرسانة المدمجة بواسطة الأسطوانة، إعادة التدوير، قوة الانضغاط، التوصيل الحراري.

RESUME

De nos jours l'industrie de la construction génère une quantité énorme de déchets, plus particulièrement lors de la déconstruction et la démolition de bâtiments. La brique, objet de notre étude, représente une part importante de ces déchets inertes donc le fait de les recycler nous offre des avantages écologiques et notamment économiques. Le recyclage des briques est déjà réalisé sous forme de granulats utilisés notamment dans les remblais routiers. Mais cela constitue ce que l'on appelle une opération de « downcycling ». L'étude qu'on a menée est une valorisation à plus forte valeur ajoutée «upcycling ».

L'objectif de notre recherche est d'analyser les performances paramétriques des BCR de barrage contenant partiellement des déchets de brique. Ceci se traduit par l'utilisation des fillers de brique comme substitution des fillers calcaires. Les fillers de brique proviennent d'une usine de production locale. Elles résultent d'un broyage réalisé au niveau de notre faculté.

Les résultats observés ont montré qu'à l'état frais, la maniabilité diminue légèrement en augmentant les taux de substitutions de la brique. Le temps VEBE augmente de 5.25% pour 100% de substitution, par rapport au BCR de référence.

A l'état durci, la résistance à la compression, pour une substitution de jusqu'à 60% de brique, n'est que peu influencé. Par contre les BCR avec 100% de filler de brique ont de faibles résistances. Par ailleurs La conductivité thermique des BCR diminue sensiblement avec l'augmentation de substitution de la brique le rendant un matériau plus isolant.

Mots clés :

Déchets de brique, BCR, recyclage, résistance a la compression, conductivité thermique.

ABSTRACT

Nowadays the construction industry generates a huge amount of waste, especially during the deconstruction and demolition of buildings. The brick, object of our study, represents an important part of these inert wastes, so the fact of recycling them offers ecological and economic advantages. The recycling of bricks is already realized in the form of aggregates used in particular in road embankments. But this is what we call a "downcycling" operation. The study we conducted is a higher value added "upcycling".

The objective of our research is to analyze the parametric performance of dam BCR containing partially brick waste. This translates into the use of brick fillers as a substitute for limestone fillers. The brick fillers come from a local production plant. They result from a crushing carried out at our faculty.

The observed results showed that in the fresh state, the workability slightly decreases by increasing the substitution rates of the brick. The VEBE time increases by 5.25% for 100% substitution, compared to the reference BCR.

In the hardened state, the compressive strength, for a substitution of up to 60% of brick, is only slightly influenced. On the other hand, BCR with 100% brick filler have low strengths. In addition The thermal conductivity of BCR decreases significantly with the increase of brick substitution making it a more insulating material.

Key words:

Brick waste, BCR, recycling, compressive strength, thermal conductivity.

Liste d'abréviations et notations

BCR : béton compacté au rouleau
RCD : rolled compacted concrete
AEA : Agent entraîneur d'air
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
CRIB : Centre de recherche interuniversitaire sur le béton
C3S : Silicate tricalcique (alite)
C2S : Silicate bicalcique (belite)
C4AF : Aluminate-ferrite tetracalcique
CaCO₃ : Carbonate de calcium
CaSO₄ : Gypse C3A : Aluminate tricalcique
CSH : Silicate de calcium hydraté
Ca(OH)₂ : Portlandite
CEM II : Ciment portland avec ajout
SP : Super plastifiant
M_f : 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
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)
R_{cmoy} : la résistance q la compression moyenne
C_{moy} : la conductivité thermique moyenne
P_w : porosité accessible a l'eau
C_{ai} : absorption d'eau par unité de surface
S : coefficient d'absorption
λ : la conductivité thermique

Liste des Figures

Figure I. 1:Développement de la résistance à la compression de bétons contenant des ajouts	23
Figure I. 2:Paramètres optimum d'un mortier pour BCR.	25
Figure I. 3: Fuseaux granulométriques de J. Marchand pour un BCR	26
Figure I. 4:Exemple de l'évolution de la maniabilité dans le temps d'un mélange de BCR.	28
Figure I. 5:la relation entre la teneur en eau et la résistance à la compression du BCR	30
Figure I. 6 :Eau absorbée par unité de surface des mélanges étudiés	31
Figure I. 7:Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mélanges étudié ..	31
Figure I. 8:la Relation entre la perméabilité et la quantité des matériaux cimentaires ..	32
Figure II. 1:représente les débris suite à la deuxième guerre mondiale	35
Figure II. 2:Structure en feuillet d'un minérale.....	37
Figure II. 3:Extraction de l'argile	Error! Bookmark not defined.
Figure II. 4:Transformation minéralogique des argiles lors de la cuisson.	40
Figure II. 5:Diagramme de Keil avec ajout du matériau.....	42
Figure II. 6:Effet des agrégats de brique sur l'affaissement.....	43
Figure II. 7:Densité fraîche du béton	44
Figure II. 8:Effet de la teneur en granulats recyclés sur la résistance thermique des bétons.....	47
Figure III. 1: Sable fin et sable lavé.....	50
Figure III. 2:l'essai d'analyse granulométrie.....	51
Figure III. 3:la courbe granulométrique du sable.	51
Figure III. 4: Courbe granulométrique du sable 2.	52
Figure III. 5: Courbe granulométrique du sable optimal.....	53
Figure III. 6: Essai de la masse volumique apparente.....	53
Figure III. 7: Essai de la masse volumique absolue.....	54
Figure III. 8: Essai d'équivalent de sable.	56
Figure III. 9: Gravier.	57
Figure III. 10: Granulométrie des graviers.	58
Figure III. 11:Le concasseur.....	60
Figure III. 12: Analyse granulométrique par sédimentation de la brique.....	61
Figure III. 13: Courbe granulométrique par sédimentation de la brique.....	62
Figure III. 14: Essai de la masse volumique absolue de la brique.....	63
Figure III. 15: Filler calcaire.	65
Figure III. 16:Granulométrie du filler calcaire.	66
Figure III. 17:Fuseau de RAZEL.....	67
Figure III. 18: Courbes représentants la granulométrie des mélanges choisis.....	67
Figure III. 19: détails de l'essai.	68
Figure III. 20:Dispositif d'essai.....	68
Figure III. 21: L'échantillon avant l'essai et après l'essai.	69
Figure III. 22: Dimensions du moule.....	70
Figure III. 23: mesure de la hauteur H_{vmoy}	70
Figure III. 24: L'essai de VEBE.....	72
Figure III. 25: Le dispositif de l'essai.....	73
Figure III. 26: Marteau vibrant et Les tige de compactage.	75
Figure III. 27: Schéma (a) et vue d'ensemble du dispositif d'essai de l'absorption D'eau par capillarité.....	76
Figure III. 28: Appareils CT-mètre utilisé.....	78
Figure III. 29: Le programme expérimental réalisé.	79

Figure IV. 1: Temps de VEBE en fonction de taux de substitution.....	82
Figure IV. 2: La masse volumique en fonction de taux de substitution.....	83
Figure IV. 3: Résistance à la compression en fonction de taux de substitution.....	84
Figure IV. 4: Conductivité thermique des mélanges réalisés à 14 et 28 jours.....	85
Figure IV. 5: L'absorption capillaire du BCR de Reference.....	86
Figure IV. 6: La Sportivité des formulations.....	87
Figure IV. 7: La Porosité accessible à des formulations réalisées.....	88

List des tableaux

Tableau I. 1: Propriétés de durcissement du béton (résistance à la compression, f_c , et à la traction, f_{ct} , et module d'élasticité, E_c).....	46
Tableau III. 1: La masse volumique apparente des sables.....	54
Tableau III. 2: La masse volumique absolue des sables.....	55
Tableau III. 3: Équivalent de sable.....	56
Tableau III. 4: l'absorption des deux sables.....	57
Tableau III. 5: la propreté des graviers.....	58
Tableau III. 6: la masse volumique apparente des graviers.....	59
Tableau III. 7: la masse volumique absolue des graviers.....	59
Tableau III. 8: L'absorption des graviers.....	59
Tableau III. 9: La masse volumique apparente de la brique.....	62
Tableau III. 10: Masse volumique absolue.....	63
Tableau III. 11: l'absorption de brique.....	64
Tableau III. 12: la classe vraie du ciment.....	64
Tableau III. 13: Masse volumique apparente du calcaire.....	65
Tableau III. 14: Masse volumique absolue.....	65
Tableau III. 15: les résultats de la compacité.....	70
Tableau III. 16: un représentatif des quantités de matériaux de chaque mélange.....	71
Tableau IV. 1: le Temps de VEBE des mélanges réalisés.....	81
Tableau IV. 2: La masse volumique des mélanges réalisés.....	82
Tableau IV. 3: Résistance à la compression des mélanges réalisés.....	84
Tableau IV. 4: La conductivité thermique des mélanges réalisés A 7 et 28 jours.....	85
Tableau IV. 5: La Porosité accessible à des formulations réalisées.....	87

Table des matières

Résumé	4
Liste d'abréviations et notations	7
Liste des figures	8
Liste des tableaux	9
Introduction générale.....	15
Chapitre I : Béton compacte au rouleau BCR	
I.1 Introduction	18
I.2 Présentation générale du BCR	18
I.2.1 Historique	18
I.2.2 Les Avantages du BCR	19
I.2.3 Les inconvénients	20
I.3 constituants du béton compacté au rouleau	21
I.3.1 ciment	21
I.3.2 Granulats	21
I.3.3 l'eau	22
I.3.4 Adjuvant	22
I.3.5 Filler	23
I.4 Les méthodes de formulations	25
I.4.1 Méthode de formulation empirique.....	25
I.4.2 Méthode de formulation semi-empirique	27
I.4.3 Méthode théorique	28
I.5 Les propriétés du BCR	28
I.5.1 A l'état frais.....	28
I.5.1.1 L'ouvrabilité.....	28
I.5.1.2 La masse volumique	29
I.5.2 A l'état durcis	29
I.5.2.1 La résistance à la compression	29
I.5.2.2 Absorption capillaire	30
I.5.2.3 Perméabilité	32
I.6 Conclusion	32

Chapitre II : Valorisation de la brique dans le Béton

II.1	Introduction	35
II.2	la brique	36
II.2.1	Composition et structure interne.....	36
II.2.2	Processus De Fabrication	38
II.2.2.1	Extraction de matière première	38
II.2.2.2	Préparation de l'argile	39
II.2.2.3	Façonnage	39
II.2.2.4	Séchage	39
II.2.2.5	Cuisson	39
II.2.2.6	Emballage	42
II.2.3	propriétés physiques et chimiques	42
II.2.3.1	Porosité.....	42
II.2.3	propriétés physiques et chimiques	42
II.2.3.2	Chaleur Massique	43
II.2.3.3	L'absorption	43
II.3	L'utilisation des déchets de brique dans le béton et leurs comportements.....	43
II.3.1	Influence sur l'ouvrabilité.....	43
II.3.2	influence sur la porosité et l'absorption d'eau et densité	44
II.3.3	l'influence sur les propriétés mécaniques	45
II.3.3.1	Résistance à la compression et à la traction	45
II.3.4	l'influence sur les propriétés thermique	46
II.4	conclusion	47
Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et La formulation du BCR		
III.1	Introduction	50
III.2	Matériaux utilisés	50
III.2.1	les caractéristiques des sables	50
III.2.1.1	Analyse granulométrique par tamisage	50
III.2.1.2	Module de finesse	52
III.2.1.3	Masse volumique apparente	53
III.2.1.4	Masse volumique absolue	54
III.2.1.5	Equivalent de sable avec le piston et visuelle	55
III.2.1.6	L'absorption de sable	56

III.2.2	Les caractéristiques des graviers	57
III.2.2.1	Propreté des graviers	58
III.2.2.2	Analyse granulométrique par tamisage	58
III.2.2.3	Masse volumique apparente	59
III.2.2.4	Masse volumique absolue	59
III.2.2.5	L'absorption des graviers	59
III.2.3	Filler de brique	59
III.2.3.1	Concassage de la brique	60
III.2.3.2	Broyage de la brique	60
III.2.3.3	Analyse granulométrique par sédimentation	60
III.2.3.4	Masse volumique apparente	62
III.2.3.5	Masse volumique absolue	63
III.2.3.6	Absorption d'eau de la brique	64
III.2.4	Le Ciment	64
III.2.4.1	Classe vraie du ciment	64
III.2.4.1	La masse volumique absolue	64
III.2.5	Filler de calcaire	64
III.2.5.1	La Masse volumique apparente	65
III.2.5.2	La Masse volumique absolue	65
III.3	Etude de formulation du BCR	66
III.3.1	Optimisation du Mélange granulaire du BCR :	66
III.3.2	Mesure de la compacité	68
III.3.3	Type et dosage en ciment	70
III.3.4	Formulations réalisées	70
III.3.5	Caractérisation du BCR a l'état frais	71
III.3.5.1	L'essai de Vebe	71
III.3.5.2	L'essai de la masse volumique	74
III.3.5.3	La mise en place des éprouvettes	75
III.3.6	Caractérisation du BCR à l'état durci	76
III.3.6.1	Résistance à la compression	76
III.3.6.2	absorption capillaire	76
III.3.6.3	Porosité accessible à l'eau	77
III.3.6.4	propriétés thermiques	78

III.4 Programme expérimentale	79
-------------------------------------	----

Chapitre IV : analyse et interprétation des résultats

IV.1 Introduction.....	81
IV.2 Les Résultats	81
IV.2.1 A l'état frais	81
IV.2.1.1 Le temps de VEBE	81
IV.2.1.2 La masse volumique	82
IV.2.2 A l'état durcis	83
IV.2.2.1 Résistance à la compression	83
IV.2.2.2 La conductivité thermique	84
IV.2.2.3 La porosité a l'eau	86
IV.2.2.4 Absorption capillaire	86
IV.3 Conclusion	88

Conclusion Générale

Les Références

Introduction Générale

Introduction générale

La production et l'accumulation excessive de déchets de constructions et de démolition, épuisement de ressources naturelles, l'aspect énergivore polluant impactant grandement l'environnement et le coût de stockage. Tous ces fléaux font l'objet d'une préoccupation du premier degré pour notre société, vu qu'ils menacent fatalement notre quotidien. En Europe, 850 millions de tonnes de déchets sont produits par an [1]. Dans cette perspective l'industrie du béton offre dans sa démarche de développement des solutions dans le but d'y remédier à ces problèmes conséquents. Effectivement depuis déjà plusieurs années des producteurs européens et canadiens ont relevé le défi en réalisant des progrès remarquables pour minimiser l'empreinte écologique et limiter l'appauvrissement en ressources naturelles éventuellement non-renouvelables en donnant une seconde vie à ces déchets. Au Québec, les quantités de matières recyclées (béton, brique, etc.) augmentent chaque année. Entre 2004 et 2008, une augmentation de près de 1 million de tonnes est notée, ce qui représente une augmentation approximative de 250 000 tonnes/année [2].

La brique est parmi les déchets de construction les plus imposants. Les briques sont stockées sous forme de déchets inertes. Elles représentent seulement une partie des déchets récupérés par les centres de tri. Elles peuvent être réutilisées directement dans une nouvelle construction si elles sont conformes aux prescriptions techniques spécifiques. Mais les briques qui sont en mauvais état sont généralement stockées ou utilisées sous forme de sables ou granulats pour des remblais dans le domaine des infrastructures routières. Cette réutilisation comme matériau de comblement est une valorisation à faible valeur ajoutée.

Dans ce projet l'objectif principal est d'étaler la possibilité d'utiliser des déchets de briques dans la composition des bétons compactés au rouleau « BCR » utilisé dans la construction des barrages. L'approche expérimentale consiste à établir une étude paramétrique sur l'effet de l'incorporation des fillers de brique comme substitution des fillers calcaire sur les propriétés mécaniques, physiques et thermiques.

Afin de bien comprendre la problématique de cette étude, nous avons commencé dans le premier chapitre, par une étude bibliographique décrivant l'état de l'art de ce matériau. Cette partie comporte un historique sur le BCR, ses avantages et inconvénients, ses constituants, méthodes de formulations ainsi que ses propriétés à l'état frais et durci.

Le second chapitre concerne exclusivement la brique sa composition, sa structure interne, son processus de fabrication, ses propriétés physiques et chimiques et pour finir l'influence de l'utilisation des déchets de brique sur les propriétés du béton basé sur des recherches antérieures.

Le troisième chapitre représente les matériaux utilisés et regroupe la totalité des essais effectués ainsi que les formulations de BCR réalisés.

Quant au dernier chapitre il exhibe les résultats de l'étude expérimentale et

tente de montrer l'effet de l'incorporation des fillers de brique sur les différentes propriétés du BCR étudiées.

Enfin le travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Béton Compacte au Rouleau BCR

I.1 Introduction

On intitule Béton compacté au rouleau BCR un béton d'une fermeté considérable non armé caractérisé par son affaissement nul. Le BCR se distingue fortement du béton classique notamment son domaine d'utilisation sa formulation et sa mise en place mais contient tout de même les mêmes matériaux lors de sa confection avec des proportions différentes.

Le caractère principal du BCR est son faible volume de pâte liante ce qui signifie une faible contenance en eau et de matériaux cimentaires.

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/m³ 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.

Le béton compacté au rouleau est confectionné au sein d'une usine mobile installée directement sur le chantier ce qui diminue grandement les émissions atmosphériques polluantes causées par le transport des camions de l'usine à la paveuse. En addition la courte distance entre l'usine et la paveuse permet d'assurer une qualité optimale du mélange lors de la mise en place.

Ce béton en question est compacté en utilisant des rouleaux compacteurs parce que contrairement à un béton conventionnel, où la quantité de pâte est suffisante pour l'obtention d'un compactage correct avec une simple vibration, le BCR doit recevoir un apport d'énergie substantiel de l'extérieur pour se mettre en place cette action permet de minimiser les vides au maximum [1].

I.2 Présentation générale du BCR

I.2.1 Historique

- Route

L'emploi du ciment en édification routière date de 1935 avec le sol ciment ; technique similaire au BCR, le sol-ciment constituait un mélange granulaire auquel on ajoutait une très faible quantité de ciment. En 1942, l'US Army Corps of Engineers procéda à la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord.

Après 1980, au moins dix autres pays France, USA, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon ont construit chacun plus de 10 000 m² de revêtement en BCR [2]. Le premier projet crucial a eu lieu en 1995 avec la construction d'un revêtement de 25000m². Il s'agissait d'un BCR à haute performance de 350 mm d'épaisseur avec une résistance en compression à 7 jours de 55 MPA et une résistance en flexion de 5 MPA. En Afrique, le Béton Compacté au Rouleau reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est évoluée que pour la construction des barrages et son utilisation dans le domaine des routes n'est pas encore étendue [3].

- Barrage

Le B.C.R. Béton compacté au rouleau ou en anglais R.C.C. Rolled Compacted Concrete et sa variante japonaise R.C.D. Rolled Concrete in Dam sont issus d'évolutions entamées dans les débuts des années 1960. La R.C.D. utilise un matériau similaire à des bétons ordinaire et une réalisation de barrages poids à plots indépendants munis de joints de dilatation tandis que la technique américaine R.C.C. emploie un béton maigre et une construction de barrage sans joint, C'est cette technique qui s'est le plus amplement répandue, en particulier en Europe, en Australie et en Afrique du Sud .

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

PATON se référait à son expérience d'ingénieur routier ayant souvent mis en œuvre, pour réaliser des chaussées, un béton pauvre et sec fortement compacté au rouleau vibrant et acquérant une densité élevée. Fin 1988, une trentaine de barrages de plus de 20 m de hauteur étaient construits en B.C.R. à travers le monde [4].

I.2.2 Les Avantages du BCR

Les avantages du BCR sont cités dans les points suivants

- Rapidité d'exécution

La rapidité de son application et la grande vitesse de remise en service sont parmi les principaux avantages du béton compacté au rouleau. Grâce à sa maniabilité, et la facilité de sa

mise en place. Une voie carrossable construite en BCR peut être ouverte à la circulation 48 à 72 heures suite à son application [5].

- Durabilité

Les revêtements en BCR sont robustes et durables. Ils résistent à l'action de très lourdes charges même dans des conditions défavorables. C'est pourquoi ils servent à plusieurs types de revêtements, en raison de son étanchéité, le béton compacté au rouleau résiste aux carburants, aux huiles, aux solvants et à d'autres fluides. Il résiste également aux chaleurs extrêmes de l'été et au froid de l'hiver. Un revêtement en BCR correctement conçu et appliqué aura une longévité incomparable à tout autre produit pour ce type d'application et donnera plusieurs décennies de service [5].

- Faible Entretien

Le béton compacté au rouleau requiert peu de réparations au cours de son service. Il ne demande aucun revêtement d'étanchéité et aucun surfacage. Mis à part un nettoyage occasionnel donc les exigences d'entretien du BCR sont minimales [5].

- Economique

Le coût de mise en place du béton compacté au rouleau est peu élevé. Comme sa longévité est excellente et qu'il requiert peu d'entretien, le béton compacté au rouleau présente un excellent rapport qualité-prix [5].

- Écologique

Les revêtements en BCR sont respectueux de l'environnement. En effet, on peut y incorporer des ajouts cimentaires autres que le ciment Portland comme des cendres volantes moins énergivores. Comparé à l'asphalte, sa couleur plus claire réfléchit mieux la lumière ce qui procure un environnement plus lumineux qui requiert éventuellement moins d'éclairage. Cette couleur plus claire minimise également l'absorption de chaleur et les îlots de chaleur urbains [5].

