

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de MasterII**

**Par : BENCHELALI KAMEL**

**Intitulé**

**Effet de la haute température sur le comportement  
mécanique d'un béton compacté au rouleau (BCR)**

**Le : 25 Juin 2018**

|                             |                      |               |
|-----------------------------|----------------------|---------------|
| <b>Dr . SEDDIKI ahmed</b>   | Université de M'sila | Président     |
| <b>Pr. BEDDAR miloud</b>    | Université de M'sila | Encadreur     |
| <b>Dr. BELAGRAA larbi</b>   | Université de M'sila | Co- Encadreur |
| <b>Dr. MADDAH abdelaziz</b> | Université de M'sila | Examineur     |
| <b>Dr. SILINE mohamed</b>   | Université de M'sila | Examineur     |

**Année universitaire: 2017/2018**





## *Remerciement*

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

*Nous tenons à remercier vivement notre promoteur monsieur pr beddar miloud.  
Aussi bien monsieur dr belagraa larbi  
Pour sa sollicitude, ses efforts qu'il a déployé pour nous aide, encourage conseiller et corriger.*

*Nous tenons à remercier également tous les enseignants et administratifs qui ont contribué à notre formation.*

*Nous remercions particulièrement tous les personnels pour leur aide de ce travail et tous les étudiants de génie civil.*



## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Mes trèschers*

*Mes frères*

*Mes familles grandes et petites*

*Mes enseignants*

*Mes amies et tous mes camarades,*

*Et tous ceux qui portent l'Algérie dans leurs cœurs.*

## **RESUME**

---

### **RESUME**

Le béton compacté au rouleau sont de plus en plus utilisés, dans le domaine de génie civil, puisqu'ils permettent de construire de manière rapide et économique des ouvrages aussi divers que des barrage-poids et des revêtements routiers.

Le béton compacté au rouleau est un béton sans affaissement, de consistance sèche, mais suffisamment maniable pour être mis en place et consolidé à l'aide de rouleaux vibrateurs ou de plaques vibrantes.

Les travaux de recherche décrits dans ce mémoire portent sur l'effet de la haute température sur les caractéristiques du béton compacté au rouleau à l'état durci

Cette étude représenté l'étude d'un béton compacté au rouleau issu des matériaux locaux et expose aux conditions extrêmes telle que la haute température (cas d'un à incendier causée par un accident)

L'étude expérimentale menée sur un béton compacté au rouleau a montré qu'une température élevée conduit à une résistance a la compression faible et augmente le taux de laitier conduisant à une diminué la résistance a la compression à haute température.

## **ABSTRACT**

the roller compacted concretes are increasingly used in the field of civil engineering, as they make it possible to build quickly and economically structures as diverse as gravity dams and road surfaces.

Roller-compacted concrete is a sag concrete with a dry consistency, yet sufficiently manageable to be set up and consolidated using vibratory rollers or vibratory plates.

The research described in this thesis deals with the effect of high temperature on the characteristics of hard roller compacted concrete.

This study represented the study of a roller compacted concrete from local materials and exposes to extreme conditions such as high temperature (case of a fire to be caused by an accident)

The experimental study in search of a roller compacted concrete has shown that a high temperature leads to a low compressive strength and increases the slag content leading to a decrease in the resistance to high temperature compression.

## ملخص

يتم استخدام الخرسانة المضغوطة بشكل متزايد في مجال الهندسة المدنية، حيث أنها تجعل من الممكن بناء هياكل سريعة واقتصادية متنوعة مثل السدود و الطرق.

إن الخرسانة المضغوطة عبارة عن خرسانة متماسكة و جافة، ومع ذلك يمكن استعمالها بشكل كاف وضغطها باستخدام الرصاص الاسطواني أو الألواح الاهتزازية.

يتناول البحث الموصوف في هذه الرسالة تأثير ارتفاع درجة الحرارة و نسبة الخبث على خصائص الخرسانة المضغوطة .

تمثلت هذه الدراسة في دراسة الخرسانة المضغوطة المتكونة من المواد المحلية والمعرضة للظروف القاسية مثل ارتفاع درجة الحرارة (حالة الحريق الذي ينجم عن حادث في الطريق )

أوضحت الدراسة التجريبية للخرسانة المضغوطة أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة، انخفضت قوة الضغط، وعند ارتفاع نسبة الخبث وارتفاع درجة تنقص قوة الضغط.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....2