I.2.3 Les inconvénients

Les inconvénients du BCR sont cités dans les points suivants :

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

L'uni d'une chaussée est démontré par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni d'un revêtement en BCR demeure un obstacle qui restreint relativement l'emploi du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est remarquablement influencé par les procédures de construction, les variations du degré de compactage, l'uniformité de la mise en place du finisseur et les opérations de compactage [1-6]

I.3 constituants du béton compacté au rouleau

I.3.1 ciment

Le BCR peut être fabriqué avec n'importe quel type de ciment Portland disponible sur le marché. En revanche, pour les barrages, un ciment à faible chaleur d'hydratation est indispensable pour limiter les contraintes thermiques dans le béton [7]. Ces ciments ont une prise plus lente et un durcissement plus progressif et améliorent les propriétés mécaniques du BCR. Il convient de souligner qu'une teneur en ciment trop élevée favorisera les fissures, augmentera les coûts de production et n'améliorera pas nécessairement les performances[8].

Ployaert l'a confirmé et a autorisé l'ajout de cendres volantes pour améliorer la maniabilité et réduire le risque de fissuration, mais cet ajout ne doit pas dépasser 5 % de la masse sèche du granulats [1].

Plusieurs études menées par l'US Corps of Engineers et l'US Office of Recovery ont montré que bien que très peu de ciment soit utilisé, très peu de chaux est libérée lors de l'hydratation. Il suffit de réagir avec de grandes quantités de cendres volcaniques. Les résultats montrent que même après quelques années, il y a encore une trace d'activité pouzzolanique dans le béton. Par conséquent, ces cendres volcaniques peuvent non seulement occuper l'espace disponible, mais également contribuer à améliorer la résistance à long terme [9].

I.3.2 Granulats

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. Pour éviter les problèmes de ségrégation, il est recommandé que l'épaisseur de la couche de béton frais soit au moins trois fois supérieure à la plus grande taille d'agrégat du mélange. La distribution granulométrique uniforme favorise également le compactage, et les petites particules pénètrent entre les gros agrégats pour obtenir un béton à haute densité. La texture et la forme des particules

sont des variables qui doivent être prises en compte dans le choix des agrégats et des formulations de BCR, car elles ont une influence très évidente sur l'indice de vide du mélange de particules, et ont donc une influence très évidente sur le rapport d'eau en poudre fine [1-10-11].

I.3.3 l'eau

La quantité d'eau utilisée dans le BCR n'est pas nécessairement évaluée en fonction du rapport eau/liant. Comme le béton normal, il passe les tests de compactage, comme le test Optimum Proctor Modified varie selon la méthode de formulation. Par conséquent, cette quantité d'eau est largement affectée par le rapport des divers composants et joue un rôle important dans la sensibilité du béton

En fait, selon Dunstan MRH, trop peu d'eau produit un mélange adulte très ponctuel qui nécessite une énergie de compression très élevée pour atteindre la limite de densité. D'autre part, trop d'eau peut difficilement être comprimée, ce qui entraîne un mélange fluide [1- 9-12].

I.3.4 Adjuvant

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

Anderson pense qu'il semble possible d'incorporer de l'air dans le béton sec, mais en changeant la séquence de malaxage, un réseau suffisant de bulles sphériques peut être produit. Il a suggéré de mélanger d'abord le ciment, l'eau, le sable et les additifs. De plus, l'ajout d'une certaine quantité de super plastifiant permettra d'obtenir une pâte plus homogène et donc une meilleure répartition des pores [13].

Marchand réussissait à entraîner de l'air dans des bétons compactés au rouleau de Chantier et de laboratoire de rapport eau/liant 0.35 en s'inspirant de ce qu'Anderson préconisait Marchand modifiait la séquence de malaxage en mélangeant tout d'abord le ciment, l'eau. L'adjuvant et la moitié des granulats [14]

Des essais menés récemment à l'Université Laval Marchand et Pigeon, montrent que le type

de mélangeur joue un rôle important dans l'incorporation d'air. Un mélangeur dont le mode de fonctionnement consiste à cisailer la matière et à générer un vortex s'est avéré plus efficace pour entraîner l'air qu'un mélangeur qui ne cherche qu'à agiter les divers ingrédients ensemble[9].

I.3.5 Filler

Les fillers utilisés dans le BCR sont définis comme des matériaux très finement broyés, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Le filler a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. La teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment[15]. Les fillers ont un effet stabilisant dans la pâte de ciment, grâce au meilleur remplissage des vides. L'augmentation de la résistance est généralement parallèle à celle de la densité de tassement. C'est ce que démontre la figure I.1 , qui représente l'influence sur la résistance à la compression exercée par l'adjonction de 15 % en masse (par rapport à la teneur en ciment), respectivement de farine de calcaire (surface spécifique 3400 cm²/g), de poudre de quartz (surface spécifique 14500 cm²/g) et de fumée de silice (béton de référence: 360 kg de ciment Portland, facteur (e/c =0,45). Des deux fillers inertes, c'est la poudre de quartz - plus fine que la farine de calcaire - qui provoque la plus grande augmentation de la résistance; avec la fumée de silice, l'augmentation de la résistance est due principalement à la réaction pouzzolanique [16]. L'adjonction de fillers n'améliore pas l'étanchéité des bétons [17].S'ils sont suffisamment fins, les fillers ne nuisent pas à la résistance au gel du béton. Plusieurs paramètres doivent être pris en considération pour déterminer la quantité de fillers à ajouter[18].

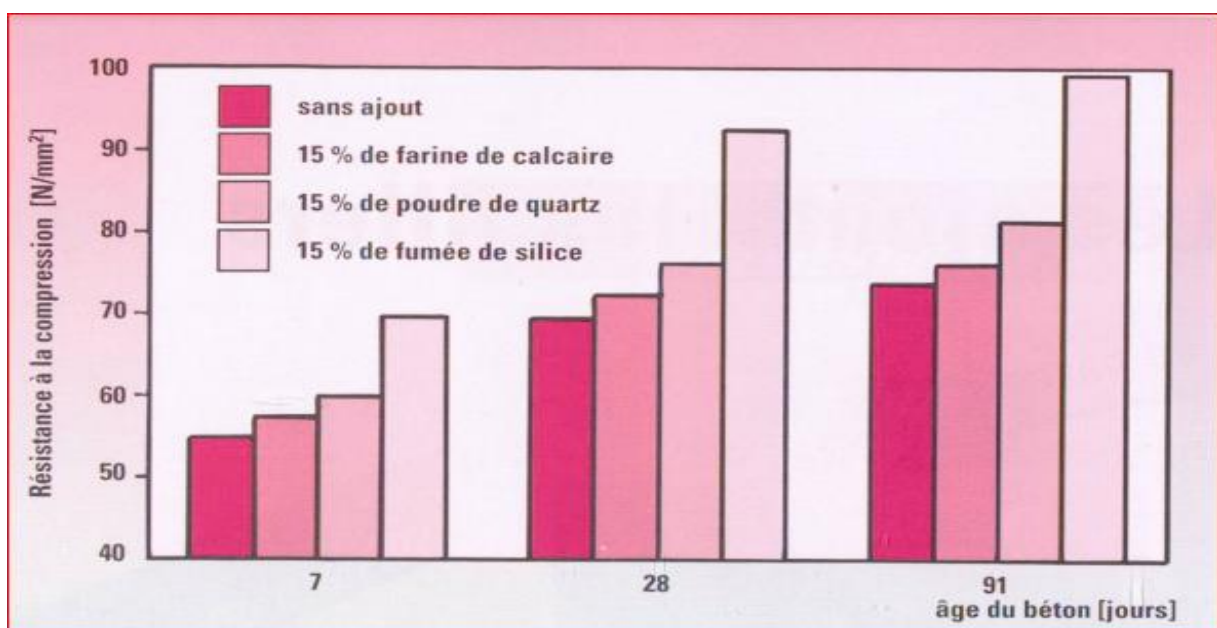


Figure I. 1: Développement de la résistance à la compression de béton contenant des ajouts [18].

D'après Anderson R, Gram H.E, les fines calcaires ont une double action dans le béton. Au jeune âge, elles ont un effet accélérateur de l'hydratation. Les grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates [19].

Farran et d'autres chercheurs ont également signalé qu'il existe un lien étroit entre l'agrégat de calcaire et le coulis de ciment, qui peut être causé par divers mécanismes, notamment une forte adhérence mécanique due à des surfaces de contact rugueuses et à une adhérence inter-agrégats. Combinaison physique et chimique [15].

Selon Buil M., Paillere A, les fillers ayant les mêmes propriétés que les granulats contribuent à améliorer l'adhérence des granulats, grâce au rapprochement des caractéristiques de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. Ensuite, une amélioration des propriétés générales du béton ordinaire a été observée. Et ils ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle actif exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment [7].

I.4 Les méthodes de formulations

I.4.1 Méthode de formulation empirique

D'après J. Marchand, Au début de la conception du BCR, des méthodes de formulations 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. Les deux méthodes les plus utilisées et les plus efficaces ont été décrites par le comité de l'American Concrete Institute (ACI) :

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

- Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité :

De son nom, cette méthode de formulation a pour principe d'atteindre une limite de maniabilité en effectuant plusieurs mélanges de BCR. Elle est basée sur trois étapes où les

proportions du BCR sont déterminées. La première étape comporte la réalisation de plusieurs gâchées d'essais de mélanges de mortier avec différent rapport eau/ciment et différents rapport sable/ciment pour déterminer le volume de pâte minimum. La masse volumique est mesurée pour chaque mélange. La figure I.2 montre le rapport eau/ciment donné correspondant au rapport sable/ciment qui mène à une masse volumique optimale. La seconde étape consiste à choisir un rapport eau/liant adéquat aux exigences des propriétés mécaniques voulues. Finalement, une phase d'ajustement des proportions de granulats fins et grossiers est effectuée pour obtenir la maniabilité désirée une fois les rapports eau/liant et sable/liant fixé [20].

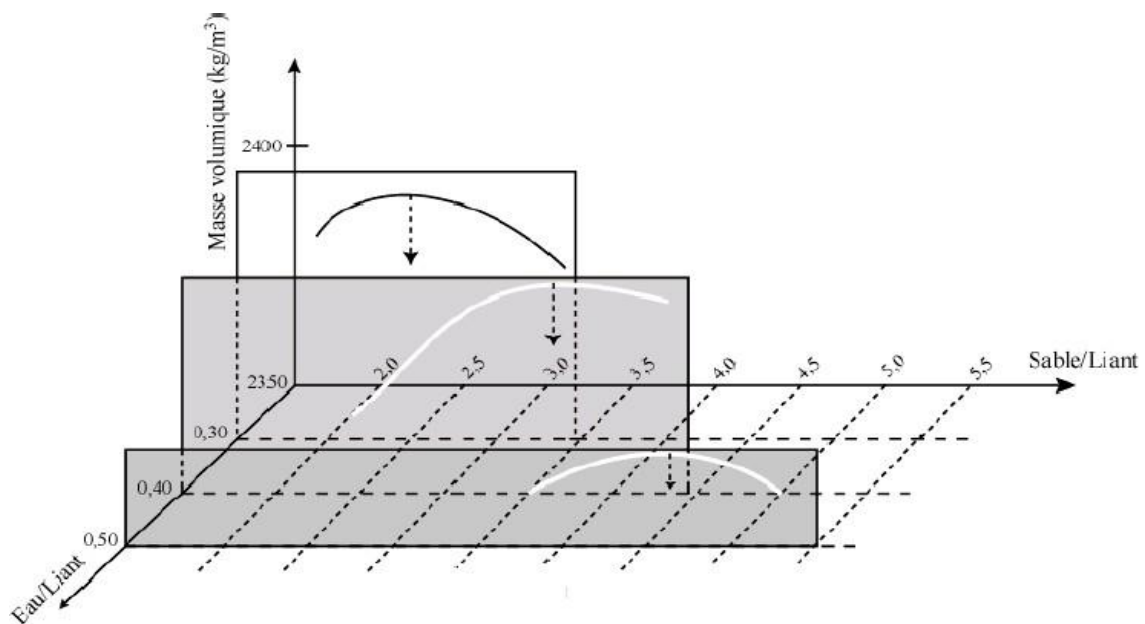


Figure I. 2: Paramètres optimum d'un mortier pour BCR [19].

- **Méthode de formulation selon des principes de géotechnique.**

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

la masse volumique sèche d'un côté et la teneur en eau de l'autre peut être dressé.

D'après la figure présentée par J. Marchand, on peut voir la valeur maximale qui représente la teneur en eau qui permet d'obtenir la masse volumique sèche optimale. La masse volumique sèche varie considérablement dans l'intervalle de la teneur en eau optimale. Par contre, la masse volumique humide reste insensible dans cette partie de la courbe. La phase finale de cette méthode consiste à déterminer la quantité de liant nécessaire pour avoir un béton avec des performances données. Cela s'effectue en réalisant différents mélanges avec différente teneur en liant et avec une teneur en eau fixée (teneur en eau optimale). Le mélange disposant de la teneur en liant la plus faible et les performances mécaniques requises est choisi[21].

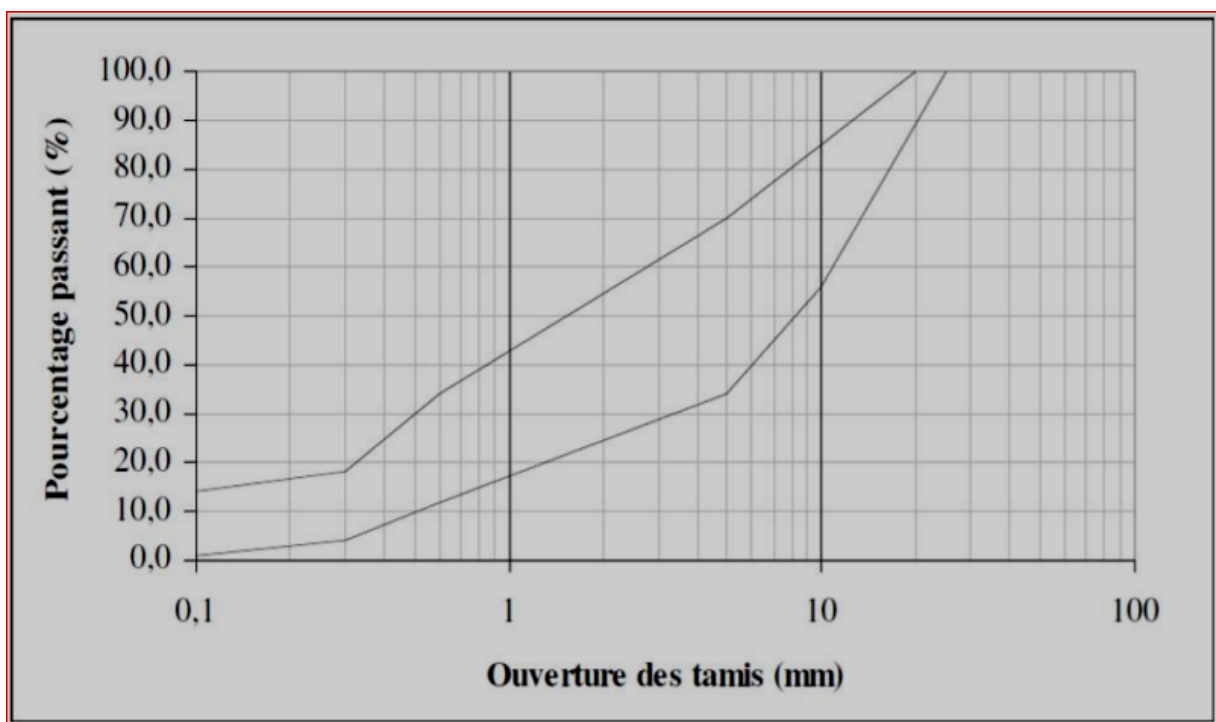


Figure I. 3: Fuseaux granulométriques de J. Marchand pour un BCR [21].

I.4.2 Méthode de formulation semi-empirique

D'après J. Marchand Cette méthode de formulation exige une approche expérimentale d'une part, et quelques formules empiriques d'autre part. La formulation par volume de pâte optimal est l'une des méthodes semi-empiriques utilisées pour la confection du BCR. Le principe de cette méthode consiste à calculer le volume de pâte par rapport à un volume de vides. Comme il a été mentionné en haut, cette méthode nécessite des mélanges d'essais en laboratoires. La principale hypothèse sur laquelle se base cette méthode est que le BCR nécessiterait d'avoir un volume de pâte pour combler les espaces inter granulaires restant après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale [21].

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

La formulation du BCR par cette méthode exige de suivre trois étapes. Premièrement, les proportions des granulats sont déterminées d'une façon à obtenir un mélange granulaire le plus compacte possible. Après le compactage, le volume de vides des granulats est calculé en mètre cube. Deuxièmement, le dosage de la pâte doit être ajusté de manière à avoir une maniabilité donnée. Finalement, le rapport entre l'eau et le liant doit être fixé afin d'obtenir une pâte qui puisse satisfaire les exigences mécaniques. Cette méthode de formulation permet d'obtenir des mélanges de BCR sans une énorme débauche d'énergie par rapport aux méthodes empiriques. Cependant, l'utilisation de cette méthode est impossible dans le cas d'utilisation d'un entraîneur d'air. En effet, la présence de cet adjuvant rend très complexe la prédiction des vides dans le béton [20].

I.4.3 Méthode théorique

La méthode théorique est très différente des précédentes méthodes de formulation. En effet, elle se distingue par l'absence de gâchés d'essais en laboratoires (expérimentale). Le principe de cette méthode est de minimiser la porosité inter granulaire du béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) a développé une méthode théorique appelée le modèle d'empilement compressible pour la confection de différents mélanges tels que le béton ordinaire et le béton à haute performance. Par la suite, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval a développé cette méthode de façon à confectionner le BCR. Plusieurs travaux ont été effectués à l'aide de cette méthode, les résultats obtenus montrent que cette technique donne amplement satisfaction [20].

I.5 Les propriétés du BCR

I.5.1 A l'état frais

I.5.1.1 L'ouvrabilité

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

Cette propriété est influencée par de nombreux facteurs

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

La maniabilité d'un BCR est mesurée à l'aide de l'essai VEBE selon les indications de la norme ASTM C 1170, L'essai VEBE consiste à définir le temps requis pour arriver à la compacité optimale. Le devis technique indique que la consistance du mélange devrait se situer entre 60 et 90 secondes.

La figure I.4 montre l'évolution de la maniabilité en fonction du temps de mélanges de BCR formulés avec des teneurs en liant de l'ordre de 250 à 325 kg/m³ pour des rapports eau/liant de 0,40 et 0,35 respectivement confectionnés avec un granulat grossier de grosseur maximale de 20 mm et un réducteur d'eau . Dès le contact du liant avec l'eau on constate que le temps Vebe cesse d'augmenter et une baisse de la maniabilité dans le temps est donc attendue [22].

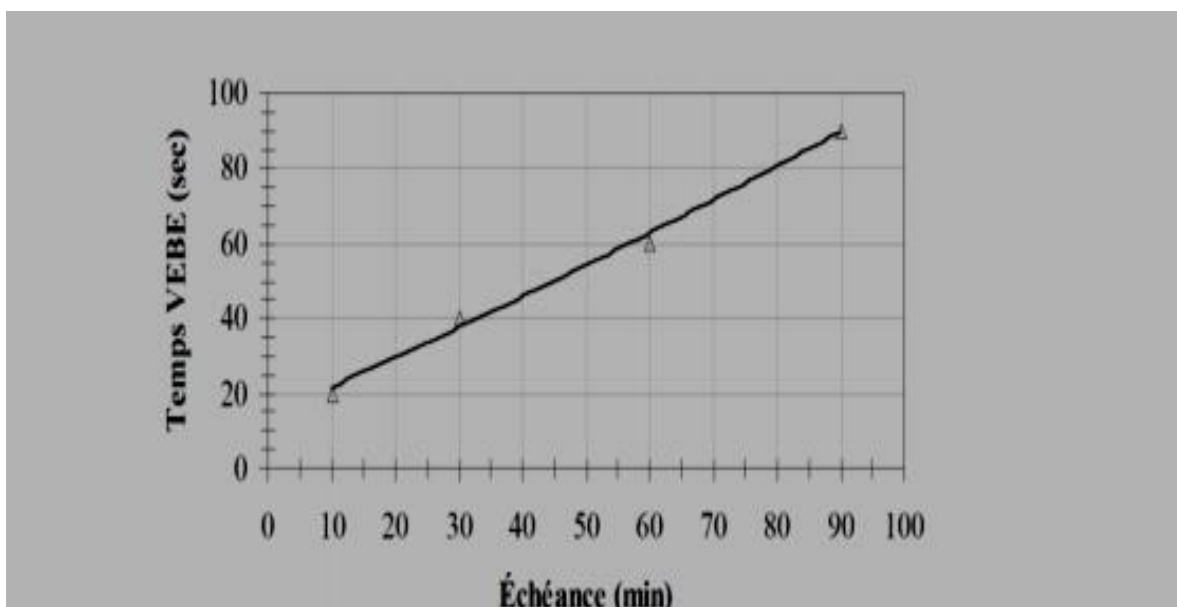


Figure I. 4:Exemple de l'évolution de la maniabilité dans le temps

d'un mélange de BCR[22] .

A l'aide de deux actions on peut augmenter l'ouvrabilité, Soit en augmentant le volume de pâte ou en diminuant le volume des vides. Ce volume peut être diminué soit en changeant la courbe granulométrique ou bien en optimisant la forme et la texture des granulats.

L'angularité des particules influence grandement la maniabilité des BCR. En effet, les mélanges qui contiennent beaucoup de particules plates sont moins maniables que ceux qui contiennent beaucoup de particules arrondies [23].

I.5.1.2 La masse volumique

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

De la sorte, la masse volumique des BCR est légèrement supérieure à celle des bétons usuels. On peut s'attendre à des masses volumiques supérieures à 2400 kg/m^3 pour les BCR [22].

I.5.2 A l'état durcis

I.5.2.1 La résistance à la compression

La résistance à la compression est le caractère le plus représentatif du BCR étant donné qu'il est supposé supporter des charges considérables. On peut s'attendre à des résistances de compressions variant de 40 jusqu'à 60 Mpa à 28 jours mais seulement dans le cas où ce BCR est conçu avec une bonne optimisation granulaire ainsi qu'un rapport E/C adéquat.

De règle générale, la résistance à la compression a un rapport avec la diminution et l'augmentation du rapport E/C, tant qu'il y a suffisamment de pâte pour combler les vides la résistance augmente. Cependant, lorsque la quantité d'eau devient trop faible, le BCR devient plus sec et la présence de vides dans le mélange augmente ce qui mène à diminuer la résistance [3].

La figure I.5 démontre clairement qu'un rapport E/C trop faible ou trop fort diminue énormément la résistance à la compression ce qui confirme le passage précédent [23-9].

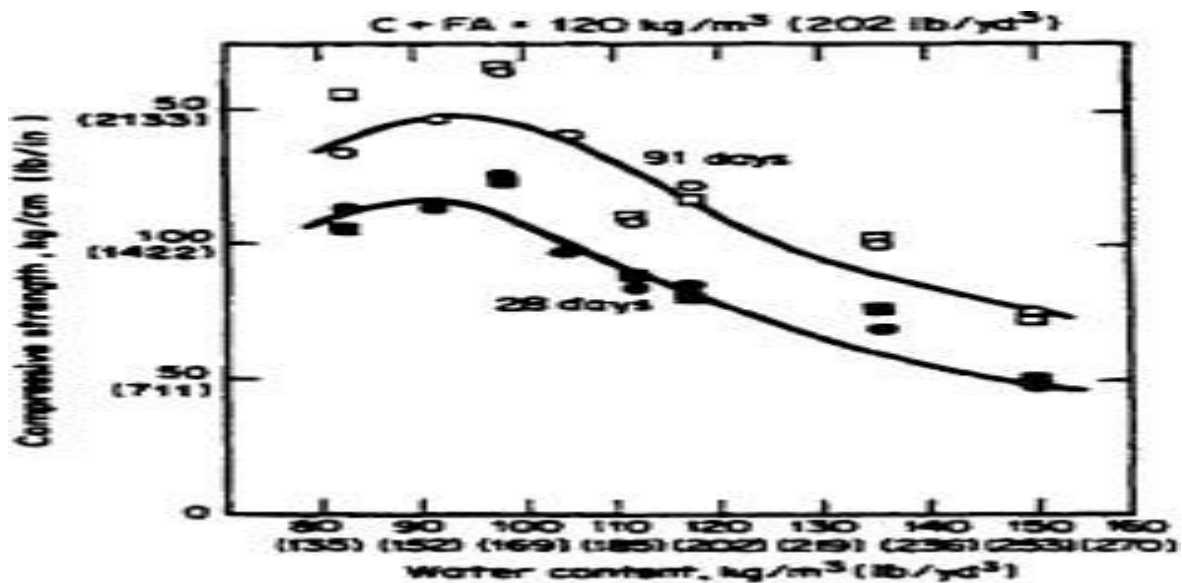


Figure I. 5: la relation entre la teneur en eau et la résistance à la compression du BCR [23-9].

La résistance à la compression dépend aussi du degré de compactage. En effet, si le compactage est insuffisant, il engendrera des vides entre les granulats, ce qui provoque une diminution de la résistance à la compression, ainsi que la qualité des granulats puisqu'ils représentent 80 % à 85 % du volume total du mélange. Il est donc important de ne pas la négliger [15].

I.5.2.2 Absorption capillaire

Les résultats d'absorptions capillaires faites par DEBOUCHA Walid et d'autres chercheurs indiquent que la plus grande valeur d'absorption d'eau par capillarité de 3.32kg/m² a été observée au mélange du béton témoin. L'incorporation des fillers calcaire diminue l'absorption d'eau par capillarité, en particulier pour le béton avec 5% de substitution où l'absorption capillaire diminue de 18% par rapport au béton témoin comme il est montré dans la figure I.6[24]

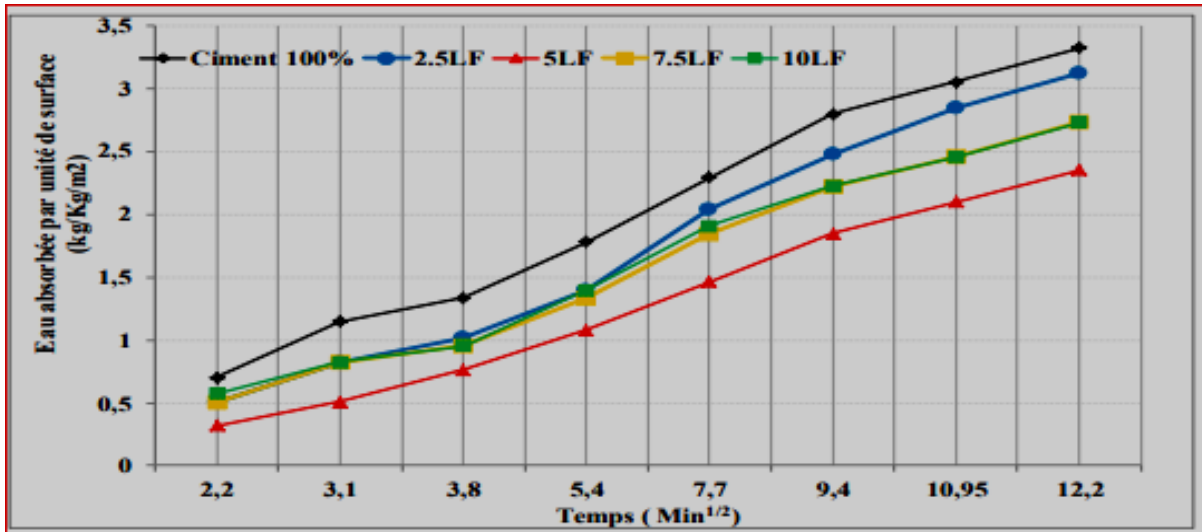


Figure I. 6 :Eau absorbée par unité de surface des mélanges étudiés [24].

L'évolution du coefficient d'absorption d'eau par capillarité des bétons contenant des quantités différentes des fillers calcaire est présentée dans la Figure I.6, Les résultats de coefficient d'absorption capillaire ont été également fortement influencés par l'ajout de calcaire ; en comparaison avec le béton témoin, le coefficient d'absorption d'eau a été amélioré par l'utilisation de 2.5% et 5% des fillers calcaire en substitution du ciment. Ce qui signifie que les fillers calcaire donnent une très bonne étanchéité, une matrice imperméable et de compacité élevée[24].

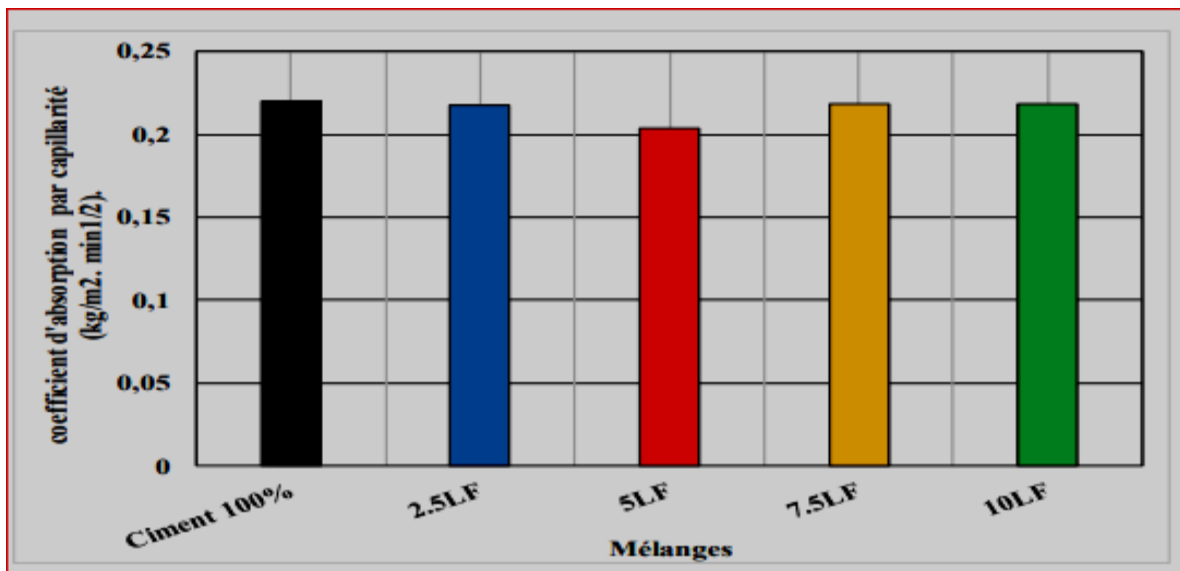


Figure I. 7: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mélanges étudiés [24].

I.5.2.3 Perméabilité

La perméabilité du béton compacté au rouleau est une propriété sujette à de nombreuses recherches. Les résultats démontrent que les bétons ordinaires sont plus imperméables que les BCR. La perméabilité des BCR est influencée par des caractéristiques de formulation : le rapport E/C, le volume de pâte ainsi que son degré de compactage [22].

Dans des barrages déjà construits, La perméabilité du BCR varie entre 10^{-4} m/s et 10^{-12} m/s, comme on peut le voir sur la figure I.8.

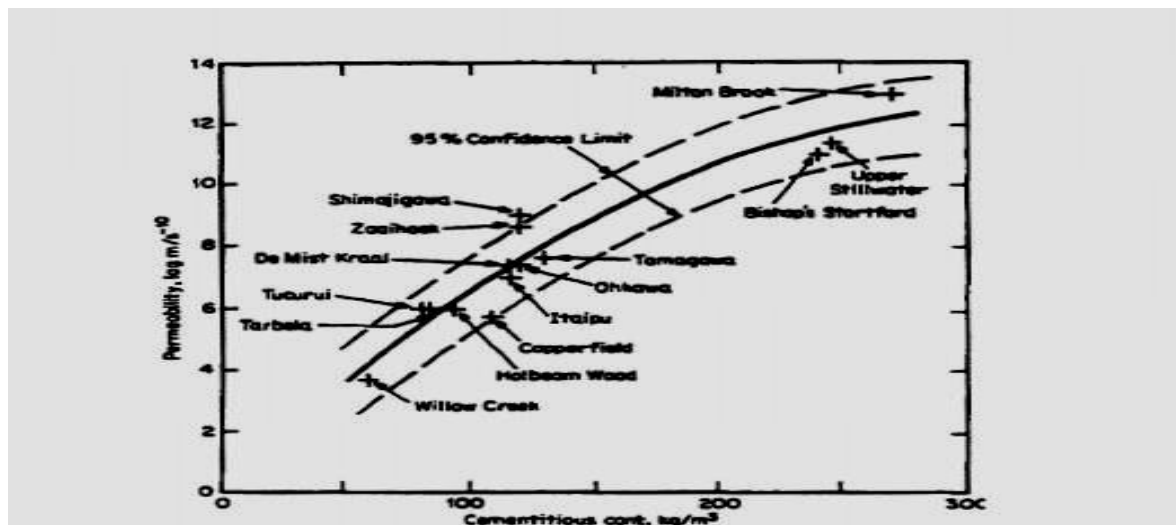


Figure I. 8: la Relation entre la perméabilité et la quantité des matériaux cimentaires [23].

Quoiqu'on s'attende à ce que la perméabilité des bétons compactés au rouleau soit plus importante que celle des bétons usuels, Mais elle est tout de même acceptable dans plusieurs cas. Malgré les bons résultats obtenus jusqu'à présent concernant l'étanchéité des barrages, des essais de perméabilité doivent toujours être effectués lors de la réalisation d'ouvrages similaires. Une bonne imperméabilité peut être obtenue en augmentant la teneur en matériaux cimentaires, le degré de compaction et en utilisant des particules fines ayant une granulométrie bien étalée [23].

I.6 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur le BCR et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement, et les résultats d'autres chercheurs qui assurent l'utilisation du BCR à un effet remarquable.

La synthèse bibliographique a mis en évidence que le BCR est un matériau performant, économique et durable. Pour un mélange de BCR, le compactage en couche est l'élément clé de son comportement à l'état durci.

De nombreuses méthodes de formulation sont applicables aux BCR (empirique, semi empirique

ou théorique). Il est toutefois à préciser que ces propriétés (mécaniques, physiques ou thermiques) sont très sensibles à sa composition (type de ciment et d'addition et dosage).

Chapitre II
Valorisation De La brique Dans Le
Béton

II.1 Introduction

Considérée comme un matériau résistant et très écologique, la brique se compose d'une grande partie d'argile jusqu'à 65% à laquelle l'eau et le sable sont ajoutés [25].

Aujourd'hui, près d'une maison en deux est construite en briques de terre cuite qui signifie une production annuelle énorme de ce matériel, de cette même production entraîne une quantité importante de déchets en cas de rupture ou de surcoût de la brique, sans mentionner les décombres qui suivent les sinistres tels que les tremblements de terre incendies et les inondations ou par le vieillissement et la dégradation des bâtiments publics qui nécessitent la démolition[26] .on prend un exemple ,La Belgique produit chaque année environ 1000 kg de déchets de démolition et de construction par habitant comprenant 41% de maçonnerie [27].

suite à ce fléau des recherches ont été menées depuis 1928 sur l'éventualité de donner une seconde vie à ces déchets de brique[28] .En Allemagne, après la seconde guerre mondiale, il est devenu primordial de s'en débarrasser des débris, Cela à mener à la mise en place d'une usine de recyclage. Il a été cité que vers la fin de l'année 1955, environ 11.5 million m³ de déchets de brique ont été utilisés par ces usines de recyclage Allemandes pour la construction de 175.000 logements [29].



Figure II. 1:représente les débris suite à la deuxième guerre mondiale [23].

Le recyclage résout différents problèmes assez conséquents, elle nous fait gagner des surfaces de stockage de déchets, baisse la pollution environnementale, préserve les ressources naturelles non renouvelables, réduit considérablement le coût total de construction et enfin réduit le problème d'approvisionnement en sable et graviers. Ces déchets peuvent également être exploités dans les différents domaines tels que les courts de tennis, pour les routes comme des granulats et dans la culture des plantes. La carence de connaissances sur les déchets de brique conduit à la méfiance de ses utilisateurs, La brique est réutilisée principalement pour de nouveaux projets de constructions ou pour des travaux de rénovations. Une fois débarrassées des mortiers, Les déchets de brique peuvent être utilisés comme un substituant partiel au ciment, granulats et même comme filler dans notre cas d'étude, Elles apportent une originalité aux bâtiments [30].

II.2 la brique

II.2.1 Composition et structure interne

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

L'argile est l'ingrédient principal qui constitue la matière première des briques. L'argile est un minéral de la famille des phyllosilicate [31-32]. La particularité de ces minéraux c'est leur structure. Ils sont composés de feuillets, tétraédriques et octaédriques et d'espaces interstitiels comme il est montré dans la Figure II.2

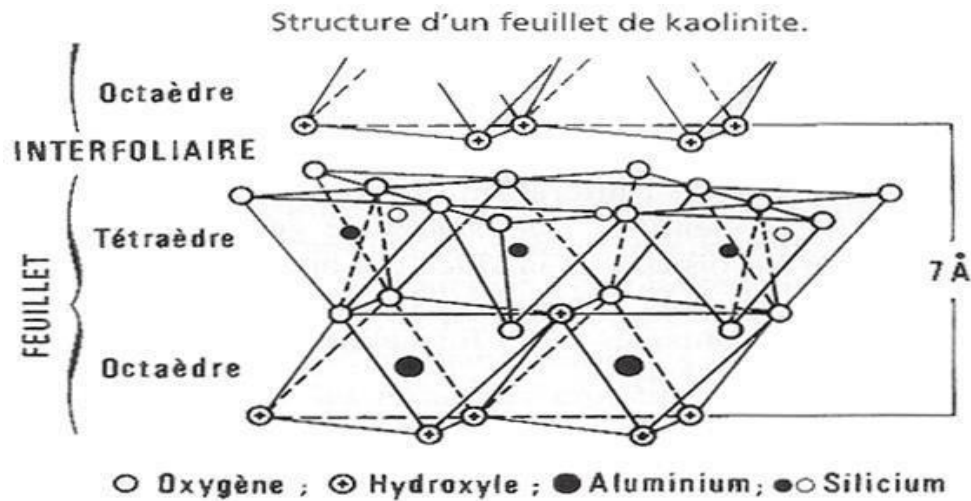
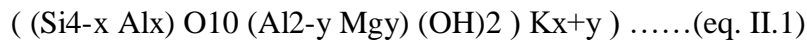


Figure II. 2: Structure en feuillet d'un minérale [35].

La formule chimique d'un phyllosilicate, élément de base de l'argile, est la suivante



Couche tétraédrique / couche octaédrique / cation compensateur.

Cette structure en feuillet permet un agencement cristallin complexe. Il existe trois familles d'argile classées en fonction de l'agencement des feuillets dans la structure cristalline [33-34].

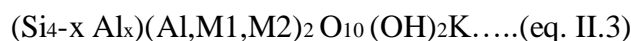
- 1) La première famille qui contient 1 couche de tétraèdres (T) et 1 couche d'octaèdres (O).

Un exemple : kaolinite, sans substitution, le feuillet est neutre. La distance de la surface d'un feuillet à celle du feuillet suivant est de 0,7 nm, sa formule est :



- 2) La deuxième famille qui contient 1 couche d'octaèdres, insérée entre deux couches de tétraèdres.

Un exemple : les illites avec des substitutions foliaires, compensées électriquement par des ions K^+ en position inter foliaire. L'équidistance moléculaire est de 1 nm. Formule générale :



- 3) La troisième famille qui contient un feuillet de type 2 avec une couche d'octaèdres supplémentaires, isolée dans l'espace interfoliaire.

Un exemple : les chlorites



La terre argileuse contient également des minéraux secondaires tels que :

- le quartz qui est le minéral le plus abondant sur terre, de formule minéralogique : **SiO₂**.

- les feldspaths sont des tectosilicates composés d'aluminosilicate de sodium, potassium ou calcium, de formule :



Ces minéraux contribuent à la déformation de sol argileux lors de la cuisson. Considérez-les comme des éléments fondants, c'est-à-dire qu'ils permettent la stabilité du matériau pendant la cuisson et la reconstruction minéralogique.

- les minéraux ferreux, en fonction de leur oxydation, sont les minéraux conférant leur coloration aux briques allant du jaune au rouge [35].

II.2.2 Processus De Fabrication

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

II.2.2.1 Extraction de matière première

La matière première de la brique est l'argile. L'argile est extraite dans des argilières situées en zones d'extraction, l'argile est principalement présente dans le sous-sol et ses propriétés dépendent d'où elle est extraite c'est-à-dire l'origine géologique.

Les briqueteries avoisinent de règle générale les argilières. Certaines briqueteries ajoutent des argiles en provenance d'autres argilières dans le but d'enrichir leur gamme de produits [36].



Figure II. 3:Extraction de l'argile [36]

II.2.2.2 Préparation de l'argile

La préparation comprend deux étapes principales, le Broyage et malaxage. Ces opérations confèrent à la masse d'argile l'homogénéité et la plasticité nécessaires au moulage de la brique. Cette étape a aussi le rôle de minimiser les inclusions solides présentes dans l'argile pouvant influencer négativement la structure du produit. L'argile contient des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini qui peuvent être éliminés que par l'action bactériologique c'est pour cette raison que l'argile est stockée pendant un certain temps dans un endroit adéquat au développement de ces bactéries d'une part le broyage et malaxage et d'une autre le dosage et le mélange des matières premières. Cette préparation vise l'obtention d'une masse argileuse homogène et plastique qui sera aisément transformée en produit fini. [36].

II.2.2.3 Façonnage

Selon le procédé de fabrication, après obtention de la masse argileuse et plastique que l'on peut façonner dans la mouleuse à vis cane fin, cette masse est pressée à travers une filière qui lui confère sa forme et sa perforation spécifiques. Un appareil de coupe automatique débite les pièces aux dimensions voulues [36].

II.2.2.4 Séchage

Avant l'étape de la cuisson, les briques crues doivent perdre une grande partie de leur teneur en eau. La stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme de la dessiccation. Le séchage s'opère dans des chambres ou des tunnels où il se poursuit de manière régulière et rapide entre deux et quatre jours. La température et le taux d'humidité sont contrôlés tout au long du processus de séchage au moyen d'un système informatique [36].

II.2.2.5 Cuisson

Le sol argileux pour la production de briques est cuit à haute température. Ces augmentations de température provoquent des déformations au sein de la matrice argileuse. L'argile est affectée à différents niveaux de température [33-37]

1)- À 100 °C, déshydratation de la matière première, évaporation de l'eau libre. Perte de l'eau colloïdale.

2)- À 200-250 °C, déshydratation, perte de l'eau interstitielle c'est-à-dire entre les feuillets.

3)- De 250-500/800 °C, changement de la structure argileuse, modification du réseau cristallin.

4)- Au-delà de 800 °C, en fonction des groupes argileux, amorphisation et vitrification d'une partie du minéral.

La cuisson de l'argile provoque des changements importants dans la structure et les minéraux du mélange. Au fur et à mesure que la température augmente, un nouveau stade minéralogique amorphe s'affiche. La figure II.4 montre un exemple de déformation subie par la kaolinite, l'illite et la sillectite lors de la cuisson de la terre cuite [38].