### CHAPITRE I GENERALITES SUR LE (BCR)

I.1.INTRODUCTION:.....5

I.2.DEFINITION.....5

I.3.HISTORIQUE: .....6

I.4.LES COMPOSANTS: .....7

I.4.1.Le liant: .....7

I.4.2.Les granulats: .....7

I.4.3.L' eau de gâchage: .....8

I.5.LES ADJUVANT.....8

I.6.PRÉPARATION ET MISE EN PLACE DU BCR.....9

I.7. CURE DU BCR.....10

I.8. APPLICATIONS.....11

I.8.1. Le BCR en corps des barrages: .....11

I.8.2. Le BCR en technique routière (Pavages): .....13

I.9.INTÉRÊTS DU BCR: .....15

I.10. INCONVÉNIENTS DU BCR .....17

I.11. MÉTHODES DE FORMULATION.....17

I.11.1.Méthode basée sur les limites de maniabilité.....18

I.11.2.Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique.....19

I.11.3.Autres méthodes: .....21

I.12. CONCLUSION : .....22

### CHAPITRE II CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET

#### LA FORMULATION D'UN BCR

II.1.INTRODUCTION:.....24

## [SOMMAIRE]

---

|   |    |
|---|----|
| II.2.MATÉRIAUX UTILISÉS: .....  | 24 |
| II.2.1.Caractéristiques du sable: .....   | 24 |
| II.2.1.1.Analyse granulométrique (NF P 18304): .....                                      | 24 |
| II.2.1.2.Module de finesse (NF P18-540): .....  | 26 |
| II.2.1.3.Propriété « équivalent de sable» (NF P18-590) .....                              | 27 |
| II.2.1.4.Masse volumique absolue (NF P 18-555): .....                                     | 29 |
| II.2.1.5.Masse volumique apparente (NF P 18-554) : .....                                  | 30 |
| II.2.2.Caractéristiques des graviers: .....   | 31 |
| II.2.2.1.Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560): .....                         | 31 |
| II.2.2.2.Masse volumique: .....   | 33 |
| II.2.2.3.La porosité: .....   | 34 |
| II.2.2.4.La compacité .....   | 34 |
| II.2.2.5.L' indice des vides: .....   | 34 |
| II.2.2.6.La résistance à la fragmentation par chocs, essai Los Angeles (NFP18-573): ..... | 35 |
| II.2.3.Caractéristiques du ciment utilisé: .....  | 37 |
| II.2.3.1.Caractéristiques physiques: .....  | 37 |
| II.2.3.2.Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ -CEM II/B 42,5 R: .....         | 37 |
| II.2.3.3.Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ -CEM II/B 42,5 R: .....        | 38 |
| II.2.4.Eau de gâchage: .....  | 38 |
| II.2.4.1.Caractéristiques chimiques de l'eau utilisé: .....                               | 38 |
| II.3.FORMULATION DU BCR.....  | 39 |
| II.3.1.Fuseau granulométrique.....  | 39 |
| II.3.2.La courbe combinée:.....   | 39 |
| II.3.3.Pourcentage des granulats: .....   | 40 |
| II.3.4.Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment: .....      | 40 |
| II.3.5.Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR:.....                        | 43 |

# [SOMMAIRE]

---

## CHAPITRE III COMPOSITION ET ESSAIS SUR BCR

|   |    |
|---|----|
| III. L INTRODUCTION.....  | 48 |
| III.1. CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES.....                              | 48 |
| III.2 .PROCEDURES D’ESSAIS REALISES :.....  | 49 |
| III.2 .1 Essais sur le béton frais : .....  | 49 |
| III.2.1.1.Maniabilité (ouvrabilité) du béton essai de vété ( NF en 12350-3 ) :..... | 49 |
| III.2.1.2.La masse volumique sur béton frais (NF en 12350-6) :.....                 | 51 |
| III.2.2.Essais sur le béton durci:.....   | 51 |
| III.2.2.1.La masse volumique sur béton durci (NF en 12390-7):.....                  | 51 |
| III.2.2.2.Perte de masse (NF P 98-340/CN).....                                      | 52 |
| III.2.2.3.Teneur en eau (NF EN 1097-5 ).....  | 52 |
| III.2.2.4.Détermination de la résistance à la compression (NFP18-411):.....         | 53 |
| III.3.CONCLUSION : .....  | 54 |

## CHAPITRE IV RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

|   |           |
|---|-----------|
| IV. INTRODUCTION:.....  | 55        |
| IV.1. RESULTATS D’ESSAIS SUR BETON FRAIS :.....   | 55        |
| IV.1.1. La masse volumique de BCR:.....   | 55        |
| IV.1.2. L’essai Vété .....  | 56        |
| IV.2. RESULTATS D’ESSAIS SUR BETON A L’ETAT DURCI :.....                                  | 57        |
| IV.2.1. La masse volumique de BCR:.....   | 57        |
| IV.2.2. L’effet de température et laitier sur la perte de masse de BCR:.....              | 60        |
| IV.2.3.L’effet de teneur en laitier sur la teneur en eau de BCR:.....                     | 61        |
| IV.2.3. L’effet de température et laitier sur la résistance à la compression de BCR:..... | 62        |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE :.....</b>   | <b>68</b> |

# Liste des figures

---

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure.I.1.</b> Mise en place de BCR par bandes.....   | 10 |
| <b>Figure.I.2.</b> Cure du béton par arrosages ciblés.....  | 11 |
| <b>Figure.I.3.</b> Bâche de protection contre la pluie.....   | 11 |
| <b>Figure.I.4.</b> Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie).....                                  | 12 |
| <b>Figure.I.5.</b> Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil-Tunisie).....   | 12 |
| <b>Figure.I.6.</b> Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada.....   | 13 |
| <b>Figure.I.7.</b> Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouaneau Canada.....  | 13 |
| <b>Figure.I.8.</b> Mise en place du BCR en pavage – Atlanta USA .....   | 14 |
| <b>Figure.I.9.</b> Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier &Marchand,2001) .....                                  | 18 |
| <b>Figure.I.10.</b> Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al. 1997 ;<br>Gauthier &Marchand,2001) ..... | 20 |
| <b>Figure.I.11.</b> Courbes de Proctor (Gauthier &Marchand,2001) .....  | 20 |
| <b>Figure II.1.</b> Une balance et une tamiseuse vibrante.....  | 25 |
| <b>Figure II.2.</b> L'Analyse granulométrique du sable de dune(BOUSAADA).....   | 26 |
| <b>Figure II.3.</b> Essais d'équivalent de sable .....  | 27 |
| <b>Figure II.4.</b> Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8),(8/15),(15/20) .....                               | 33 |
| <b>Figure II.5.</b> Appareil de l'essai Los Angeles.....  | 35 |
| <b>Figure II.6.</b> Fuseau granulaire .....   | 39 |
| <b>Figure II.7.</b> Détermination les pourcentages des différentes fractions des granulats.....                             | 40 |
| <b>Figure II.8.</b> Marteau piqueur Hilti.....  | 41 |
| <b>Figure II.9.</b> La densité sèche en fonction de la teneur en eau et le dosage de ciment.....                            | 42 |