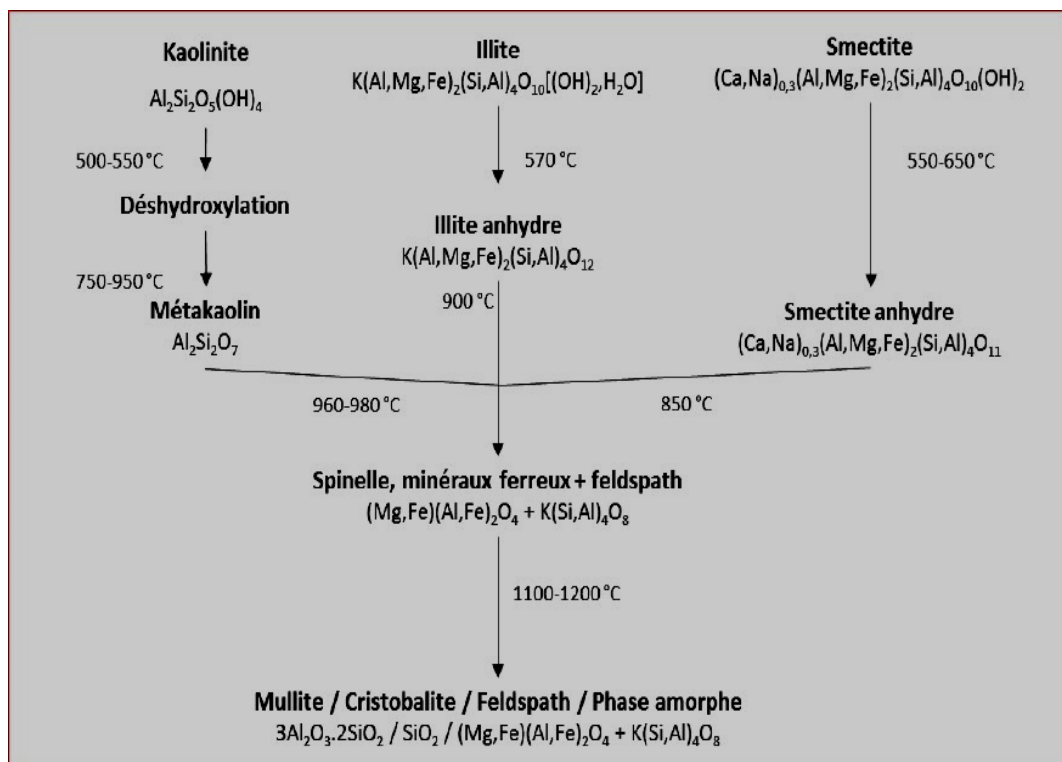


Figure II. 4: Transformation minéralogique des argiles lors de la cuisson [38].

Ces nouvelles procédures minéralogiques dépendent de l'argile de départ. Il est à noter que dans tous les cas il y a une forte concentration de phases siliceuses et aluminiques et certainement les amorphes. La cuisson crée un matériau qui répond aux exigences fonctionnelles et structurelles de la structure. La proportion de phase amorphe dans les briques varie de 12% à

35%. La déformation minéralogique de l'argile varie en fonction de la Température et du temps de cuisson. À des températures supérieures à 900°C, l'état amorphe se métamorphose à nouveau, résultant en des minéraux plus cristallisés tels que la mullite et la cristobalite [39-40]. Ces minéraux ont peu ou pas de réaction avec l'hydroxyde de calcium pour augmenter la phase cristalline du mélange. L'état amorphe nourrit la réaction pouzzolane et la nature de l'état amorphe est importante. Cette réaction fragilise la brique la moins amorphe [41-42].

La composition minéralogique des briques est donc essentiellement basée sur des minéraux comme le quartz, et autres dérivés siliceux tel que le cristobalite, forstérite, mullite, ainsi que des minéraux alumino-silicatés comme les feldspaths (albite, microcline). Leur composition chimique reprend en grande majorité des silicates et des aluminates ainsi que des éléments secondaires comme le calcium et le fer [39].

- **Activité pouzzolanique**

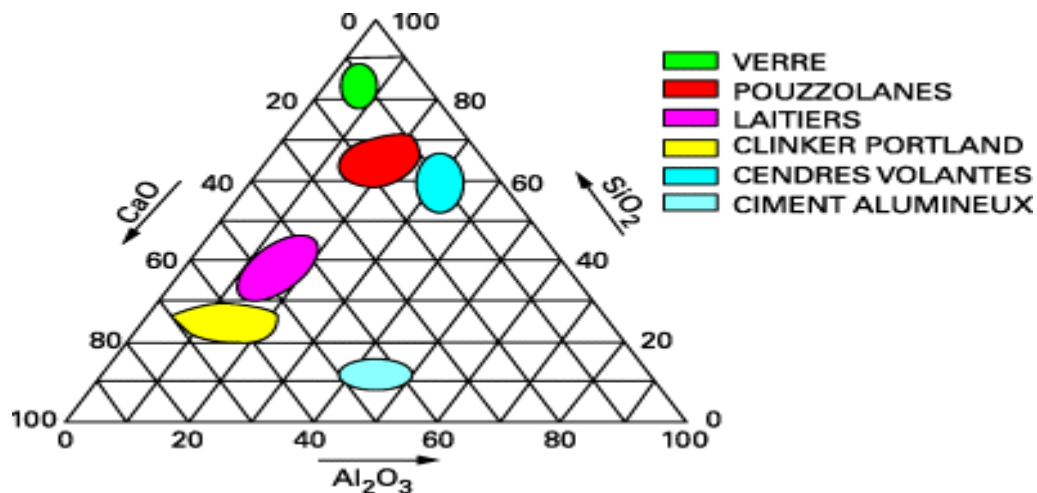
Dans notre étude, la brique est utilisée sous forme de fines poudre plutôt que dans leur forme précoce ils sont donc broyés pour obtenir un matériau de taille inférieure à 1 mm. Comme indiqué ci-dessus, la brique est un matériau essentiellement alumino-silicaté qui, sous forme de fines, peut être qualifié de matériau potentiellement pouzzolanique.

Une pouzzolane est définie comme des matériaux siliceux ou silico alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes, mais qui sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes [43].

Les briques peuvent aussi être caractérisées par leur quantité d'oxydes, $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 (+ CaO) \geq 70 \%$, qui les inclut dans les pouzzolanes et en partie dans les verres en fonction de la quantité de phase amorphe. Sur base de la teneur en 3 oxydes principaux, les matériaux réactifs – hydrauliques et pouzzolaniques – sont classés sur le diagramme triangulaire de Keil dans la Figure II.5 [44].

Un matériau pouzzolanique va, en présence d'eau, se combiner avec la chaux pour former des hydrates types C-S-H_{pouzzolanique} qui contribue aux performances et à la durabilité des liants réalisés. Les C-S-H_{pouzzolaniques} se différencient des C-S-H produits par l'hydratation du ciment par leur rapport Ca/Si plus faible. Cette propriété est essentielle à déterminer pour envisager l'utilisation des fines de brique sous forme de substitut dans les mélanges hydrauliques

La pouzzolanicité et la finesse sont dès lors considérées comme les paramètres permettant de caractériser l'activité des fines de brique lorsqu'elles sont utilisées dans des mélanges hydrauliques [40].



II.2.2.6 Emballage

Lorsque la cuisson est achevée les briques de terre cuite sont à présent disposées à être transportées et livrées sur chantier [36].

II.2.3 propriétés physiques et chimiques

II.2.3.1 Porosité

Une brique présentant une porosité élevée varie entre 20 à 50% qui pourra absorber davantage d'eau [45].

II.2.3.2 Chaleur Massique

La chaleur massique des briques est comprise entre 0,84 et 0,92 kJ/kg.K.

Cette valeur affecte l'inertie thermique c'est-à-dire les murs en briques se réchauffent lentement et ne libèrent la chaleur que plus tard, lorsqu'il fait plus froid [46].

II.2.3.3 L'absorption

L'absorption des déchets de brique est estimée entre 5 et 15 % par rapport au poids de la matière dans son état sec. C'était nécessaire, par conséquent, il faut saturer les déchets de brique avant tout mélange [47].

II.3 utilisation des déchets de brique dans le béton et leurs comportements

II.3.1 Influence sur l'ouvrabilité

Étude de Khatib.s montre que la maniabilité des matériaux en utilisant des granulats de brique est significativement réduite à un taux de substitution de 25 % ou plus, contrairement aux mélanges de granulats de béton, qui augmentent légèrement la maniabilité. Par conséquent, il est nécessaire de réévaluer la quantité totale d'eau pour un fonctionnement correct et une hydratation optimale du mélange de granulats de briques pour obtenir une quantité efficace d'eau suffisante [48].

Il a été confirmé par P. B. Cachim que les formulations substituées par des granulats de brique montrent une diminution de l'ouvrabilité et de la densité des mélanges [49]. Résultats illustrés à la figure

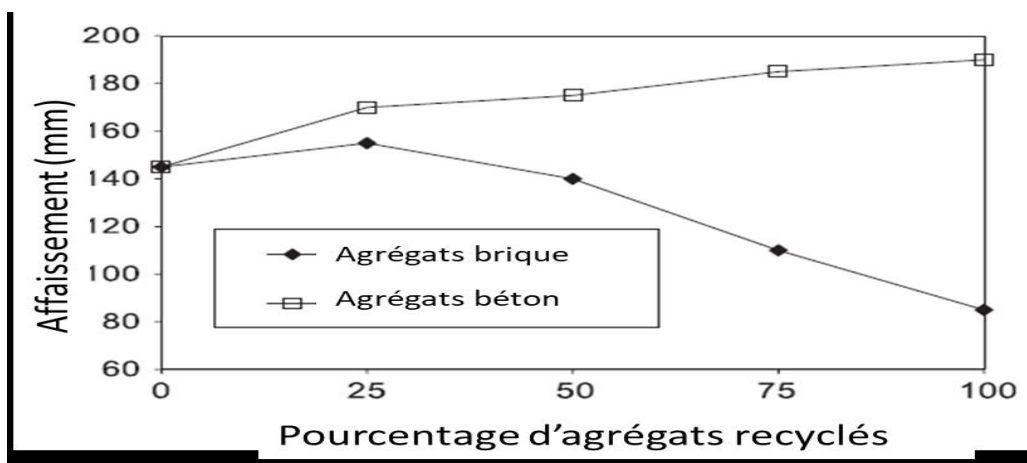


Figure II. 6: Effet des agrégats de brique sur l'affaissement [43].

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

Pour les particules très fines (type B1), une augmentation de la surface spécifique signifie une augmentation de la demande en eau et donc une mauvaise maniabilité. Pour les fines (types B2 et B3) de granulométrie similaire ou plus grossière que la poudre de ciment, l'ouvrabilité augmente avec la proportion de fines. Le mélange est plus fluide. Si le taux de remplacement dépasse 20 %, cela affectera le fonctionnement. Pour les mélanges à faible substitution 10 et 20% [43].

II.3.2 influence sur la porosité et l'absorption d'eau et densité

Les résultats montrés par Paulo et B.Cachim indiquent une réduction claire et évidente de la densité lors de l'utilisation de granulats recyclés comme il est indiqué dans la Figure II.7

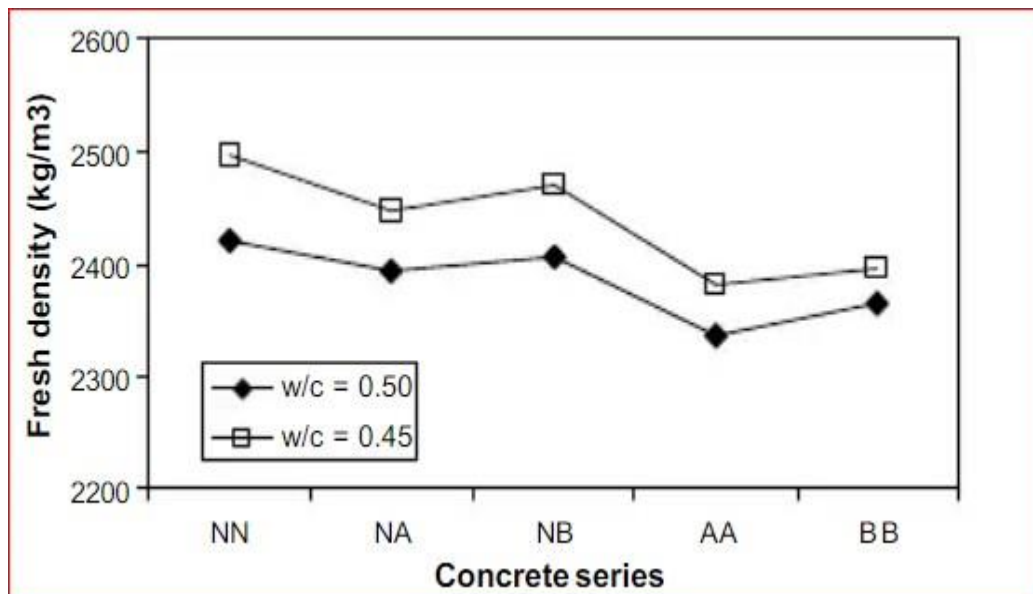


Figure II. 7: Densité fraîche du béton [43].

Cependant d'autres propriétés analysées ne sont pas très affectées par la substitution des agrégats naturels par des briques broyées. La raison de ceci peut être liée à un effet de durcissement interne des briques broyées. Comme les briques sont saturées lorsqu'elles sont utilisées, et en tenant compte de l'absorption des briques, à l'intérieur du béton il y a un pourcentage supplémentaire de 8-23% d'eau en excès par rapport à celui spécifié par le

Rapport eau/ciment. Cependant, cette eau se trouve à l'intérieur des briques et n'est pas disponible pendant le processus de mélange. Par conséquent, le béton produit avec des briques concassées a de l'eau supplémentaire qui

Pourrait être utilisée pour l'hydratation du ciment à des étapes ultérieures et, simultanément, ne semble pas contribuer à la porosité du béton.

Ainsi, l'utilisation modérée de briques saturées dans le béton agit comme un agent auto protecteur pour le béton. De plus, si l'eau qui se trouve à l'intérieur des briques n'est pas utilisée pour l'hydratation du ciment et reste à l'intérieur des briques, alors elle remplit les pores des briques créant un agrégat plus dense. L'équilibre correct entre la résistance réduite des agrégats de briques broyées et son efficacité comme agent d'auto durcissement est le point clé pour les utiliser comme agrégats dans le béton [49].

II.3.3 l'influence sur les propriétés mécaniques

II.3.3.1 Résistance à la compression et à la traction

Les résultats de la recherche faite par Paulo B. Cachim a montré la résistance à la compression de la brique provenant de l'industrie B est plus élevée que celui de la brique provenant de l'industrie A et qu'elle a une meilleure résistance à l'écrasement et aussi son indice de forme est plus proche de celui des agrégats naturels, ces résultats sont prévisibles Pour une substitution de 15% des agrégats naturels par des briques. En revanche réduction de la résistance observée pour le béton avec 30% de remplacement des agrégats est en accord avec les études de Brito et al [44] Cependant, la résistance atteinte a montré que les briques broyées peuvent être utilisées pour remplacer les agrégats naturels dans le béton (24.5-38.5 MPa à 28 jours) pour des pourcentages d'environ 15% à 20%. Les résultats indiquent que les propriétés analysées ne sont pas très affectées par la substitution des agrégats naturels par des briques broyées.

Les résultats de la résistance à la traction sont similaires à celles mentionnées dans les tests de compression le tableau II.1 Présente les résultats Propriétés du béton durci [49].

Age =>	fc (MPa)				fct (MPa)	Ec (GPa)
	7	14	28	90	28	28
NN50	20.8	26.6	30.5	33.5	2.34	32.9
AA50	16.8	22.5	24.5	28.3	2.44	28.5
NA50	22.6	26.4	29.4	34.0	2.25	35.6
BB50	21.6	24.8	29.0	31.6	2.38	35.9
NB50	24.3	26.7	32.3	34.1	2.72	32.4
NN45	29.0	32.2	36.2	40.1	2.97	35.2
AA45	20.0	26.1	27.6	32.3	2.38	31.4
NA45	26.9	29.0	32.1	40.0	2.72	33.7
BB45	25.4	29.0	32.3	36.0	2.67	32.6
NB45	26.1	31.5	38.5	44.8	2.97	34.7

Tableau I. 1: Propriétés de durcissement du béton (résistance à la compression, fc, et à la traction, fct, et module d'élasticité, Ec) [49].

II.3.4 l'influence sur les propriétés thermique

D'après l'étude menée par ALI A. ALIABDO et d'autres chercheurs, lors de l'incorporation des déchets de briques finement broyés dans le mortier du béton ont généralement un effet positif sur la résistance thermique. Cette constatation est valable pour les agrégats fins, grossiers ou totaux, qui sont remplacés par des agrégats recyclés. L'effet de l'incorporation d'agrégats recyclés grossiers est plus prononcé dans l'augmentation de la résistance thermique. La corrélation entre le poids unitaire et la résistivité thermique des bétons est présentée à la Figure II.8 [50].

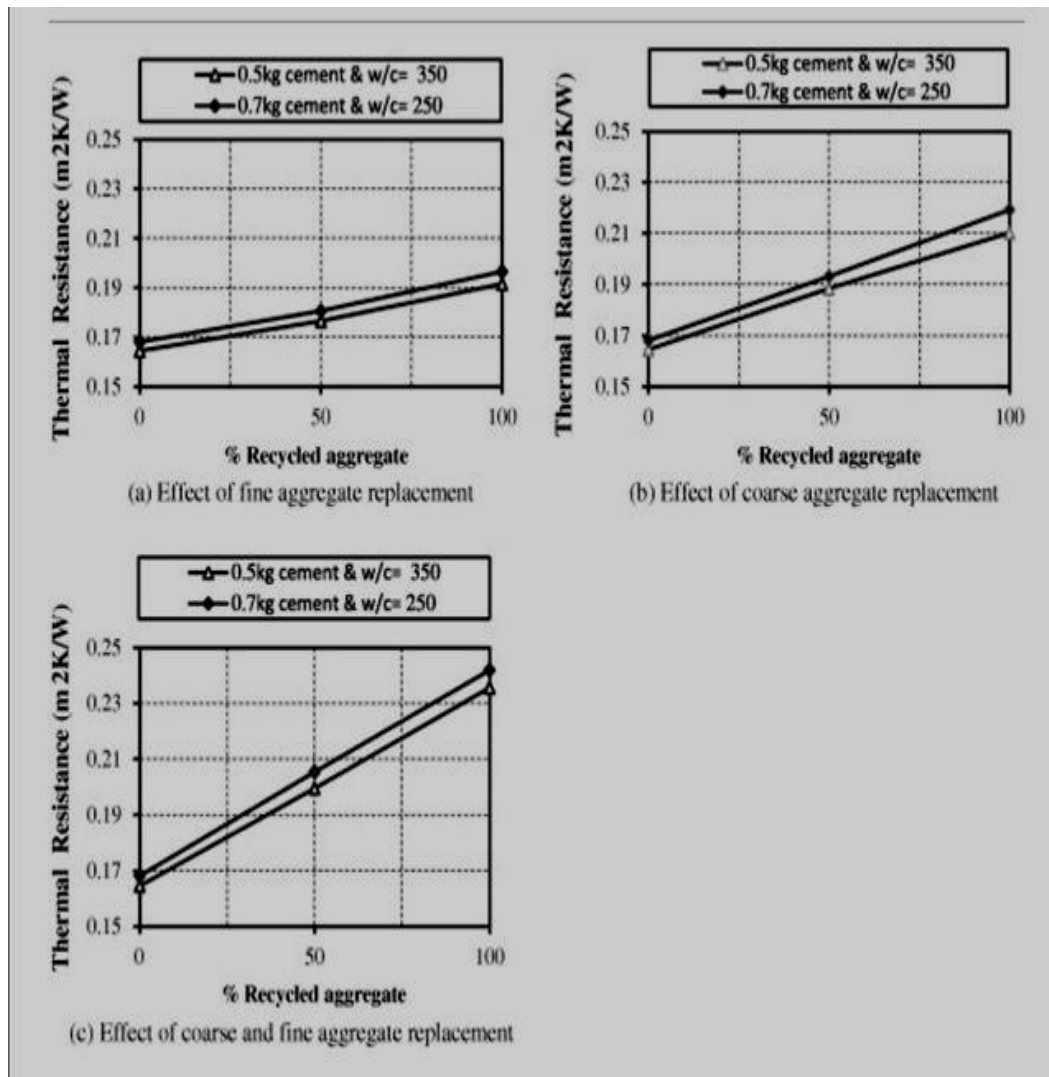


Figure II. 8: Effet de la teneur en granulats recyclés sur la résistance thermique des bétons[50].

II.4 conclusion

Le recyclage des déchets est devenu aujourd'hui la bonne solution qui peut donner des ressources renouvelables et durables qui contribuent au processus de construction dans le domaine du génie civil de manière à protéger l'environnement. Les déchets de briques rouges constituent une alternative intéressante dans ce cas, vu que ces déchets sont disponibles dans les chantiers de construction

Les résultats de ces études ont confirmés qu'il est possible de fabriquer des bétons à base des déchets de briques malgré la défaillance mécanique de ses

Derniers La brique entraîne des changements de comportement du mélange Hydraulique en fonction de la taille des particules ainsi que de la quantité valorisées, Pour les particules très fines une augmentation de la surface spécifique signifie une augmentation de la demande en eau et donc une mauvaise maniabilité. Pour les fines de granulométrie similaire ou plus grossière que la poudre de ciment, l'ouvrabilité augmente .La finesse des particules joue un rôle dans le développement des résistances mécaniques si celle s'ilest remplacé a une forme est plus proche de celui des agrégats naturels cependant on augmentant le taux de substitutions la cela réduise la résistance, en revanche la fine de brique a un Effet positif sur la résistance thermique

Chapitre III
Caractérisation Des matériaux utilisés et
La formulation du BCR

III.1 introduction

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour élaborer les mélanges de béton compacté au rouleau étudiés .Les étapes ainsi que la procédure utilisée pour la formulation de BCR ont été bien expliquées.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 les caractéristiques des sables

Pour notre étude nous avons utiles deux type de sable : un sable fin S1 (0/2) de BOUGAZOUL et un sable lavé S2 (0/5) de provenance de BAGHLIA comme il est montrédans la figure III.1



Figure III. 1: Sable fin et sable lavé.

III.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

L'essai, réalisé selon la norme NF P 18-560, 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 du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).



Figure III. 2:l'essai d'analyse granulométrique.

Les résultats d'essai sont présentés dans les graphes III.3 et III.4 suivants

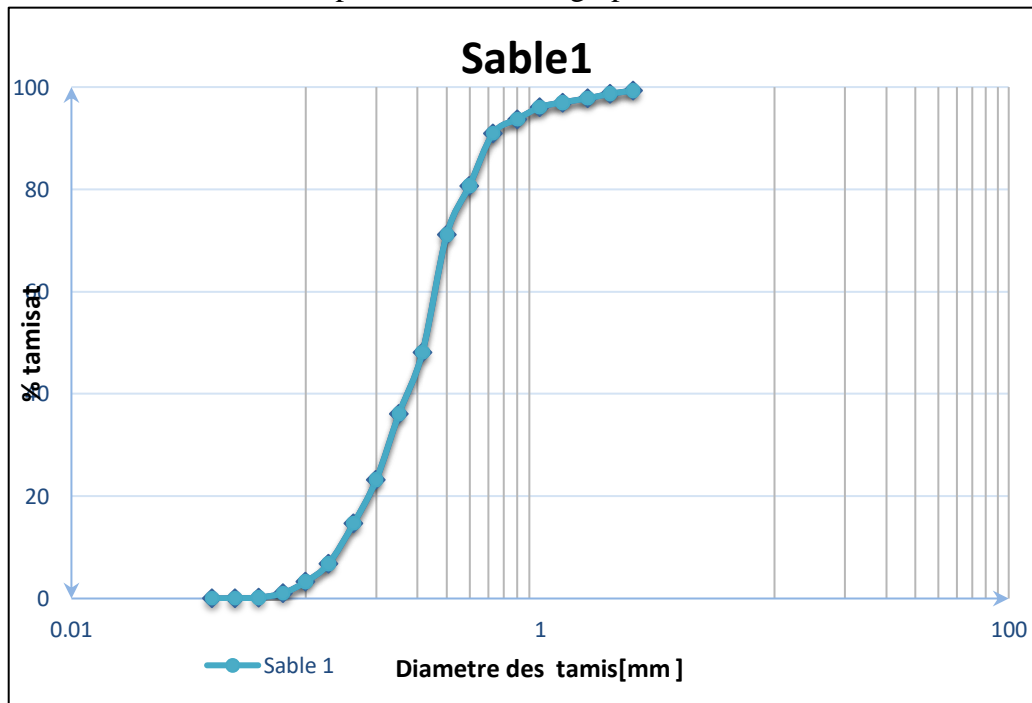


Figure III. 3:la courbe granulométrique du sable.

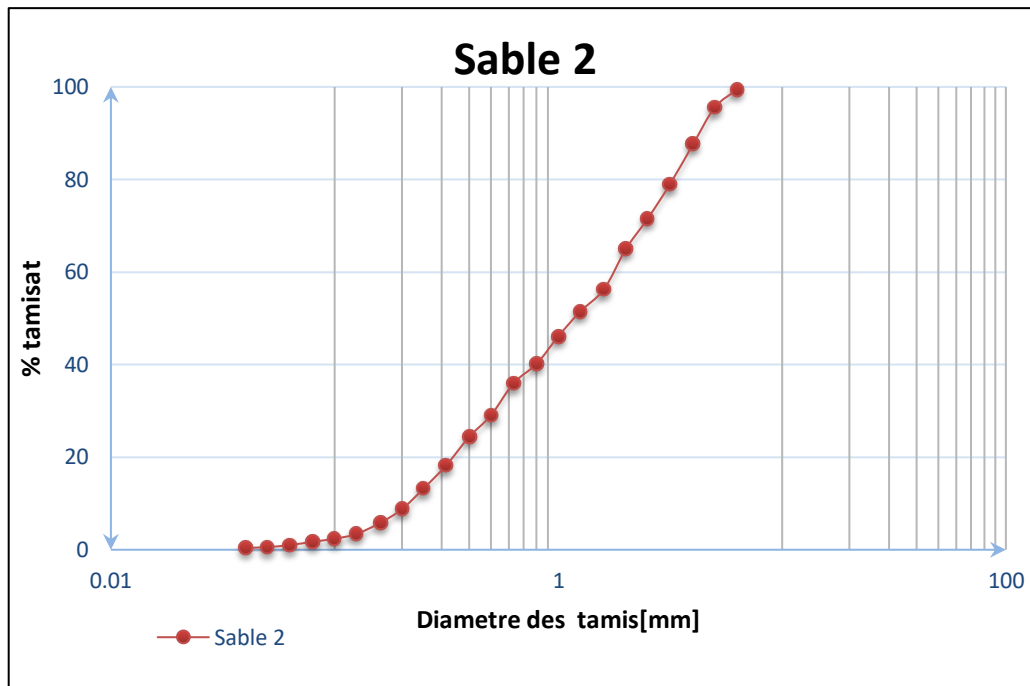


Figure III. 4: Courbe granulométrique du sable 2.

III.2.1.2 Module de finesse

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

Le module de finesse égale a :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \frac{\text{refue cumulés en \% des tamis}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

M f $M_{f1} = 1.44$ et $M_{f2} = 3.2$

-La correction du module de finesse :

Elle permet de calculer les proportions relatives de deux granulats de module de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un mélange avec un M_f choisi.

$$M_f=2.7 \text{ alors } X1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} = 0.292 \text{ et } X2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}} = 0.707$$

Les pourcentages des deux sables nous donnent le sable optimale dont sa courbe Granulométrique est présentée dans la figure III.5 :

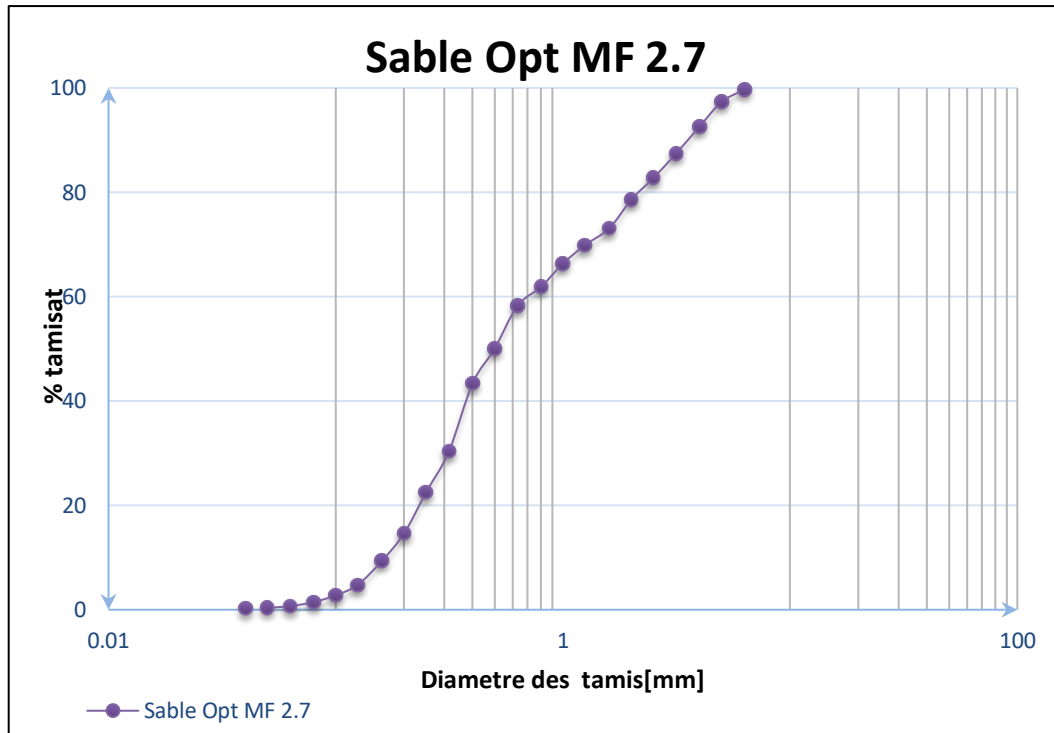


Figure III. 5: Courbe granulométrique du sable optimal.

III.2.1.3 Masse volumique apparente

Il s'agit de mesurer la masse d'un récipient cylindrique d'un volume connu : 1 litre pour les sables et 2.149 L pour les graviers, rempli 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, Unité: kg/m^3 - g/cm^3 - g/l , l'essai ce fait selon la norme NF EN1097-3.

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



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

Masse de récipient vide pour sable 504,3g		
Volume de récipient pour le sable v=1L		
Sable jaune S1	Sable lavé S2	Sable optimal SO
ρ_{app} [kg/L]=1,41934	ρ_{app} [kg/L]= 1,66246	ρ_{app} [kg/L]= 1,6496

III.2.1.4 Masse volumique absolue

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

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau ;
- Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- L'eau monte dans l'éprouvette, Lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est alors donnée par la formule suivante :

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

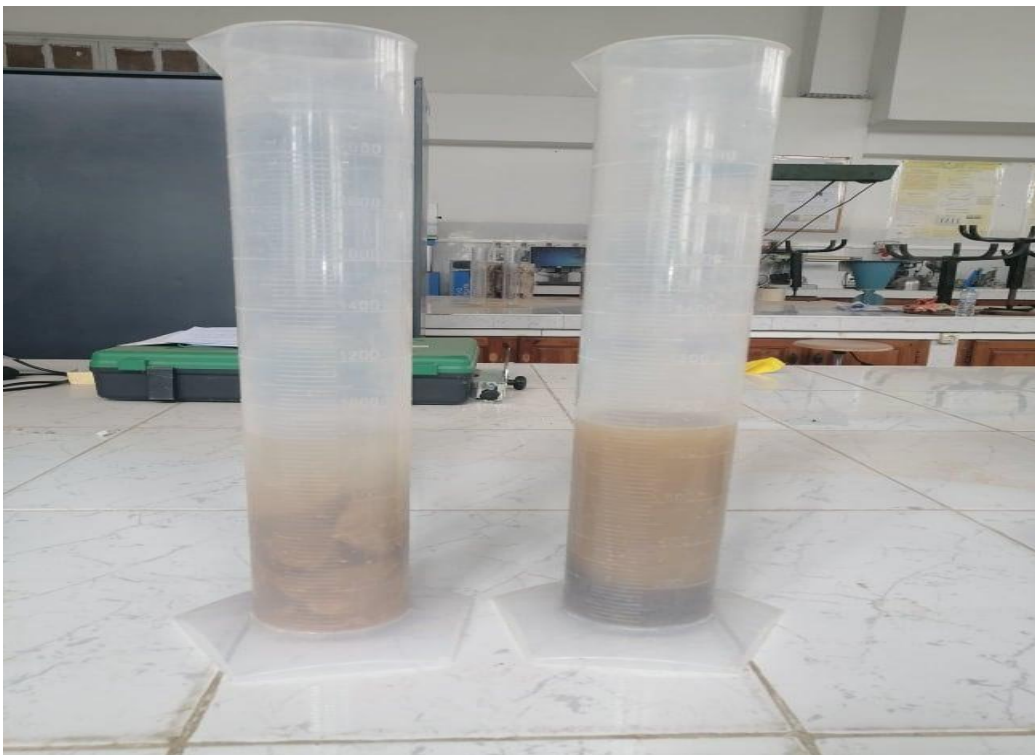


Figure III. 7: Essai de la masse volumique absolue.

Tableau III. 2: Masse volumique absolue des sables.

Pour m=0.3Kg		
Sable jaune S1	Sable lavé s2	Sable optimal
$\rho \text{ abs}[\text{kg/L}] = 2,5$	$\rho \text{ abs}[\text{kg/L}] = 3$	$\rho \text{ abs}[\text{kg/L}] = 3$

III.2.1.5 Equivalent de sable avec le piston et visuelle

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 essais est réalisé selon la norme NFP 18-597 et NFP 18-598 :

- 1-Remplir les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au 1^{er} trait ;
- 2- Verser la quantité de sable nécessaire à l'aide de l'entonnoir
- 3-Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- 4-Laisser reposer pendant 10 minutes ; A la fin de cette période de 10 minutes boucher l'éprouvette et agiter à l'aide d'une machine (90 cycles allers et retours en 30 s, en mouvement rectiligne horizontal);
- 5-Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur En descendant le tube laveur dans l'éprouvette rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette;
- 6-Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.
- 7-Laisser reposer 20 mn;
- 8-Mesurer à vue H_1 et H_2' ;
- 9- Descendre lentement le piston taré dans le liquide, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.
- 10- Immobiliser le piston au contact avec sable et mesurer H_2 .



Figure III. 8: Essai d'équivalent de sable.

Tableau III. 3: Équivalent de sable.

	ESV	ESP
Sable1	85,58%	62,08%
Sable2	93,17%	85,34%
nature et qualité de sable	les deux sables propres	sable 1: légèrement argileux de propreté admissible. sable2:sable propre.

III.2.1.6 L'absorption de sable

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 A_b est défini par la relation suivante :

$$Absorption \% = \frac{(Masse\ sature - Masse\ sec)}{masse\ sec} \times 100$$

Tableau III. 4:l'absorption des deux sables.

	masse sec(g)	masse sat (g)	absorption%
sable 1	200	207	3,5
sable2	200	207	3,5

III.2.2 Les caractéristiques des graviers

Nous avons utilisés quatre types de graviers : G3/8, G8/15, G15/25, G15/40 en provenance deHAMMAM Melouane. Les résultats sont montrés dans la figure suivante :



Figure III. 9: Graviers.

III.2.2.1 Propreté des graviers

- Conduite de l'essai :

L'essai est réalisé selon la norme NFP 18-591, il consiste à :

- 1- Peser la masse m_0 du gravier
- 2-Laver de l'échantillon
- 3- Séchage a l'étuve 105 (+5) C°
- 4-Peser la masse m_1 apres le sechage
- 5- Calculer la propreté **P**.

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

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau III. 5: la propreté des graviers.

propreté du gravier 3/8		propreté du gravier 8/15		propreté du gravier 15/25		propreté du gravier 15/40	
M0 (g)	1130,8	M0 (g)	1469,7	M0 (g)	1793,7	M0 (g)	2025,7
M1 (g)	1130,4	M1 (g)	1464,4	M1 (g)	1793,4	M1 (g)	2016,4
P(%)	0,03537319	P(%)	0,36061781	P(%)	0,0167252	P(%)	0,45910056

III.2.2.2 Analyse granulométrique par tamisage

Le résultat de l'analyse granulométrique des graviers est présenté dans les graphes suivants :

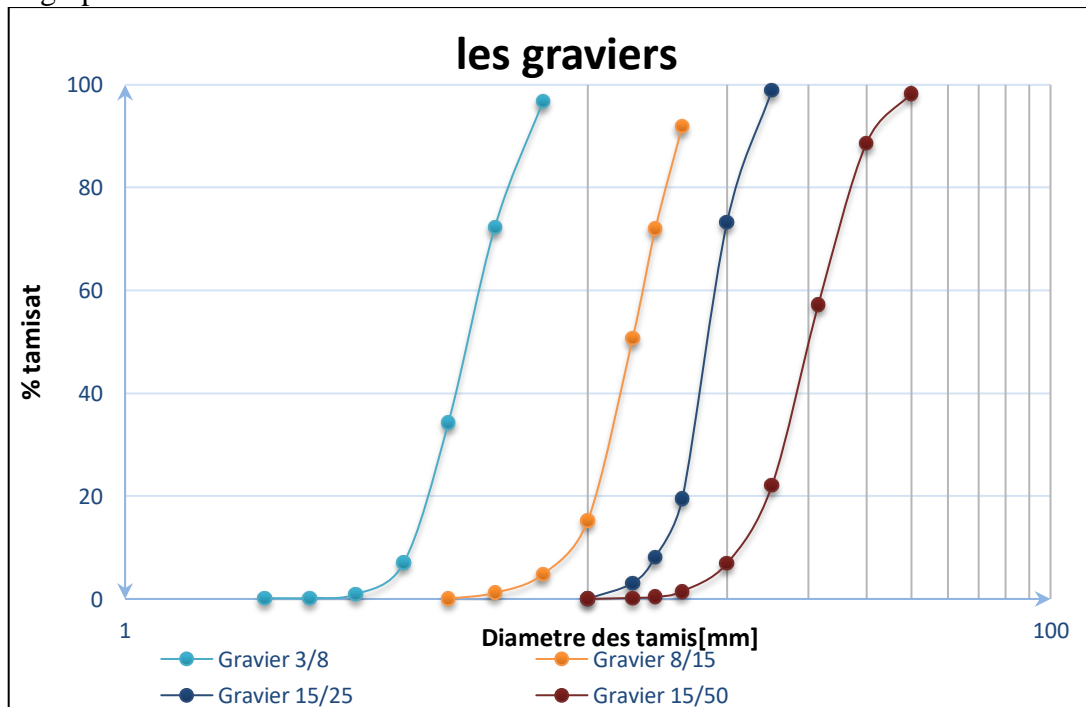


Figure III. 10: Granulométrie des graviers.

III.2.2.3 Masse volumique apparente

Tableau III. 6: la masse volumique apparente des graviers.

masse de récipient vide pour le gravier 643,2g=0,6432kg			
volume de récipient pour le gravier v=2,149L			
G3/8	G8/15	G15/25	G15/40
ρ_{app} [kg/L]=2,93538	ρ_{app} [kg/L]=3,03478	ρ_{app} [kg/L]=3,11586	ρ_{app} [kg/L]=2,6385

III.2.2.4 Masse volumique absolue

Tableau III. 7: la masse volumique absolue des graviers.

G3/8	G8/15	G15/25	G15/40
M=0,350kg	M=0,400kg	M=0,500kg	M=0,700kg
ρ_{abs} [kg/L]= 2,6388	ρ_{abs} [kg/L]= 2,8571	ρ_{abs} [kg/L]= 2,7777	ρ_{abs} [kg/L]= 2,5

III.2.2.5 L'absorption des graviers

L'essai est fait selon la norme NF P 18-554, le résultat est montré dans le tableau suivant

Tableau III. 8: L'absorption des graviers.

	Masse sec(g)	Masse sat (g)	Absorption%	
gravier3/8	600	606.1	1.01	≈ 1
gravier8/15	600	606.1	1.01	≈ 1
gravier15/25	600	606	1	
gravier15/40	1000	1004	0,4	

III.2.3 Filler de brique

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

III.2.3.1 Concassage de la brique

Le concasseur est utilisé pour réduire la taille et changer la forme des déchets de brique afin qu'ils puissent être facilement broyés.



Figure III. 11:Le concasseur.

III.2.3.2 Broyage de la brique

Après le concassage, la brique est finement broyée à l'aide d'un broyeur à boulets (le broyage est fait au niveau de laboratoire des matériaux à Saad dahleb blida département de génie civil). Après un temps de broyage de 40 min, on obtient une poudre fine avec une finesse de $4310.5 \text{ cm}^2/\text{g}$.

III.2.3.3 Analyse granulométrique par sédimentation

La sédimentométrie selon la norme NF P 94-056 complète l'analyse granulométrique par tamisage. Elle a pour but de déterminer la densité des fines particules, donc le pourcentage de ces fines afin de compléter le tracé de la courbe granulométrique.

1. Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.
2. Prendre 60 cm de défloculant et ajouter 440 cm d'eau distillée pour obtenir une solution de 500 cm^3 .
3. Diviser la solution obtenue (500 cm^3) entre les deux éprouvettes à raison de 250 cm chacune.
4. Prendre l'une des deux éprouvettes et la compléter avec de l'eau distillée. Une certaine quantité de la solution de l'éprouvette A.
5. Prendre 20g de l'échantillon.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et La formulation du BCR

6. Verser ces 20g dans le récipient de l'agitateur mécanique et verser dessus une certaine quantité de solution de l'éprouvette A.
7. Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 15min. Jusqu'à 1litre. Cette éprouvette sera appelée dorénavant l'éprouvette B (l'autre éprouvette sera nommée l'éprouvette A).
8. Verser la suspension dans l'éprouvette A (bien rincer le récipient et les ailettes pour ne pas perdre le matériau).
9. Compléter l'éprouvette A avec de l'eau distillée jusqu' à 1 litre.
10. Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel.
11. Introduire le densimètre dans la suspension et procéder aux lectures (On les appellera R.) Les temps de lecture sont: 30"; 1 min; 2min; 5min; 10min; 20min; 30 min; 40min; 60min; 80min ; 120min



Figure III. 12: Analyse granulométrique par sédimentation de la brique.

Les résultats de cet essai sont montrés dans le graphe III.13

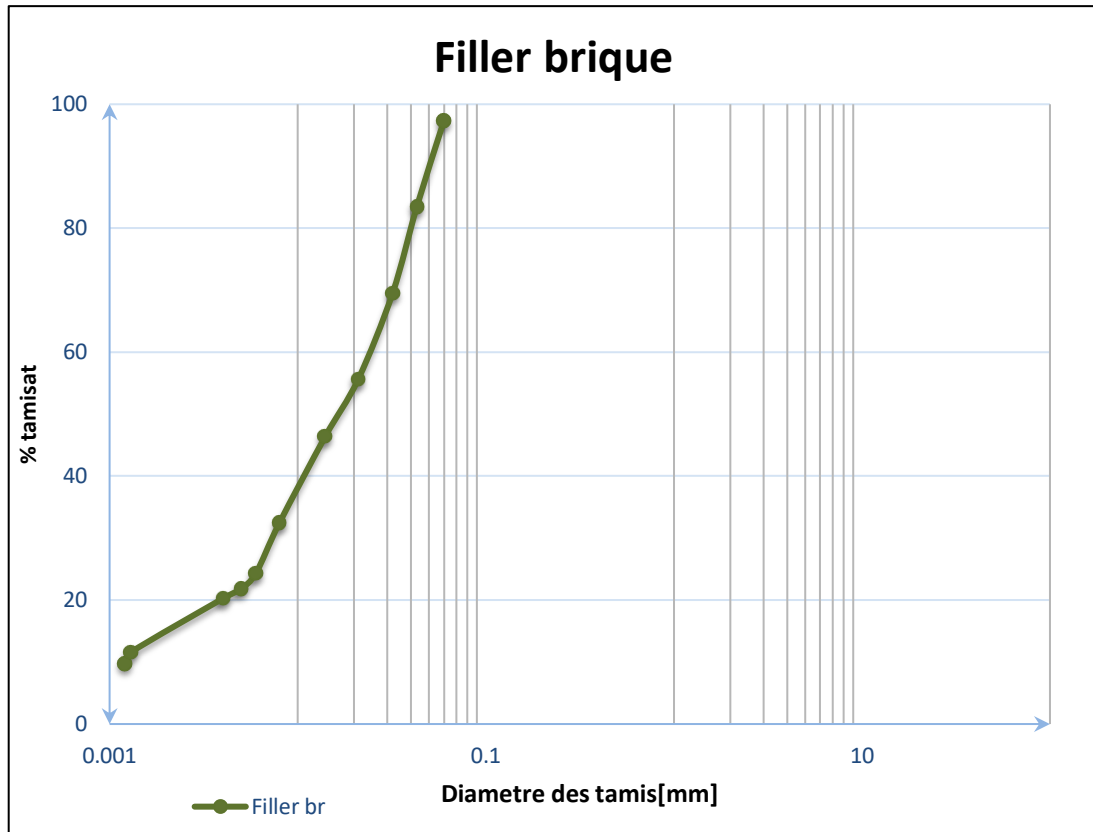


Figure III. 13: Courbe granulométrique par sédimentation de la brique.