## Liste des figures

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure II.10.</b> Plage de laitier dans le diagramme de RANKIN d'après [Venuat 1989] .....                               | 44 |
| <b>Figure II.11.</b> Laitier cristallisé d'après [Venuat M, 1989].....  | 45 |
| <b>Figure II.12.</b> Laitier granulé d'après [Venuat M; 1989].....  | 45 |
| <b>Figure III.1.</b> Mesure de la consistance (Essai de Vébé).....  | 50 |
| <b>Figure III.2.</b> éprouvettes de forme cubiques 10 x 10 x 10 cm en BCR .....   | 52 |
| <b>Figure III.3.</b> la presse d'essai. ....  | 53 |
| <b>Figure III.4.</b> Four pour tester haute température.....  | 53 |
| <b>Figure.IV.1.</b> L'effet de laitier sur la masse volumique de BCR.....   | 56 |
| <b>Figure.IV.2.</b> de laitier sur l'ouvrabilité de BCR.....  | 57 |
| <b>Figure.IV.3.</b> L'effet de température sur la masse volumique de BCR.....   | 59 |
| <b>Figure.IV.4.</b> L'effet de température et laitier (5% )sur la masse volumique de BCR.....                               | 59 |
| <b>Figure. IV.5.</b> L'effet de température et laitier (10% ) sur la masse volumique de BCR ...                             | 59 |
| <b>Figure. IV.6.</b> L'effet de température et laitier sur la perte de masse de BCR.....                                    | 60 |
| <b>Figure. IV.7.</b> Effet de laitier sur la teneur en eau de BCR   |    |
| <b>Figure. IV.8.</b> L'effet de la température sur la résistance à la compression de BCR.<br>(Sans laitier).....            | 63 |
| <b>Figure. IV.8.</b> L'effet de la température et laitier sur la résistance à la compression<br>de BCR. (5% laitier).....   | 64 |
| <b>Figure. IV.10.</b> L'effet de la température et laitier sur la résistance à la compression<br>de BCR. (10% laitier)..... | 65 |

# Liste des tableaux

---

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau I.1.</b> Les intérêts du BCR.....   | 16 |
| <b>Tableau II.1.</b> Analyse granulométrique du sable de dune de BOUSAADA.....                       | 25 |
| <b>Tableau II.2</b> Classification des sables en fonction du module de finesse. ....                 | 26 |
| <b>Tableau II.3.</b> Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable Esv et Esp ..... | 28 |
| <b>Tableau II.4.</b> Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune .....                 | 29 |
| <b>Tableau II.5.</b> Caractéristiques physiques du sable de dune(BOUSAADA).....                      | 30 |
| <b>Tableau II.6.</b> L'analyse granulométrique de gravier concassé(3/8) .....                        | 32 |
| <b>Tableau II.7.</b> L'analyse granulométrique de gravier concassé(8/15) .....                       | 32 |
| <b>Tableau II.8.</b> L'analyse granulométrique de gravier (15/20).....                               | 32 |
| <b>Tableau II.9.</b> La masse volumique apparente des graviers .....                                 | 33 |
| <b>Tableau II.10.</b> Masse volumique absolue des graviers .....                                     | 34 |
| <b>Tableau II.11.</b> Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé .....              | 35 |
| <b>Tableau II.12.</b> Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé .....                           | 36 |
| <b>Tableau II.13.</b> Classification des roches en fonction du coefficient LA.....                   | 36 |
| <b>Tableau II.14.</b> Caractéristiques physique du CPJ -CEM II/B42,5R .....                          | 37 |
| <b>Tableau II.15.</b> Les compositions chimiques du CPJ -CEM II/B42,5R.....                          | 37 |
| <b>Tableau II.16.</b> Les compositions minéralogiques du CPJ -CEM II/B42,5 R.....                    | 38 |
| <b>Tableau II.17.</b> Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage.....                            | 38 |
| <b>Tableau II.18.</b> Tamisât de différentes fractions d'agrégats.....                               | 39 |
| <b>Tableau II.19.</b> Pourcentage des granulats .....  | 40 |

## Liste des tableaux

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau.II.20.</b> Les quantités des granulats, ciment et d'eau pour les mélanges de BCR.....                            | 41 |
| <b>Tableau.II.21.</b> Résultats de la formulation aux différents dosages en ciment et teneurs<br>en eau.....                | 42 |
| <b>Tableau II.22.</b> Pourcentage des constituants de BCR dansun(m3).....   | 43 |
| <b>Tableau II.23.</b> Les quantités des constituants de BCR dansun(m3) .....  | 43 |
| <b>Tableau.III.1.</b> Nombre les 'éprouvettes pour les'essai .....  | 48 |
| <b>Tableau.III.1</b> Classes de consistance Vébé en fonction du temps t.....  | 50 |
| <b>Tableau.III.1.</b> L'effet de laitier sur la masse volumique de BCR.....   | 55 |
| <b>Tableau.IV.2.</b> L'effet de laitier sur l'ouvrabilité de BCR .....  | 56 |
| <b>Tableau.IV.3.</b> l'effet de laitier et température sur la masse volumique de BCR et<br>La perte de masse .....          | 58 |
| <b>Tableau .IV.4.</b> Effet de laitier sur la teneur en eau de BCR  |    |
| <b>Tableau .IV.5.</b> l'effet de laitier et température sur la compression de BCR.....                                      | 63 |
| <b>Tableau .IV.5.</b> L'effet de la température sur la résistance à la compression de BCR<br>(Sans laitier) .....           | 63 |
| <b>Tableau .IV.6.</b> L'effet de la température et laitier sur la résistance à la compression<br>de BCR. (5% laitier) ..... | 64 |
| <b>Tableau .IV.7.</b> L'effet de la température et laitier sur la résistance à la compression<br>de BCR (10% laitier) ..... | 65 |

# **INTRODUCTION GENERALE**

## 1. INTRODUCTION :

Le sujet que nous avons effectué est une technologie considérée comme évolutive en utilisant un béton spécial qui est le Béton Compacté au Rouleau (BCR). Ce matériau est défini comme étant un mélange, raide à affaissement nul, composé de granulats, de ciment et d'eau est compacté en place en utilisant un matériel spécifique à haut pouvoir de compactage à l'état frais .

Le BCR se comporte comme un sol légèrement humide mais, en passant à l'état durci, il se comporte comme un béton.

Malgré le comportement du BCR est bien étudié des les conditions normales. Mais ce comportement reste inconnu sous les conditions externes .