III.2.3.4 Masse volumique apparente

Les résultats de cet essai sont montrés dans le tableau III.9 suivant

Tableau III. 9: La masse volumique apparente de la brique.

la masse volumique apparente du brique papp	
M1 (kg)	0,8585
M2(kg)	0,8513
M3(kg)	0,8385
Mmoy(kg)	0,84943
papp(kg/l)	0,84943

III.2.3.5 Masse volumique absolue

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et La formulation du BCR

La méthode du pycnomètre selon la norme NFP 18-554, a été utilisée, qui consiste à :

- Poser le pycnomètre sur la balance et faire le zéro ;
- Peser le pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère (m_1);
- Vider le pycnomètre et peser une masse (m_2) de gravier ou sable;
- Introduire le matériau dans le pycnomètre;
- Compléter le remplissage de pycnomètre avec l'eau ;
- Peser l'ensemble soit (m_3);



Figure III. 14: Essai de la masse volumique absolue de la brique.

Les résultats de cet essai sont montres dans le tableau suivant :

Tableau III. 10: Masse volumique absolue.

ρ toluene (kg/l)	0,868
M toluene (kg)	0,00999
V brique (l)	0,01151
ρ brique (kg/l)	2,1721

III.2.3.6 Absorption d'eau de la brique

Tableau III. 11: l'absorption de brique.

	masse sec(g)	masse sat (g)	absorption%
Filler de brique	200	214	7

III.2.4 Le Ciment

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

III.2.4.1 Classe vraie du ciment

Tableau III. 12:la classe vraie du ciment.

	contrainte à la traction [MPa]	Contrainte à la compression [Mpa]		
		eprouvette1	22,99	26,924
7 jours	4,715	eprouvette2	27,166	27,489
	5,404	eprouvette3	26,774	24,49
	4,715	eprouvette1	45,91	42,924
28 jours	8,44	eprouvette2	40,209	42,161
	7,064	eprouvette3	44,114	28,614
	7,321			

III.2.4.1 La masse volumique absolue

Tableau III.13 : la masse volumique absolue du ciment

Masse volumique absolue du ciment pabs			
M1= masse de pycnomètre vide(g) avec V=50ml=0,05l	33,7	0,0337	
M2= masse de pycnomètre remplie du toluène (kg)	77,1	0,0771	
M3= masse du ciment (kg)	25	0,025	
M4 = la masse de pycn+toluène+ciment (kg)	0,09411	0,09395	0,09396
$\rho_{moy}(kg/cm^3)$	2,698		

III.2.5 Filler de calcaire

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. 15: Filler calcaire.

III.2.5.1 La Masse volumique apparente

Tableau III. 13: Masse volumique apparente du calcaire.

la masse volumique apparente du calcaire ρ_{app}	
M1 (kg)	1,097
M2(kg)	1,0636
M3(kg)	1,05
Mmoy(kg)	1,0702
ρ_{app} (kg/l)	1,0702

III.2.5.2 La Masse volumique absolue

Tableau III. 14: Masse volumique absolue.

1	$\rho_{toluene}$ (kg/l)	0,868
	Mtoluene(kg)	0,01224
	Vcalcaire (l)	0,01410138
	ρ calcaire (kg/l)	1,77287582

III.2.5.3 L'analyse granulométrique

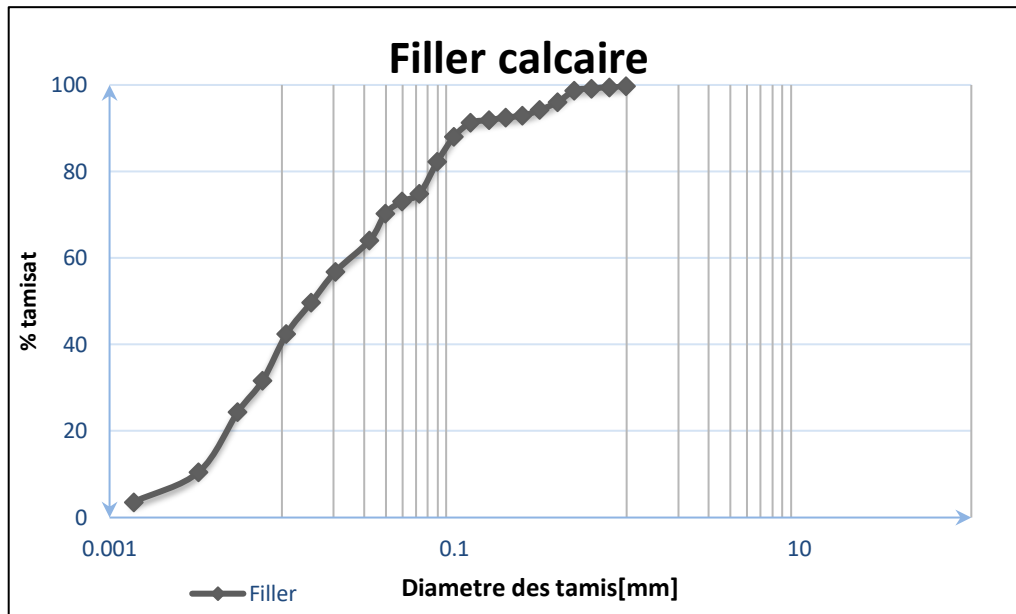


Figure III. 16:Granulométrie du filler calcaire.

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.17 a été extrait du rapport d'activité de laboratoire du barrage en BCR de Tabellout, réalisé par l'entreprise RAZEL-Bec.

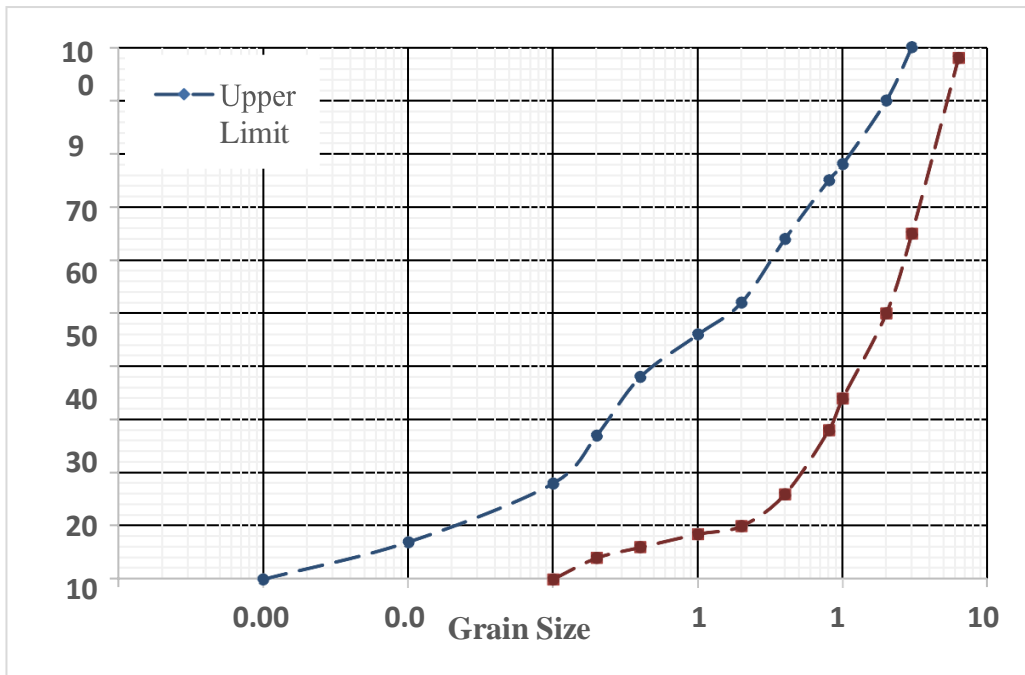


Figure III. 17: Fuseau de RAZEL.

Quatre mélanges ont été réalisés, entrant tous dans fuseau (figure III.18). 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.

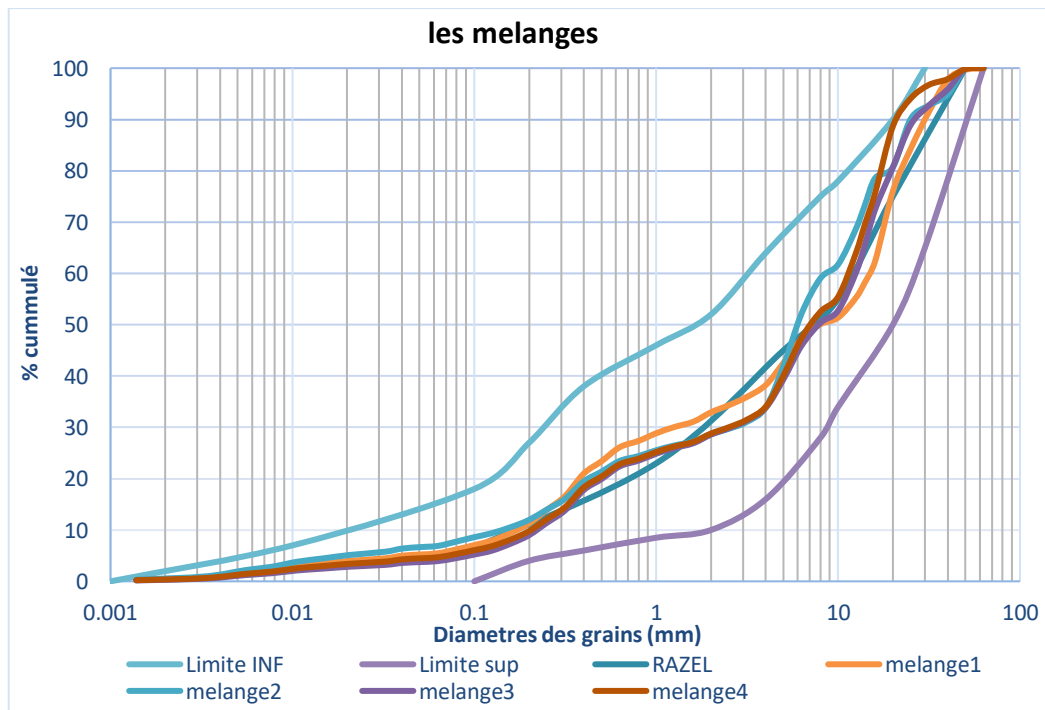


Figure III. 18: Courbes représentant la granulométrie des mélanges choisis.

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 (figure III.20 et III.21) est composé de 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.

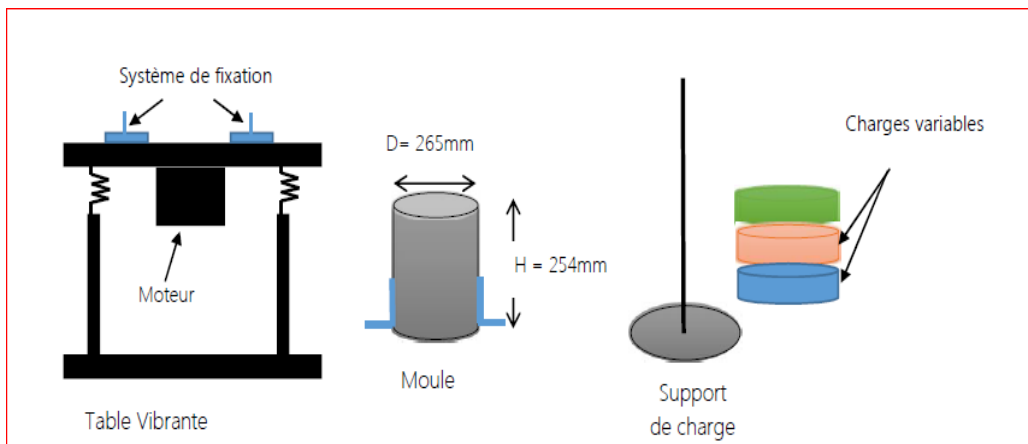


Figure III. 19: détails de l'essai.



Figure III. 20: Dispositif d'essai.

Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et La formulation du BCR

L'essai s'effectue selon les étapes suivantes:

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



Figure III. 21: L'échantillon avant l'essai et après l'essai.

La compacité est mesurée par cette méthode

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

Tel que :

V_s : Volume des solides : $V_s = S \times h = S \times (H - H_{vmoy})$

V_T Volume total tel que : $V_T = S \times H$

H : Hauteur de l'échantillon avant compactage

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

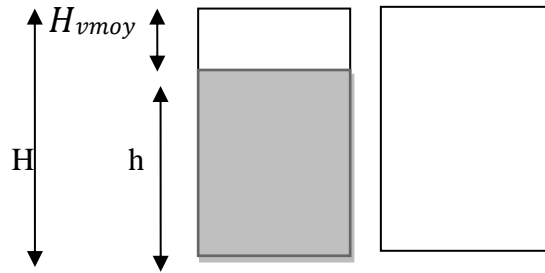
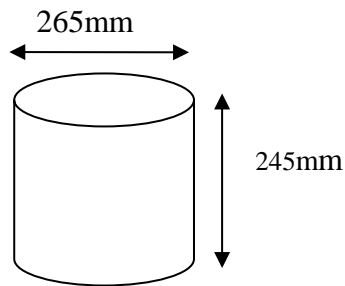


Figure III. 22: Dimensions du moule.

Figure III. 23: mesure de la hauteur H_{vmoy} .

Les résultats de calcul de la compacité sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau III. 15: les résultats de la compacité.

$H_{vmoy}[mm]$	36.73
La compacité	0.855

III.3.3 Type et dosage en ciment

Le choix du ciment a été effectué à partir de la littérature et des rapports d'activités des barrages construits [80-170 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 0.85, la formulation de base (F1, sans filler de brique) a été déterminée. En substituant le filler calcaire par (30, 60 et 100% de filler de brique, nous avons obtenu trois autres formulations (F2, F3 et F4). Ainsi les quatre formulations de BCR étudiés sont présentées dans le tableau III.16.

Tableau III. 16: un représentatif des quantités de matériaux de chaque mélange.

		100%	60%	30%	0%
		les formulations			
	Matériaux	F1	F2	F3	F4
filler	calcaire	155,61	103,66	46,683	0
	brique	0	51,95	108,927	155,61
	Sable 1 (0/3)	211,6125	211,6125	211,6125	211,6125
	Sable2 (0/5)	592,515	592,515	592,515	592,515
	G1 (3/8)	225,72	225,72	225,72	225,72
	G2(8/15)	244,53	244,53	244,53	244,53
	G3(15/25)	475,38	475,38	475,38	475,38
	G4(25/40)	427,5	427,5	427,5	427,5
	Ciment	120	120	120	120
	Adjuvant	1,44	1,44	1,44	1,44
	Eau	102	102	102	102

III.3.5 Caractérisation du BCR a l'état frais

III.3.5.1 L'essai de VEBE

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



Figure III. 24: L'essai de VEBE.

-Appareillage

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

charge pour déterminer la masse totale de l'échantillon et du moule

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

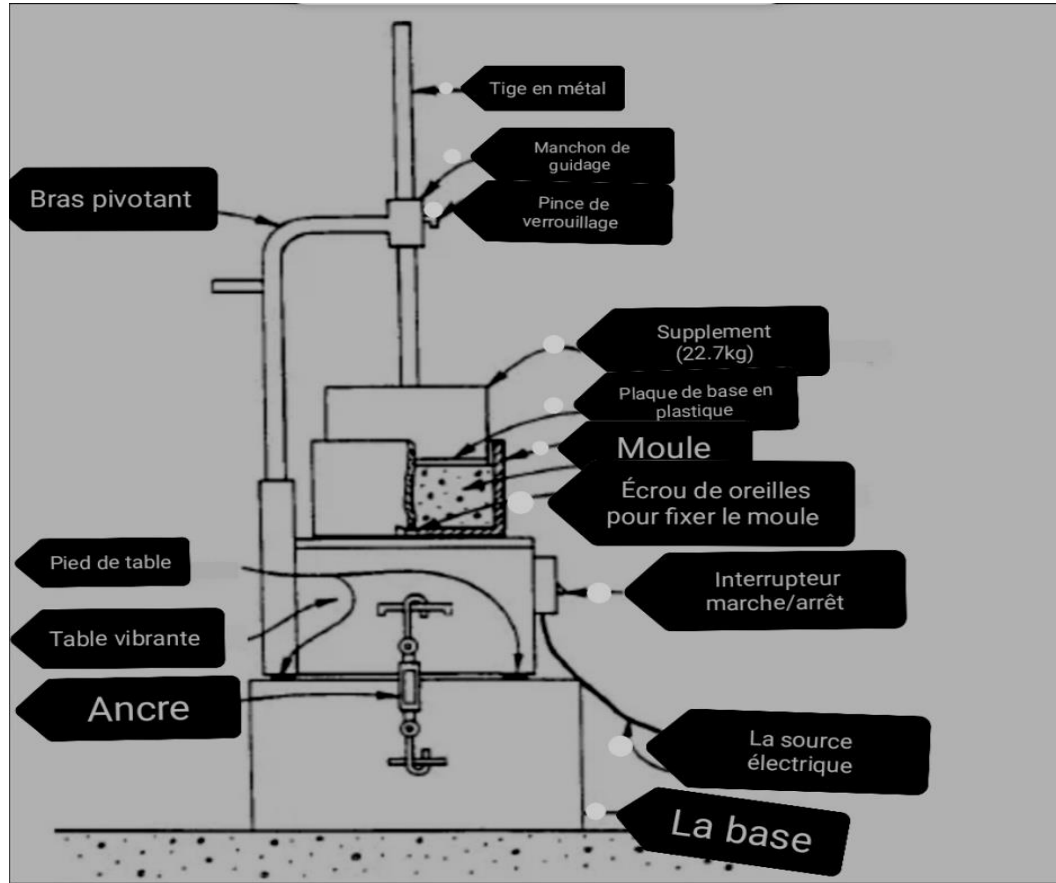


Figure III. 25: Le dispositif de l'essai.

-Procédure de l'essai

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

- 1- prélever un échantillon représentatif d'une masse minimale de (22,7 kg), et Manipuler le béton de façon à ce que ce que les granulats grossiers ne se séparent pas du mortier.
- 2- Humecter l'intérieur du moule et le remplir de (13,4 = 0,7 kg) de béton, placez et distribuez le béton de façon uniformément le béton afin de minimiser la ségrégation et les poches de roche. Nivelez la surface du béton meuble.
- 3-Fixez le moule sur la table de Vebe en serrant à la main les écrous à oreilles. Faites glisser l'arbre de la masse de surcharge à travers le manchon de guidage,

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

4- 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.

III.3.5.2 La masse volumique

L'essai de La masse volumique du BCR est réalisé selon la norme ASTM C1170, en suivant les étapes suivantes :

- 1- 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.
- 2- 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
- 5- déterminer la masse totale de ce qui suit du moule cylindrique, de l'éprouvette consolidée, et de la plaque plate.
- 7- Déterminer le volume de l'éprouvette

III.3.5.3 La mise en place des éprouvettes

-Méthode de confection par compactage au marteau vibrant :

Le compactage des éprouvettes de BCR est fait selon la norme NF EN 13286-51 à l'aide d'un marteau vibrant. C'est un appareil servant à compacter le BCR et qui est muni des plaques d'aciers qui ont une superficie légèrement inférieures à celles des moules cylindriques et cubiques.

La mise en place du BCR se fait en couche, deux pour les moules cubiques et trois pour cylindriques qui sont préalablement huilés. Chaque couche de BCR est compactée jusqu'au refus une minute est suffisante. Comme on peut le voir dans la figure III.26



Figure III. 26: Marteau vibrant et Les tige de compactage.

III.3.6 Caractérisation du BCR a l'état durci

III.3.6.1 Résistance a la compression

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

III.3.6.2 absorption capillaire

Dans cet essai, des blocs de BCR de 150x150 mm sont préparés. Après leur conditionnement en chambre humide (95% HR et T 20°C) pendant la période de maturation étudiée (28 jours), Les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée pendant un minimum de 7 jours à 45°C, jusqu'à masse constante. Une hauteur de 1 cm de la surface latérale des éprouvettes a été enduite par de la résine, pour permettre une pénétration d'eau unidirectionnelle.