Dans ce travail, on cherche à étudier

- L'influence des températures élevées sur le comportement mécanique de béton compacté au rouleau
- L'effet de l'addition de faible teneur de laitier (5% , 10% ) sur le comportement mécanique d'un béton compacté au rouleau exposé aux hautes température .

## 2. Objective du Travail :

- L'objectif consiste à voir, l'effet de la haute température sur le comportement mécanique de béton compacté au rouleau (cas d'incendie des les tunnels ), et voir aussi l'effet de l'addition teneur de laitier à ce béton avec une teneur inferieur ou égale à 10%

## 3 .Structure de Mémoire :

Pour réaliser cette étude notre travail est axé sur les chapitres suivants :

- ✓ **CHAPITRE I** : généralités sur le (BCR) béton compacté au rouleau.

- ✓ **CHAPITRE II** : caractérisation des matériaux utilisés et la formulation d'un (BCR) .
- ✓ **CHAPITRE III** : composition et essai sur (BCR).
- ✓ **CHAPITRE-IV** : résultats et discussions.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES SUR LE (BCR)**  
**BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU**

## **I.1.INTRODUCTION:**

Les infrastructures routières coûtent très chères. Les pays en développement les réalisent en s'endettant énormément. Un constat évident de nos jours par les usagers de la route, c'est la dégradation rapide de cette dernière du fait des sollicitations et de l'accroissement du trafic. La politique veut toujours que les routes soient en chaussées souples-or celles-ci présentent certes des avantages mais, nécessitent un entretien qui s'avère couteux à la longue. De plus, le bitume est importé, ce qui constitue un grand inconvénient du point de vue économie, il devient donc nécessaire voire impératif de trouver un mode de construction des chaussées qui puissent allier durabilité, dureté et économie. C'est ainsi que nous avons pensé à l'utilisation du béton compacté au rouleau (BCR).

Ce matériau est surtout utilisé pour la réalisation de barrages, et d'aéronautiques.

## **I.2. DEFINITION:**

On appelle Béton Compacté au Rouleau (BCR) un béton raide, non armé, d'affaissement nul composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. du point de vue structural, le BCR est un ouvrage rigide présentant le même comportement qu'une dalle de béton et est soumis aux mêmes critères de conception. la portance et la résistance à la déformation des couches de support et celles de roulement confectionnées dans un tel cas permettent de soumettre celles-ci aux sollicitations d'un trafic intense. Le BCR présente une grande résistance et une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges des équipements lourds.

Il a été prouvé qu'un mélange de BCR avec une teneur en liant de 300 kg/m<sup>3</sup> et un rapport E/C d'environ 0,35 peut développer une résistance en compression à 28 jours de 40 MPA et une résistance en flexion à 3 jours de 5 MPA.

➤ Dans le cas des routes, le BCR peut être utilisé pour deux applications:

- Comme couche-support d'une chaussée revêtue en liant hydrocarboné;
- Comme couche de roulement traitée en surface de manière à subir directement le passage du trafic [1]. la dernière application a la particularité d'une mise en œuvre rapide avec donc une réduction du coût de construction.

La réalisation du BCR est faite avec les mêmes équipements généralement utilisés pour la construction des chaussées en béton. Il est produit en centrale fixe ou mobile, transporté par le camion à benne basculante et mise en place à l'aide d'épandeuse, de finisseur. Le compactage est assuré par le rouleau compacteur.

L'épaisseur minimale d'une dalle de BCR est de 15 cm. Il faut à chaque fois s'assurer que la couche inférieure à la dalle a atteint un degré de compactage suffisant [2].

### **I.3. HISTORIQUE:**

L'utilisation du ciment en construction routière date de 1935 avec le sol ciment ; technique semblable au BCR, le sol-ciment constituait un mélange granulaire auquel on ajoutait une très faible quantité de ciment. Son but est de faire un remblai qui avait une capacité portante plus élevée qu'un remblai granulaire compacté. Cette technique a été utilisée pour faire le revêtement de voies d'accès et des cours de triage pour des entreposages forestières en Colombie-Britannique [3].

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

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

Après 1980, au moins dix autres pays (France, USA, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon) ont construit chacun plus de 10 000 m<sup>2</sup> de revêtement en BCR[4].

Le premier projet d'importance a eu lieu en 1995 avec la construction d'un revêtement de 25000 m<sup>2</sup> à la fonderie Home de métallurgie pour l'entreprise des scories de laitier concassé (Québec). Il s'agissait d'un BCR à haute performance de 350 mm d'épaisseur avec une résistance en compression à 7 jours de 55 MPA et une résistance en flexion de 5 MPA.

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

En Afrique, le Béton Compacté au Rouleau reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est développée que pour la construction des barrages et son utilisation dans le domaine des routes n'est pas encore répandu[5].

## **I.4. LES COMPOSANTS:**

### **I.4.1. Le liant:**

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

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

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

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

Il faut noter qu'une teneur trop élevée de ciment favorise les fissures, augmente le coût de production et ne permet pas nécessairement une augmentation des performances [6].

### **I.4.2. Les granulats:**

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

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

pour limiter les problèmes de ségrégation et en vue d'une meilleure qualité de surface, la dimension maximale du granulat D doit être inférieure à 20 mm, Le fuseau granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions (exemple : 0/3-3/8-8/16).

Toutes les fractions granulométriques doivent avoir un indice de concassage supérieur à 30% dans le cas d'un trafic trop faible et environ 100% dans le cas d'un trafic élevé. Ces granulats ont un indice de plasticité non mesurable et une teneur en matière organique inférieure à 0.2 %.

Il faut noter que le choix d'un d élevé a comme avantages :

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

Quand max granulats fins, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc un home compacité à l'état durci. Toutefois, un pourcentage élevé de fines entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place [7].

### **I.4.3. L' eau de gâchage:**

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

Il faut noter qu'un excès d'eau entraîne une instabilité rendant l'uni défectueux tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de prise localisés [8].

## **I.5. LES ADJUVANTS :**

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

Doivent être prises pour leur utilisation. Il est même recommandé de réaliser des essais au laboratoire afin de déterminer le dosage optimal et de mesurer l'effet sur les propriétés du BCR frais et durci.