-Conduite de l'essai

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

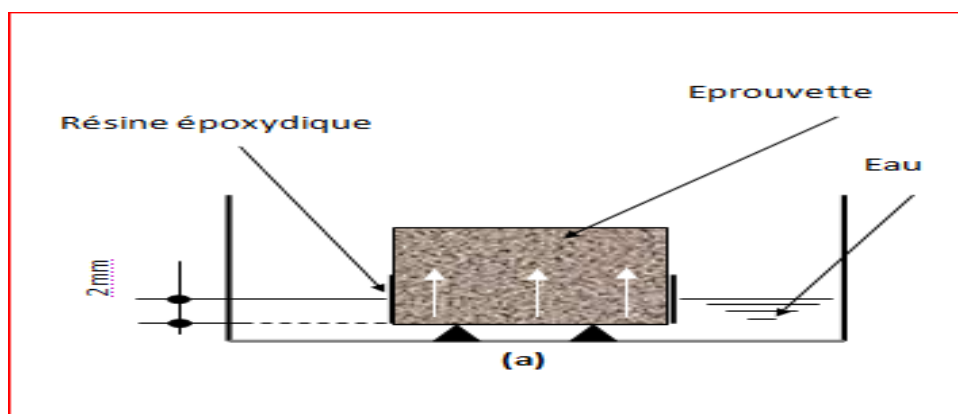


Figure III. 27: Schéma (a) et vue d'ensemble du dispositif d'essai de

L'absorption D'eau par capillarité.

-Coefficient d'absorption

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

$$Ca_t = \frac{M_t - M_o}{A}$$

L'absorption d'eau Ca_t est proportionnelle à la racine carrée du temps. De ce fait, un coefficient d'absorption S est déterminé par régression linéaire de l'ensemble des mesures se trouvant dans le domaine d'évolution linéaire de l'absorption Ca_t , le plus souvent entre 1 et 4 heures.

Ce coefficient indique la tendance de l'éprouvette à s'imprégner d'eau par action capillaire, sans aucune pression extérieure.

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

III.3.6.3 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation de la durabilité .Elle est déterminée par l'absorption d'eau par immersion, qui est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. Dans cet essai, huit éprouvettes cubiques 150×150 mm séchés dans l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante (variation de 0,1% après 24h). Ainsi la masse sèche " M_{sec} " de l'échantillon est déterminée

Pour obtenir *la porosité accessible à l'eau par immersion* " P_w ", les échantillons ont été immergés dans l'eau jusqu'à saturation (variation en masse de 0,1% après 24 h) selon la norme NBN B 15-215 et sont pesés dans l'air " M_{airsat} " et dans l'eau " M_{eausat} ". On définit P_w comme étant la porosité ouverte du matériau.

- la porosité P_w est calculée comme suit :

$$P_w = \frac{M_{airsat} - M_{sec}}{M_{airsat} - M_{eausat}} \times 100 \quad (\%)$$

III.3.6.4 Conductivité thermique

- Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes cylindriques (\varnothing 160 mm, H 320 mm) sont coupées en 4 petits cylindres (\varnothing 160mm, H 70 mm) et surfacées pour rendre leurs bases planes et perpendiculaires par rapport à la hauteur. Cette planéité a été obtenue à l'aide de la machine de surfacage, Après la rectification, les éprouvettes sont séchées dans une étuve à $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ et prêtes pour l'essai de la conductivité à l'âge 14 et 28 jours.

Mesure de la conductivité thermique :

L'essai se fait selon la norme NF EN 993-15 et EN 1745, avec Le CT-METRE qui est élaboré dans le but d'évaluer avec précision les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux homogènes et isotropes. Il se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et des sondes (anneau et fil) chargées de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température et chaque sondes permet de réaliser une mesure (l'anneau donne la conductivité thermique et la chaleur spécifique et le fil donne la conductivité seulement).



Figure III. 28: Appareils CT-mètre utilisé.

III.4 Programme expérimental

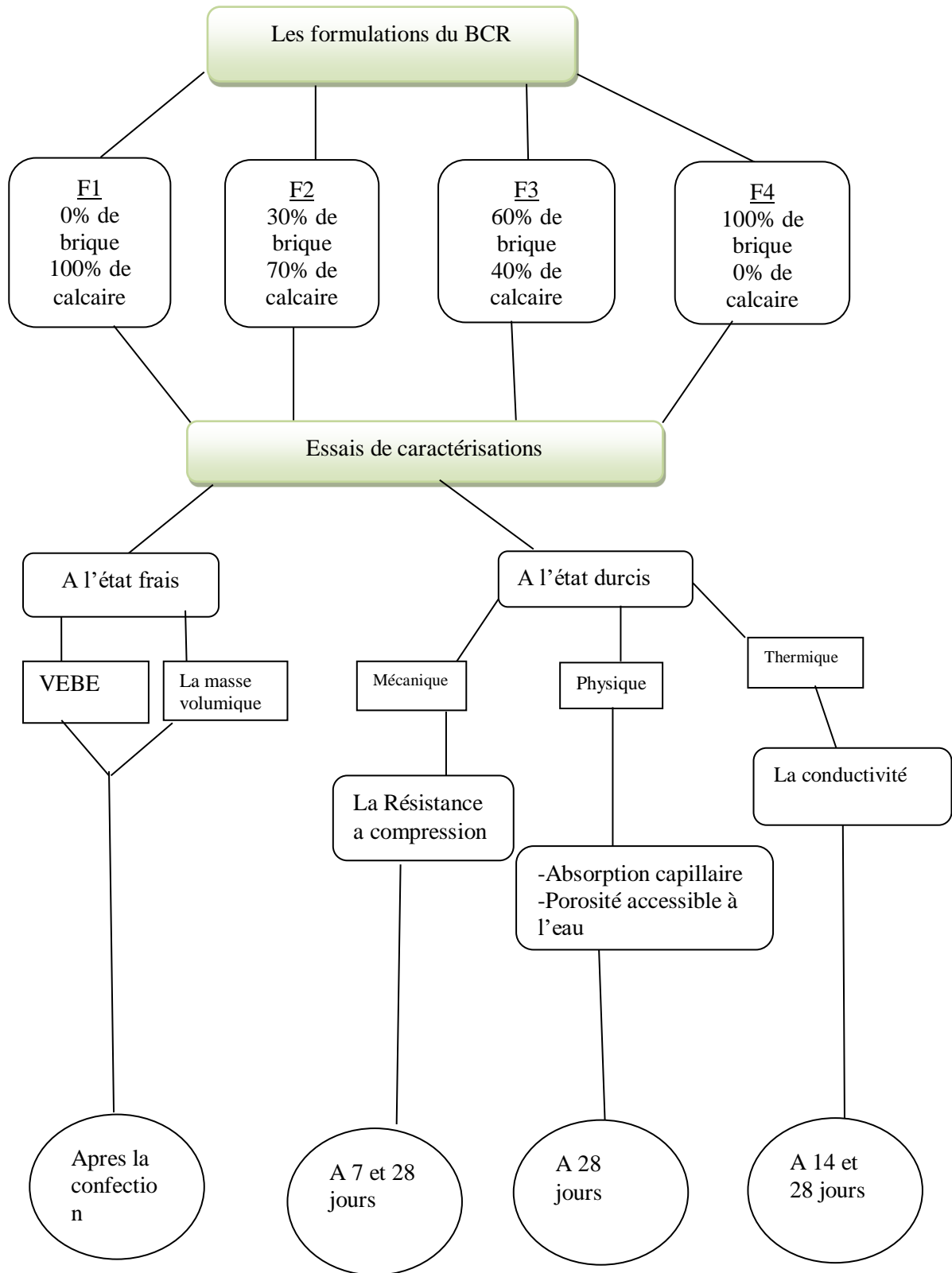


Figure III. 29: Le programme expérimental réalisé.

Chapitre VI
Analyse et Interprétation Des
Résultats

IV.1 Introduction

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

IV.2 Résultats

IV.2.1 A l'état frais

IV.2.1.1 Temps de VEBE

Les résultats d'ouvrabilité des BCR formulés sont présentés dans le tableau IV.1 et le graphe IV.1

Afin de mieux comprendre l'effet de substitution de brique sur l'ouvrabilité à travers différents pourcentages, on remarque une augmentation relativement faible dans la maniabilité des mélanges F2, F3, F4 qui sont respectivement 4,88% ,5.07% et 5.25% par rapport au BCR de référence F1.

Autrement dit, en augmentant le taux de substitution, tout en gardant le même rapport E/C =0.85, le temps VEBE reste peu variable. Cette variation peut être attribuée à la forme ainsi que le taux d'absorption des particules de brique. En effet, la brique est de forme angulaire contrairement au calcaire et absorbe beaucoup plus d'eau, ce qui mène de la perte de maniabilité des mélanges. Il est toutefois à noter que l'effet de perte de maniabilité, due à une grande absorption d'eau de la brique a été relativement atténué par la quantité d'eau ajoutée dans les formulations F2, F3 et F4, composant ainsi l'eau absorbée par la brique.

Tableau IV. 1: le Temps de VEBE des mélanges réalisés.

Mélanges	F1	F2	F3	F4
Substitutions [%]	0	30	60	100
VEBE[s]	21,7	22,5	23,4	24,2

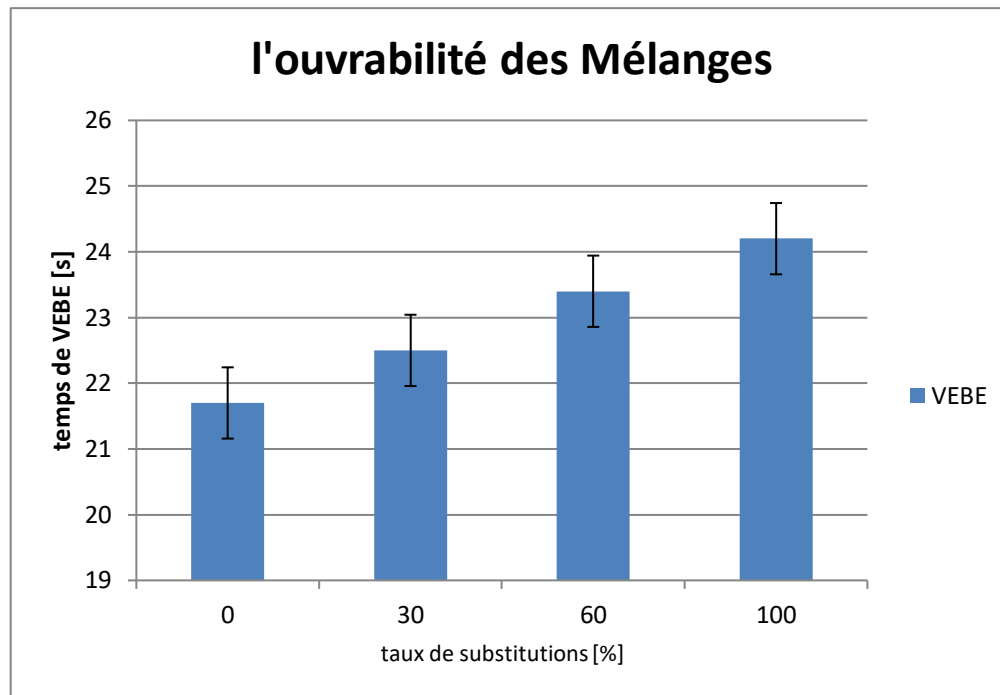


Figure IV. 1: Temps de VEBE en fonction de taux de substitution.

IV.2.1.2 La masse volumique

Les résultats de la masse volumique des BCR formulés sont présentés dans le tableau IV.2 et le graphe I.V.2

On constate une légère augmentation de la masse volumique des mélanges BCR F2, F3, F4 qui sont respectivement 1%, 2%, 2,5% par rapport au BCR de référence F1.

Pour un même rapport E/C et en augmentant progressivement le taux de substitution, la masse volumique reste peu variable. Cela est expliqué par la densité des granulats et la quantité des vides influents grandement sur la masse volumique. Les BCR contiennent très peu de vide comparé aux bétons ordinaires mais en revanche, ils ont une quantité considérable des matières solides.

Tableau IV. 2: La masse volumique des mélanges réalisés.

mélanges	F1	F2	F3	F4
substitutions %	0	30	60	100
Masse volumique [kg/m ³]	2134,375	2231,052	2336,033	2394,081

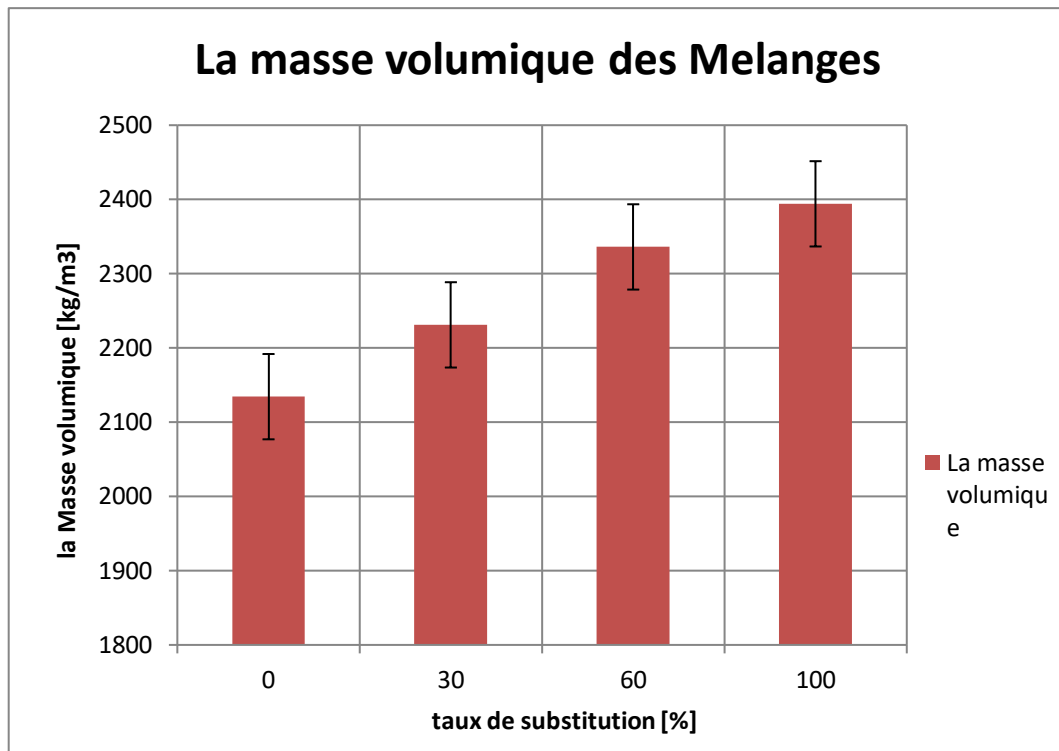


Figure IV. 2: La masse volumique en fonction de taux de substitution.

IV.2.2 A l'état durcis

IV.2.2.1 Résistance à la compression

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

A jeune âge (7 jours), les résultats montrent une relative faible influence de la substitution de 30 et de 60% de brique sur la résistance à la compression. En effet, la différence demeure faible et varie entre 6 et 9%. Par contre une diminution importante de résistance (d'environ 43%) est enregistrée pour le BCR avec 100% de fillers de brique par rapport au BCR sans brique.

Après 28 jours de cure humide on constate une augmentation de la résistance de tous les BCR par rapport à 7 jours d'âge. Ceci est dû à l'hydratation continue du ciment avec le temps.

Les mélanges de BCR sans et avec 60% de brique ont des résistances comparables (18,33 et 18 MPa). Le BCR avec 30% de brique a enregistré quant à lui une augmentation de la résistance de 33% par rapport au BCR témoin. Enfin le BCR avec 100% de brique a eu la plus faible résistance à la compression (15,55 MPa) marquant une diminution d'environ 17% par rapport au BCR sans brique. Il est à noter que cette diminution est relativement faible par rapport à celle enregistrée à 7 jours (qui été de 43%).

Tableau IV. 3: Résistance à la compression des mélanges réalisés.

		la résistance à la compression [MPa]			
		7jrs		28jrs	
F1	18,888	Rcmoy=17	18,888	Rcmoy=18,33	
	15,111		17,777		
F2	15,555	Rcmoy=16	24,444	Rcmoy=24,44	
	16,444		24,444		
F3	18,888	Rcmoy=18,55	18,222	Rcmoy=18	
	18,222		17,777		
F4	8,888	Rcmoy=9,77	15,55	Rcmoy=15,55	
	10,666		15,55		

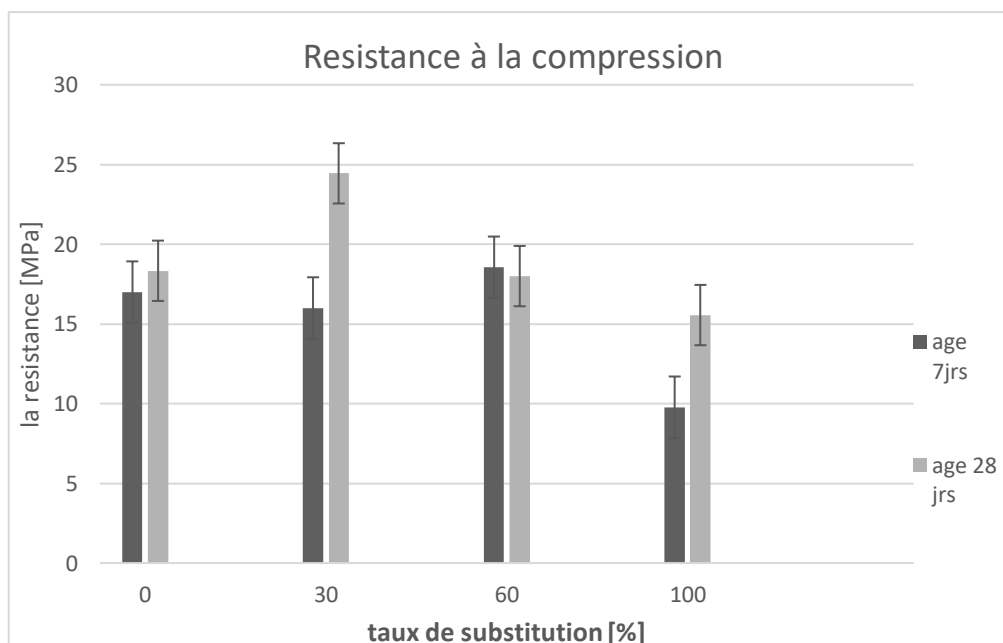


Figure IV. 3: Résistance à la compression en fonction de taux de substitution.

IV.2.2.2 Conductivité thermique

Les résultats de la conductivité thermique des BCR formulés sont présentés dans le tableau IV.4 et le figure IV.4

Les résultats de la conductivité thermique après 14 jours, montrent que plus le taux de substitution de fines de brique augmente plus la conductivité thermique diminue. La diminution de la conductivité pour les F2, F3 et F4 comparé au BCR témoin F1, est respectivement de 6.15%, 13.9% et de 53.18%. Après 28 jours de cure, la même tendance est observée : une diminution proportionnelle de la conductivité avec l’augmentant le taux de substitution. La diminution est de l’ordre de 9.80 %, 13.55 % et 48.90% pour les F2, F3 et F4 respectivement, par rapport au BCR témoin.

En effet la conductivité dépend étroitement de la densité et de la présence des pores. Les mélanges contenant des taux de briques élevés présentent une porosité plus importante cela revient à la microstructure des particules de briques. Ces pores tachent a emmagasiner la chaleur cela explique la baisse de conductivité à court terme et à long terme. Cette effet est plus prononcé pour les BCR avec 100% de filler de brique.

Tableau IV. 4: La conductivité thermique des mélanges réalisés A 7 et 28 jours.

la conductivité thermique [w/m,k]			
	14 jours	28 jours	
F1	3,382	2,6176	Cmoy=2,6197
		2,6218	
F2	3,177	2,381	Cmoy=2,3632
		2,3454	
F3	2,91	2,273	Cmoy=2,2645
		2,256	
F4	1,5833	1,3484	Cmoy=1,3388
		1,3292	

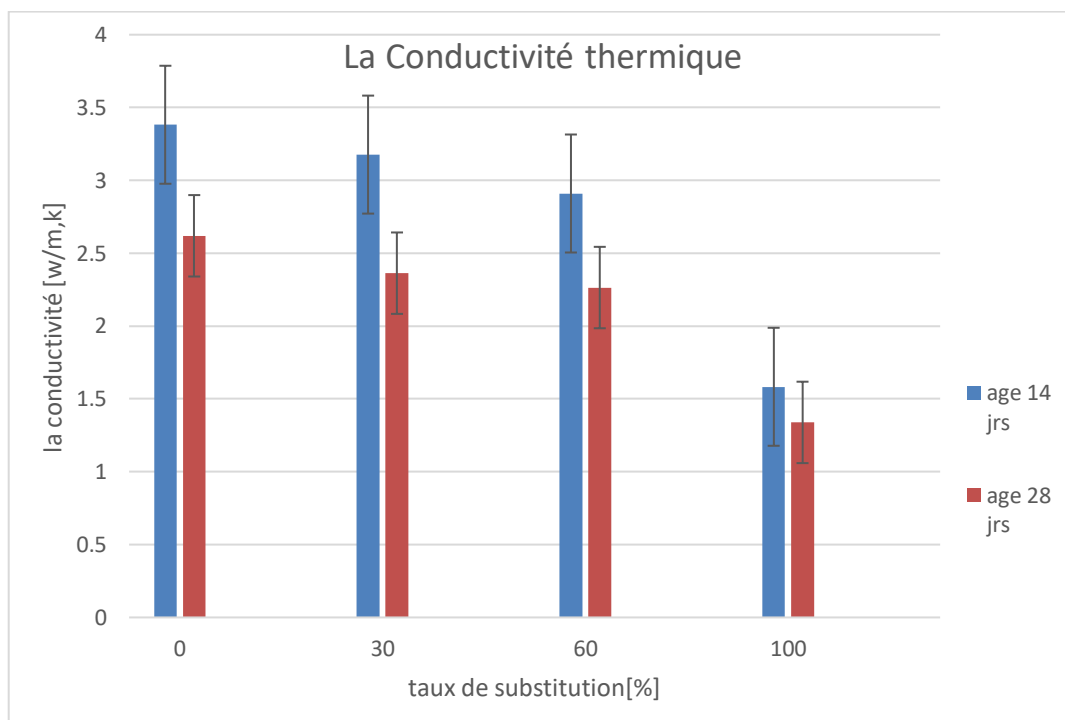


Figure IV. 4: Conductivité thermique des mélanges réalisés à 14 et 28 jours.