Les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

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

. **Les Adjuvants Réducteurs d'eau** : Ils ont pour rôle, à consistance égale de réduire le dosage en eau et à dosage en eau constant d'augmenter l'affaissement au cône d'Abram.

Ces adjuvants sont couramment employés dans la réalisation des BCR puisque permettant une amélioration de l'homogénéité de la pâte. Cependant, ces adjuvants employés à fort dosage peuvent avoir un effet retardateur de prise. L'utilisation de certains adjuvants dans

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

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

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

## **I.6. PRÉPARATION ET MISE EN PLACE DU BCR:**

On déterminera la recette du béton au moyen d'essais de convenance ; il s'agit de l'optimiser de telle sorte qu'il se prête bien au compactage au moyen des engins disponibles (Finisseuse et rouleau), ne subisse pas de ségrégation et offre une stabilité du béton frais suffisante pour pouvoir être passé au rouleau sans tarder.

C'est ainsi que la masse totale de fines inertes < 0,25 mm (farines et sable fin) devrait atteindre environ 500 kg/m<sup>3</sup> de béton compacté.

On veillera aussi à ce que la part de sable soit suffisante

–compter tenu de sa finesse.

– pour obtenir une surface du béton bien fermée (sans bullage).

Le béton doit être malaxé en centrale, pendant 60 secondes au moins. Durant le transport et les attentes éventuelles, il faudra protéger le béton frais en fonction des conditions météorologiques.

Le transport, la mise en place et le compactage doivent être planifiés de telle sorte que la dernière de ces opérations soit achevée au plus tard 90 minutes après le gâchage.

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

Pour parvenir finalement à une densité selon l'essai Proctor modifié de 96% au moins, on passera le béton au rouleau lisse de 8 t, d'abord deux fois sans vibrer, puis plusieurs fois en vibrant.

S'il s'agit d'une couche de roulement, on passera encore un rouleau à pneus (15 t), afin d'obtenir une surface bien fermée, puis encore une fois un rouleau lisse, sans vibrer, afin de bien lisser la surface.

Si la surface est importante, la mise en place du béton devra se faire au moyen de finisseuses opérant de manière décalée, de manière à ce que le bord de telle dalle soit encore frais lorsqu'on y accolera la dalle voisine et qu'ainsi le compactage puisse se faire en passant le rouleau sur les deux bords à la fois.

On n'a pas exigé du BCR qu'il offre «une résistance élevée au gel et au sel de déverglaçage». dans les 3 tronçons d'essai du réseau des routes fédérales (D), le béton compacté a été revêtu d'un tapis hydrocarboné, afin de parvenir à la planéité requise. Pour les routes industrielles, les aires de dépôt du secteur militaire et les voies rurales, qui ne sont pas dotées d'un tel revêtement, le sel de déverglaçage pourrait poser un problème. Mais dans ces cas, on a constaté que la résistance élevée (B 35), la teneur en ciment (au minimum 270 kg/m<sup>3</sup>) et le compactage conduisant à une densité Proctor supérieure à 95% assuraient une résistance suffisante au gel et au sel de déverglaçage.

Les cendres volantes peuvent se révéler contre-productives [9].



**Figure. I.1. Mise en place de BCR par bandes [9].**

### **I.7. CURE DU BCR:**

En raison de la faible teneur en eau du BCR, une cure soignée s'impose, immédiatement après le compactage. Afin d'éviter un délavage à la surface fraîchement compactée, l'eau ne doit être, au début, que finement vaporisée. La cure par aspersion d'eau doit durer au moins trois jours [10].



**Figure.I.2.Cure du béton par arrosages ciblés [10].**



**Figure.I.3.Bâche de protection contre la pluie [10].**

## **I.8.APPLICATIONS:**

### **I.8.1.Le BCR en corps des barrages:**

Pour faire des économies et résoudre le problème d'utilisation des grandes quantités de terre dans les digues de retenue, le BCR en tant que matériau est utilisé dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces. L'avantage de cette technique est que ce matériau permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval. L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du barrage. Ce matériau, caractérisé par un affaissement nul, est produit dans des centrales de malaxage implantées à proximité du site puis il est transporté à pied d'œuvre par des convoyeurs ou des camions. Le liant utilisé est généralement le ciment alors que le dosage est nettement plus faible comparé à celui d'un Béton compacté. La dimension maximale du granulat varie de 60 à 150 mm ; Pour ces

ouvrages, les résistances à la compression varient de 7 à 20 MPA. Pratiquement et après être déversé, le mélange de BCR est étalé au moyen de niveleuses ou de bulldozers mécaniques puis il est compacté au moyen de rouleaux compacteurs vibrants [11]. Pour la réalisation d'ouvrages de masse comme les barrages, il est recommandé l'utilisation d'ajouts minéraux tels que les cendres volantes puisque la quantité de ciment utilisée est faible. Cette substitution de ciment permet de réduire le dégagement de chaleur d'hydratation lors du coulage et de durcissement [11]. On emploie, dans la construction de barrages en BCR, les mêmes techniques de réalisation utilisées pour les remblais en terre comme c'est montré sur les Figures I.4, I.5, I.6 et I.7.



**Figure.I.4.Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie) [12].**

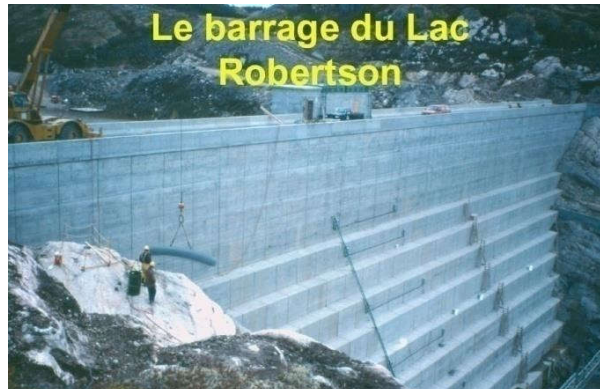
Parmi les barrages en BCR réalisés en Tunisie on peut citer : Barrage Errmil (Figures 1.4 et 1.5) à Bouarada, Barrage FomElkhanga à Tozeur, Barrage ElFar à Hammamet, Barrage El Moula à Tabarka.... En France, on peut citer le Barrage de Rio, le Barrage Olivettes et le barrage Petit-Saut qui sont réalisés en BCR. Actuellement, en Asie, un grand barrage en BCR est en cours de construction sur WadiDayqah au Sultanat Omen d'un montant qui s'élève à 90 Millions d'euros.



**Figure.I.5.Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie)[12].**

Au Canada, par contre, la construction de barrages en BCR est relativement plus développée dont on peut citer le barrage de Manouane. En outre, en Amérique du Nord,

le plus grand barrage en BCR se trouve à Olivenhain, Californie (USA). Le plus haut barrage en BCR est le barrage Miel en Colombie de 617 m de hauteur, suivi par le barrage de Bío Bío au Chili de 503 m de hauteur. Tha Dan Canal Dam est le plus grand Barrage en BCR au monde d'une longueur de 2720 m et un volume de BCR de 5.470.000 m<sup>3</sup>. Le barrage de Beni Haroun en Algérie est considéré comme le plus grand barrage en Afrique avec 710 m de longueur et 120 m de hauteur.



**Figure.I.6.Barrage du Lac Robertson  
en BCR au Canada [13].**



**Figure.I.7.Barrage et Batardeau en BCR  
sur la rivière Manouane au Canada [13].**

### **I.8.2.Le BCR en technique routière (Pavages):**

Par définition, le BCR pour pavages tient son nom de la technique de compactage employée pour son serrage et sa densification. Les chercheurs expliquent la différence

entre les techniques de BCR en barrage et pavages par le fait que les procédures pour la

construction d'un pavage en BCR exigent des contrôles plus rigoureux que dans le cas des barrages. Ce matériau contient les mêmes constituants de base que ceux employés pour le BC tel que ciment, granulats (sable et gravier) et eau. Les techniques de mise en œuvre utilisent, pour l'épandage, le même matériel utilisé pour les revêtements en Béton Bitumineux (BB) à haute densité. Le mélange employé est raide et ferme et il faut le compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques. De plus, une fois durci, La résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPA .L'utilisation du BCR pour les pavages varie d'une épaisseur de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts (Figure 1.8). Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulat est limitée à 20 mm.

Du point de vue durabilité, le revêtement en BCR a montré des bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voie d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telle que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes [14].



**Figure.I.8.Mise en place du BCR en pavage, Atlant a USA [14].**

Pour améliorer le comportement de la chaussée, la dalle de BCR peut être posée sur une base stabilisée au ciment, appelée aussi fondation stabilisée au ciment et qui est un mélange compacté de granulats et de ciment dont ils forment une excellente fondation

de route. Cette fondation contribue au renforcement de la structure et fournit une plateforme résistante pour supporter une dalle de BCR et permet aussi une optimisation économique de l'épaisseur [14].

### **I.9.INTÉRÊTS DU BCR:**

Il s'agit d'un revêtement en béton, donc d'un revêtement robuste et durable, même sous l'action de très lourdes charges dans des conditions défavorables. De plus, c'est un revêtement dont la mise en place s'exécute rapidement selon des techniques appropriées. Combinés à un coût de réalisation peu élevé, sa longévité et le peu d'entretien qu'il exige en font une solution économique de bonne valeur [15].

La grande résistance de la chaussée en béton compacté au rouleau élimine les problèmes courants et coûteux, traditionnellement associés à la chaussée souple.

En effet, la chaussée en BCR :

- Ne fait pas d'ornières;
- Répartit la charge sur la fondation aux endroits où celle-ci est moins ferme;
- Supporte les charges lourdes concentrées sans déformation;
- Ne se détériore pas à la suite de déversements de carburants ou de fluides hydrauliques
- Ne se ramollit pas lorsqu'il fait chaud.

On dit que de la nécessité *naît* l'invention. C'est certes la nécessité de trouver un matériau peu coûteux convenant aux chaussées à usage industriel à grande circulation qui a mené à la mise au point du béton compacté au rouleau, et le coût peu élevé de ce revêtement demeure assurément un attrait majeur pour les ingénieurs, les propriétaires et les directeurs de travaux de construction. Toutefois, aujourd'hui, c'est surtout la performance du béton compacté au rouleau qui en fait un grand favori : sa capacité de supporter de lourdes charges et du matériel spécialisé, sa résistance aux gels et dégels répétés et son adaptabilité à diverses applications en font le choix idéal pour les gros travaux[15].

Le tableau I.1 donne un récapitulatif des différentes caractéristiques et avantages du BCR ;

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

**Tableau I.1. Les intérêts du BCR [15].**

### **I.10. INCONVÉNIENTS DU BCR:**

Les inconvénients du BCR sont résumés aussi dans les points suivants :

- ✓ La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être adaptés selon les différents types d'applications visées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique. La texture de la surface d'un revêtement est mesurée à l'aide de l'essai de tache de sable. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macro-texture de la surface (ASTM E 965). Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le tex-uromètre et la stéréoscopie [16].
- ✓ L'uni d'une chaussée est exprimé 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 (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a resté toujours un problème limitant relativement les applications du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage[16].

### **I.11. MÉTHODES DE FORMULATION:**

La formulation du béton consiste en général en la détermination des différentes proportions qui permettent d'obtenir une composition optimale. La combinaison la plus économique permette de satisfaire aux différentes exigences techniques liées aux critères de résistance, durabilité et de maniabilité.

Vu la spécificité du BCR comme un béton à affaissement nul, très ferme, qui contient une grande quantité de granulats et une faible teneur en ciment, les méthodes classiques de formulation du béton ne sont pas applicables directement sur le BCR. Plusieurs méthodes ont été citées dans la littérature, et sont présentées dans les paragraphes suivants, permettent de sélectionner les différentes proportions pour le BCR. Toutefois, le choix entre ces méthodes dépend de la destination du projet (routes ou barrages) et des moyens disponibles.