IV.2.2.3 Absorption capillaire

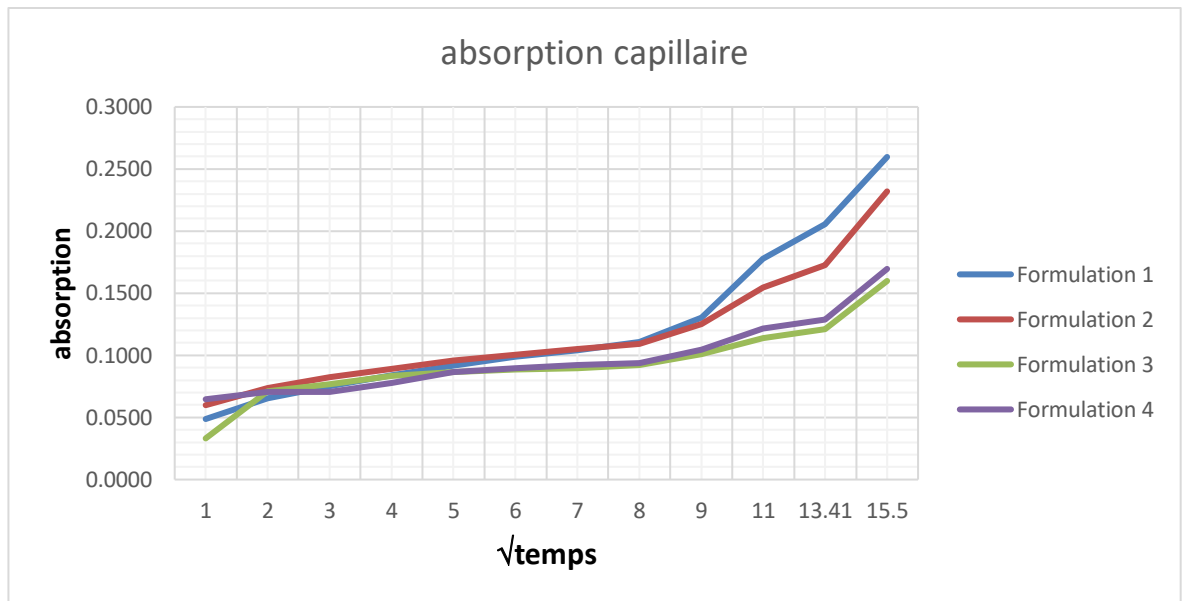


Figure IV. 5: L'absorption capillaire du BCR de Reference.

Les résultats de L'absorption capillaire des BCR formulés sont présentés dans la figure IV. 5,

On constate les mêmes tendances est observée dans tous les graphes en comparant les formulations F2, F3, F4 avec la Formulation de référence F 1, une augmentation de L'absorption capillaire en fonction du temps. Cela a une relation avec les pores capillaires du béton.

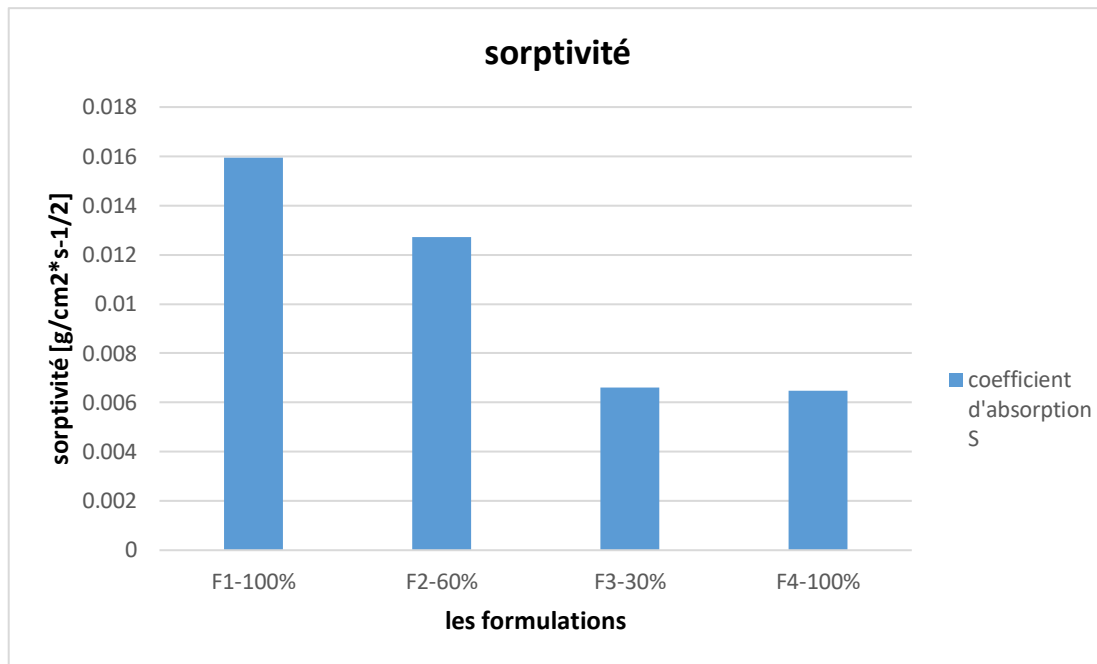


Figure IV. 6: La Sportivité des formulations.

Les résultats de La Sportivité sont présentés dans la figure IV.6 et le tableau IV.5.

On constate une diminution de la Sportivité des mélanges BCR F2, F3, F4 qui sont respectivement 79.35%, 41.31% , 40.63% par rapport au BCR de référence F1.

En augmentant progressivement le taux de substitution, La Sportivité diminue cela signifie que notre béton a besoin d'une pression pour que l'eau pénètre dans le béton.

IV.2.2.4 Porosité accessible à l'eau

Tableau IV. 5: La Porosité accessible à des formulations réalisées.

	F1		F2		F3		F4	
	0%		30%		60%		100%	
M0(sec) [g]	3503	4387,5	3763,3	3341,7	2606,4	2769,6	3414,4	5204,3
Msat air	3682,74	4593,72	3928,5	3506,27	2707,55	2879,74	3531,29	5341,25
Msat eau	2450,25	2990,2	2597,8	2149,8	1785,6	1809,47	2469,03	4107,9
Msat air-M0	179,74	206,22	165,2	164,57	101,15	110,14	116,89	136,95
Msat air-Msat eau	1232,49	1603,52	1330,7	1356,47	921,95	1070,27	1062,26	1233,35
Porosité a l'eau	14,5834855	12,860457	12,4145187	12,1322256	10,9713108	10,2908612	11,0038974	11,103904
la porosité moy	13,72197123		12,27337212		10,631086		11,05390068	

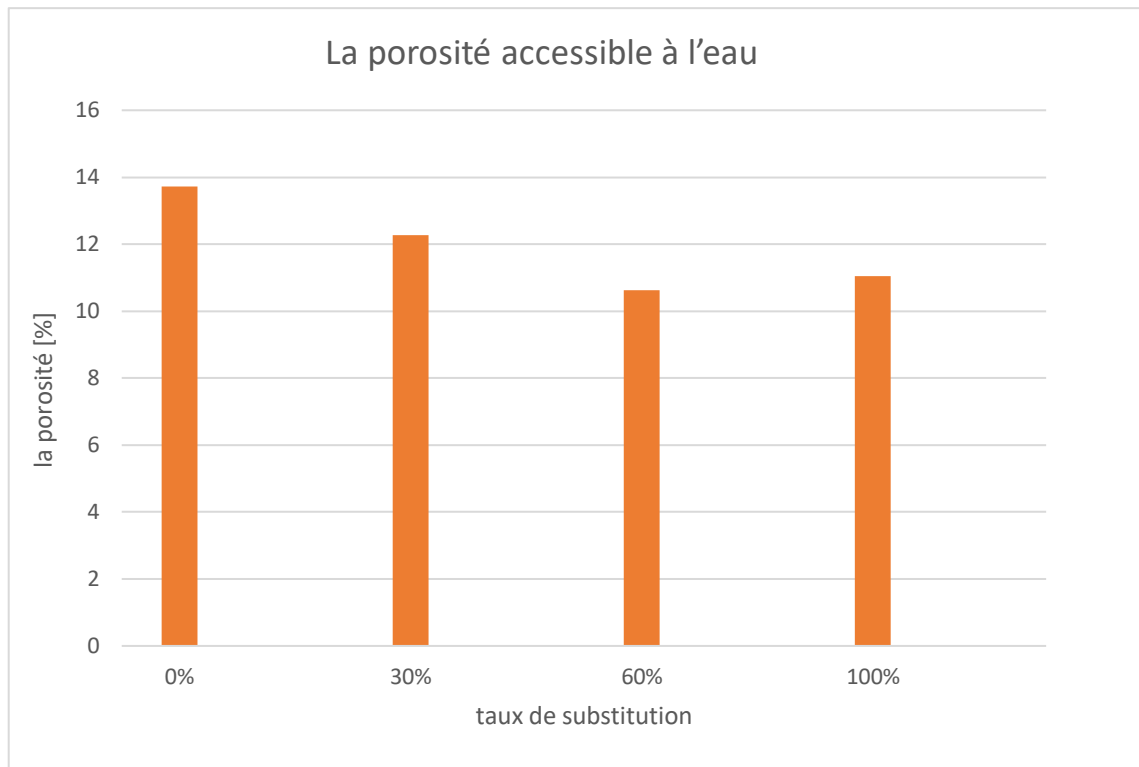


Figure IV. 7: La Porosité accessible à des formulations réalisées.

Les résultats de La porosité sont présentés dans la figure IV.10 et le tableau IV.10.

On constate une diminution de la porosité des mélanges BCR F2, F3, qui sont respectivement 89.43%, 77.47% par rapport au BCR de référence F1 par contre en constate une légère augmentation de la porosité avec le taux de substitution 100% (F4) de brique qui est respectivement 80.53%.

Cette diminution est reliée à l'activité puzzolanique entre les fillers de brique et le ciment qui a diminué le diamètre des pores.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du remplacement des fillers calcaire d'un mélange de BCR par des fillers de brique. Les résultats obtenus montrent que les propriétés du BCR ont été affectées suite à l'introduction de la brique, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence des fillers de brique et en augmentant les taux de substitution avec le même rapport E/C =0.85 le temps VEBE et la masse volumique sont peu variables. Le Temps VEBE des BCR étudiés rentre bien dans la gamme des BCR pour barrage.

L'incorporation des fillers de brique affecte peu les propriétés mécaniques du BCR jusqu'à un taux de 60 % de brique. Pas contre 100 % de fillers de brique affaiblissent la résistance à la compression du BCR.

Les fillers de brique affectent l'absorption Capillaire et la sportivité ainsi que la porosité, on a constaté une augmentation de l'absorption qui a été accompagné par une diminution de la sportivité et la porosité

Une diminution de la conductivité thermique est remarquée en augmentant le taux de substitution de la brique. Cela est dû à la à l'augmentation de la porosité du BCR en présence de la brique. Plus la conductivité thermique est élevé plus le BCR est conducteur de chaleur et plus elle est faible plus il est isolant.

Conclusion Générale

Le BCR est un matériau performant, économique et durable. Pour un mélange de BCR, sa qualité en tant que matériaux ainsi que la qualité de sa mise en œuvre sont les éléments clé de son comportement à l'état durcis. De nombreuses méthodes de formulation sont applicables aux BCR (empirique, semi empirique ou théorique). Il est toutefois nécessaire à préciser que ces propriétés (mécaniques, physiques ou thermiques) sont très sensibles à sa composition (type de ciment et d'addition et dosage).

Le recyclage des déchets de brique est devenu une bonne solution qui peut donner des ressources renouvelables et durables qui contribuent au processus de construction dans le domaine du génie civil. Les recherches ont confirmé qu'il est possible de fabriquer des bétons à base des déchets de briques malgré la défaillance mécanique de ses derniers. La brique entraîne des changements de comportement du mélange hydraulique. Pour les particules très fines une augmentation de la surface spécifique signifie une augmentation de la demande en eau et donc une mauvaise maniabilité. La finesse des particules joue un rôle dans le développement des résistances mécaniques si celle s'il est remplacé par une forme plus proche de celui des agrégats naturels, Cependant on augmentant le taux de substitutions cela réduis la résistance, en revanche la fine de brique a un Effet positif sur la résistance thermique.

Notre approche expérimentale a été effectuée pour étudier l'effet de l'incorporation des fillers de briques comme substitution des fillers calcaires sur les propriétés mécaniques, thermiques et d'étanchéités. Les pourcentages de fillers de briques utilisés sont : 0%, 30%, 60% et 100% Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- En présence des fillers de brique et en augmentant les taux de substitution avec le même rapport $E/C = 0.85$ le temps VEBE et la masse volumique sont peu variables. Le Temps VEBE des BCR étudiés rentre bien dans la gamme des BCR pour barrage.
- L'incorporation des fillers de brique affecte peu les propriétés mécaniques du BCR jusqu'à un taux de 60 % de brique. Pas contre 100 % de fillers de brique affaiblissent la résistance à la compression du BCR.
- Les fillers de brique affectent l'absorption Capillaire et la sportivité ainsi que la porosité, on a constaté une augmentation de l'absorption qui a été accompagné par une diminution de la sportivité et la porosité.
- Une diminution de la conductivité thermique est remarquée en augmentant le taux de substitution de la brique. Cela est dû à la à l'augmentation de la porosité du BCR en présence de la brique. Plus la conductivité thermique est élevé plus le BCR est conducteur de chaleur et plus elle est faible plus il est isolant.

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

raisonnables et étudiées dans la composition des BCR, en prenant en compte l'absorption d'eau de la brique.

Liste des Références

- [1] A. B. D. E. M. Locaux, "FORMULATION ET ETUDE D ' UN BETON DE ROUTE."
- [2] N. M. I. Ochiai, Eiji; Sachiko, Suzuki; Yoichi Utsunomiya; Taichi, Ohmoto; Kisuke, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title," *Sunday Indep.*, vol. 80, pp. 339–344, 1960.
- [3] A. A. U. T. Diamniadio-mbour, "Ge 485 ," 2007.
- [4] T. Permanent, "Béton Compacté Au Rouleau Raller Compacted Concrete," pp. 47–53.
- [5] "Béton p rovincial," 1960.
- [6] A. B. D. E. M. Locaux, "Publication List Book Contents," *Concrete*.
- [7] A. U. Rouleau, P. A. R. Addition, D. E. C. D. E. Ciment, and D. Un, "D'un de de par de de &lange," 1996.
- [8] M. D. E. Master, "Dédicace," 2014.²
- [9] D. U. D. D. E. Maîtrise, "National Library of Canada to," *Glass*, no. October, 1998.
- [10] ZDIRI, "L ' Université de Tunis El Manar (Tunisie) L ' Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai Mustapha ZDIRI Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisement," 2008.
- [11] B. Pilon, "Et durabilite," 1998.
- [12] T. P. Dolen and F. Y. Abdo, "Roller-compacted concrete for dam safety modifications," *Brazilian Int. RCC Symp.*, 2008, [Online]. Available: <http://www.ibracon.org.br/eventos/50cbc/RCC/Dolen-Abdo-USA-RCC-Dam-safety-modifications.pdf>.
- [13] M. Löfsjögård, "Functional Properties of Concrete Roads – Development of an Optimisation Model and Studies on Road Lighting Design and Joint Performance Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology," 2003.
- [14] "Frost Durability of Frost Durability of."
- [15] S. Aissa, "Etude du comportement d'un béton compacté au Rouleau (BCR) à base des granulats recyclés.," 2018.
- [16] F. Der Zementindustrie, *Verein Deutscher Zementwerke e.V. 125 Jahre Forschung für Qualität und Fortschritt.* .
- [17] E. Betons, "Zusatzstoffe auf die Dichtigkeit gegenüber organischen Flüssigkeiten und auf weitere."
- [18] K. Hermann, "Les ajouts : les fillers," *Bull. du Cim.*, vol. 63, 1995.
- [19] A. I. T. Ahmed, "Le béton compacté au rouleau (BCR) à base de filler calcaire et ciment," 2019.
- [20] U. Mohamed, E. E. L. Ibrahim, and B. Bou, "Etude de l ' influence des ajouts minéraux sur le comportement physico- mécanique des BCR a base des granulats recyclés."
- [21] "NQ80273.pdf." .
- [22] D. E. S. Facult *et al.*, "Valorisation des granulats de béton recyclé et des granulats de verre recyclé dans les pavages industriels en béton compacté au rouleau," 2016.
- [23] P. Rheologiques, E. T. Mecaniques, D. U. Beton, C. Au, J. Paul, and O. Mba, "Universite de sherbrooke," 1997.

- [24] D. Walid, L. Nordine, K. Abdelhafid, and O. Mohammed, "L'EFFET DES FILLERS CALCAIRE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET L'ABSORPTION CAPILLAIRE DU BÉTON Constituants K_2O MgO So_3 LOI Ciment (%) Fillers calcaire Masse volumique Surface spécifique de Début de prise (min) Béton Ciment E / L Fillers Ci," no. December 2017, 2016.
- [25] B. E. N. A. L. I. Alaeddine, "Remerciements Au terme de ce travail ," 2019.
- [26] E. G. Civil, "Remerciements," 2017.
- [27] T. Pavlu, K. Fortova, J. Divis, and P. Hajek, "The utilization of recycled masonry aggregate and recycled EPS for concrete blocks for mortarless masonry," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2019, doi: 10.3390/ma12121923.
- [28] E. H. Kadri, S. Kenai, K. Ezziane, R. Siddique, and G. De Schutter, "Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar," *Appl. Clay Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 704–708, 2011, doi: 10.1016/j.clay.2011.06.008.
- [29] T. Kibriya and L. Tahir, "Use of Masonry Construction & Demolition Waste in Concrete," *World J. Eng. Technol.*, vol. 05, no. 02, pp. 216–231, 2017, doi: 10.4236/wjet.2017.52017.
- [30] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, and R. Degeimbre, "Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 6, pp. 421–426, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004.
- [31] J. M. Moreno-maroto and J. Alonso-azcarate, "Applied Clay Science What is clay ? A new definition of ' clay ' based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems," *Appl. Clay Sci.*, vol. 161, no. November 2017, pp. 57–63, 2018, doi: 10.1016/j.clay.2018.04.011.
- [32] D. Righi, B. Velde, and A. Meunier, "Clay stability in clay-dominated soil systems," *Clay Miner.*, vol. 30, no. 1, pp. 45–54, 1995, doi: 10.1180/claymin.1995.030.1.05.
- [33] L. Horckmans, P. Nielsen, P. Dierckx, and A. Ducastel, "Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 140, pp. 297–304, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.025.
- [34] S. A. Testoni, J. A. De Almeida, and L. Silva, "Clay Mineralogy of Brazilian Oxisols with Shrinkage Properties," pp. 1–16, 2017.
- [35] S. Jafari, J. G. Rots, and R. Esposito, "Core testing method to assess nonlinear shear-sliding behaviour of brick-mortar interfaces: A comparative experimental study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, p. 118236, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118236.
- [36] (O.) (Buchsenschutz) and O. Buchsenschutz, "Fabrication de la céramique," *des Gaulois aux Gall.*, pp. 149–159.
- [37] M. Charai, H. Sghiouri, A. Mezrhab, M. Karkri, and K. El Hammouti, "Comparative study of a clay before and after fired brick-making process," in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 31, pp. S103–S108, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.250.
- [38] V. A. Drits, G. Besson, and F. Muller, "An improved model for structural transformations of heat-treated aluminous dioctahedral 2:1 layer silicates," *Clays Clay Miner.*, vol. 43, no. 6, pp. 718–731, 1995, doi: 10.1346/CCMN.1995.0430608.
- [39] E. Navrátilová and P. Rovnaníková, "Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 530–539, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062.
- [40] G. Baronio and L. Binda, "Study of the pozzolanicity of some bricks and clays," *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 1, pp. 41–46, Feb. 1997, doi: 10.1016/S0950-0618(96)00032-3.

- [41] E. Uğurlu and H. Böke, “The use of brick-lime plasters and their relevance to climatic conditions of historic bath buildings,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2442–2450, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.005.
- [42] A. Gameiro, A. Santos Silva, R. Veiga, and A. Velosa, “Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing,” *Thermochim. Acta*, vol. 535, pp. 36–41, May 2012, doi: 10.1016/J.TCA.2012.02.013.
- [43] A. Grellier, D. Bulteel, M. El Karim Bouarroudj, S. Rémond, Z. Zhao, and L. Courard, “Alternative hydraulic binder development based on brick fines: Influence of particle size and substitution rate,” *J. Build. Eng.*, vol. 39, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102263.
- [44] M. Bediako and E. Atiemo, “Influence of Higher Volumes of Clay Pozzolana Replacement Levels on Some Technical Properties of Cement Pastes and Mortars,” *J. Sci. Res. Reports*, vol. 3, no. 23, pp. 3018–3030, 2014, doi: 10.9734/jsrr/2014/9046.
- [45] Anonyme, “Terres cuites et Maçonneries Breve historique Quelques repères,” pp. 1–33.
- [46] B. Definition *et al.*, “Manuel maçonnerie de terre cuite 01/05/2005,” 2005.
- [47] D. L. E. Jury, “Remerciements,” 2019.
- [48] J. M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 763–769, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.017.
- [49] P. B. Cachim, “Mechanical properties of brick aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1292–1297, Mar. 2009, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2008.07.023.
- [50] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd-Elmoaty, and H. H. Hassan, “Utilization of crushed clay brick in concrete industry,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 151–168, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.AEJ.2013.12.003.