Le rapport ACI 325 présente deux procédures pour la formulation des mélanges de BCR destiné au corps routier. La première est basée sur la recherche d'une limite de

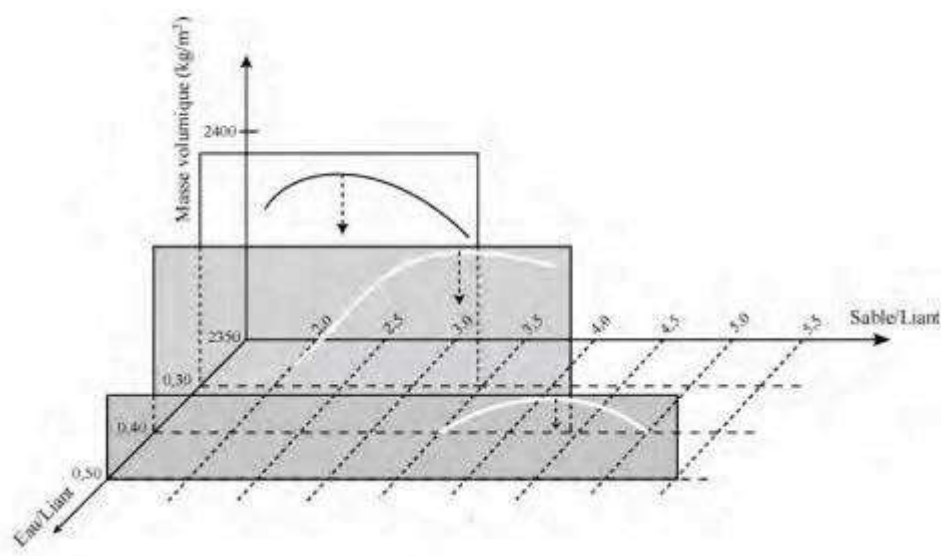
maniabilité alors que la seconde est reposée sur le principe de définir l'état le plus dense mélange utilisant les concepts de la Géotechnique. Les deux méthodes, peuvent être utilisées séparément pour les routes et pour les barrages[17].

### I.11.1.Méthode basée sur les limites de maniabilité:

Cette méthode consiste à déterminer les proportions du mélange de telle sorte à atteindre une maniabilité optimale qui peut satisfaire aux exigences techniques. La maniabilité du béton est mesurée à l'aide de l'appareil Vébé. Elle est exprimée en secondes. La procédure de formulation est composée de plusieurs étapes : détermination du volume de pâte minimal, choix du rapport eau/liant et enfin l'ajustement des proportions de granulats.

Dans la première étape, une série de mélanges de mortiers est préparée à différents rapports eau/ciment et à différents rapports sable/ciment sont étudiés, afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chaque rapport eau/sable des mélanges sont préparés à différents rapports eau/ciment et la masse volumique est mesurée (**Figure.I.9**).

La deuxième étape consiste en la détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges correspondants aux masses volumiques optimales (à différents rapports E/C). Le choix du rapport eau/ciment est fait selon les propriétés mécaniques requises. La troisième étape consiste à optimiser des granulats fins et grossiers selon la maniabilité voulue [17].



**Figure.I.9.**Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand, 2001) [17].

### I.11.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique:

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

La teneur en ciment est déterminée selon les caractéristiques mécaniques exigées, généralement entre 200 et 350 kg/m<sup>3</sup>. Tandis que, la teneur en eau optimale est estimée sur la base des essais de compactage du béton frais.

Cette méthode est plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont utilisés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée, ce que l'on trouve généralement avec les mélanges de BCR destinés aux projets routiers (Marchand et al, 1997 ; Gauthier & Marchand,2001).

Les proportions en granulats fins et grossiers sont déterminées par rapport à un fuseau granulométrique (**Figure.I.10**). Puis une série de mélanges du béton est préparée variant chaque fois la teneur en matériaux cimentaires, entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs.

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

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

$\rho_d$  : densité sèche.

$\rho_h$  : densité humide maximale mesurée.

$\omega$ : teneur en eau réelle (la teneur en moyenne calculée à partir des pesées de prélèvement de béton frais, avant et après étuvage) [17].

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est tracée dans un graphique (**Figure.I.11**). La teneur en eau correspondant à

la densité sèche maximale (sommet de la courbe) représente la teneur en eau optimale. Des essais de résistance en compression sont réalisés sur des éprouvettes préparées à différents teneurs en eau optimales. Le mélange ayant la teneur en liant minimale et possédant les propriétés mécaniques requises est alors choisi (Marchand et al, 1997).

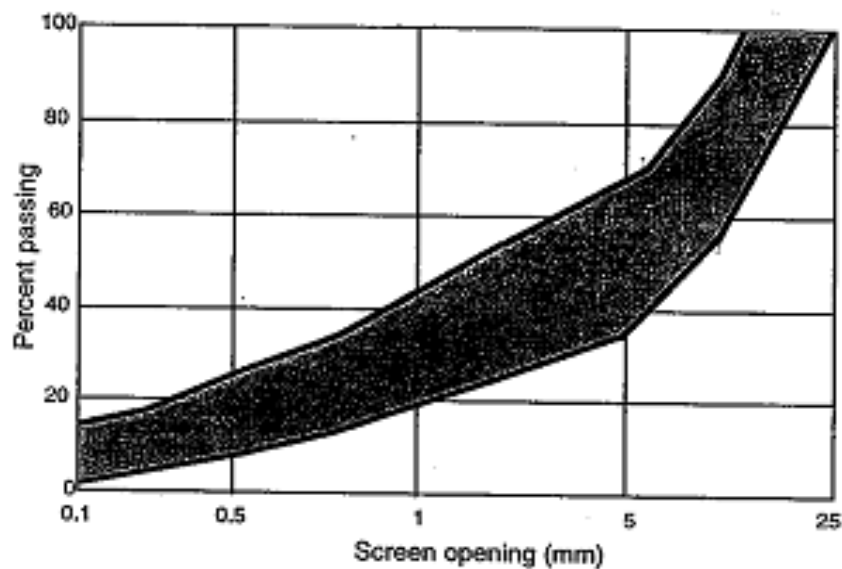


Figure.I.10.Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR

(Marchand et al., 1997 ; Gauthier & Marchand, 2001) [17].

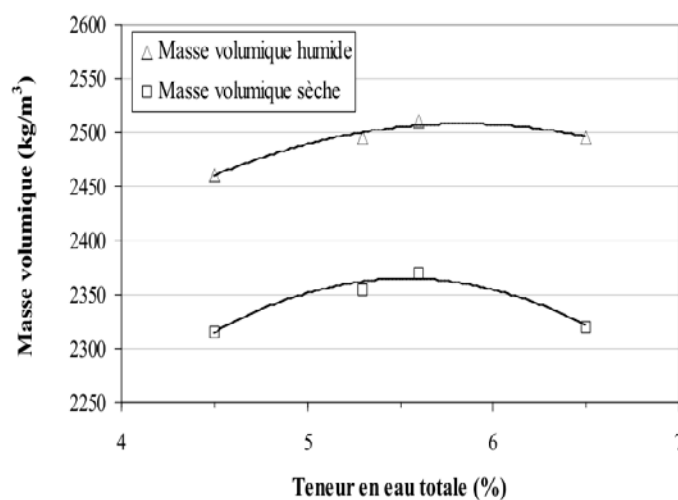


Figure.I.11.Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001) [17].

### I.11.3. Autres méthodes:

Outre les méthodes présentées précédemment, dans le rapport ACI 207 on y présente d'autres procédures, qui permettent de formuler le BCR. Mais il semble qu'elles sont plus appropriées aux mélanges de BCR destinés aux barrages. Parmi ces méthodes ; la méthode de l'U.S Corps of Engineers et la méthode du volume optimal, y sont citées.

La procédure de formulation selon l'approche de l'US Army Corps of Engineers, consiste dans une première étape à sélectionner les proportions des granulats, en effet, des distributions granulométriques idéales sont proposées. Le rapport du granulat fin au granulat grossier peut être aussi déterminé à partir des valeurs tabulées, en fonction du diamètre maximal de granulat et du type de granulat grossier[18].

La deuxième étape consiste à choisir la teneur en ciment empiriquement à partir d'un abaque. La teneur en eau est ensuite fixée selon la maniabilité voulue et des essais Vébé sont nécessaires. Finalement, la teneur en ciment est fixée à partir de la teneur en eau choisie et du rapport E/C.

La méthode du volume optimal comporte trois étapes ; la première consiste en la sélection d'une granulométrie sur la base de la formule modifiée de Fuller-Thompson, utilisée généralement pour la formulation des bétons bitumineux. Cette formule permet d'obtenir une courbe granulométrique produisant un squelette dense. La deuxième étape consiste en la sélection du volume de pâte pour une maniabilité désirée.

La dernière étape dans cette procédure consiste à choisir le rapport E/C et le type de ciment permettant d'obtenir la résistance mécanique spécifiée. Le rapport E/C satisfaisant les propriétés mécaniques désirées dépend à la fois du type de ciment utilisé et des propriétés mécaniques des granulats employés. A cet effet, deux à trois gâchées sont requises pour déterminer le rapport E/C optimal.

Toutes les méthodes citées sont basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques. Il existe néanmoins, d'autres méthodes qui s'appuient sur des approches théoriques. Une méthode a été développée au niveau du Laboratoire Central des Ponts

et Chaussées par De Larrard. Elle est basée sur le modèle d'empilement compressible, appelé également modèle de suspension solide. Le principe de la méthode consiste à optimiser la compacité (ou porosité) d'un empilement de grains de différentes dimensions.

Ce modèle est délivré à partir des travaux de Mooney (1950) sur la viscosité des suspensions concentrées des particules solides [18].

Le mode d'empilement compressible permet d'optimiser les différentes proportions de mélange (granulats, matériaux cimentaires). Il permet aussi de tenir compte, non seulement des dimensions des grains, mais également de la forme, de l'angularité et de la texture de la surface qui peuvent influencer considérablement la compacité du squelette granulaire (Tremblay, 1997 ; Pouliot, 2001), Le modèle d'empilement compressible permet de faire des calculs rapides, surtout que cette méthode est actuellement programmée. Cet avantage est très utile sur chantier pour recalculer les différentes proportions en cas de changement de matériaux (Gauthier & Marchand, 2001) [19].

### **I.12. Conclusion :**

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

**CHAPITRE II**  
**CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX**  
**UTILISÉS ET LA FORMULATION**  
**D'UN BCR**

## **II.1. INTRODUCTION:**

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour élaborer les mélanges de béton compacté ont été rapportés, les étapes et la procédure utilisée pour la formulation de BCR ont été bien expliqués. La méthode de la formulation basée sur le principe de géotechnique a été aussi rapportée dans ce chapitre.

## **II.2. MATÉRIAUX UTILISÉS:**

Les matériaux prélevés ont été soumis aux essais d'identification au sein du laboratoire de génie Civil de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes européennes. Les essais effectués sur les matériaux sont : analyse granulométrique, équivalent de sable, coefficient d'absorption d'eau, masses volumique (apparente et absolue) et Los Angeles.

### **II.2.1. Caractéristiques du sable:**

Nous avons utilisé dans ce travail un sable de dune d'origine siliceux qui provient de Boussaâda disponible au niveau de la base de vie de groupe industriel de ciment Algérie (GICA) à Boussaâda

#### **II.2.1.1. Analyse granulométrique (NF P 18304):**

L'essai Permet la détermination des grosseurs et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon. Il consiste à passer l'échantillon testé à travers une série des tamis décroissants de plus grand à plus petit, et faire peser le refus dans chaque tamis.



Figure II.1. une balance et une tamiseuse vibrante.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de Boussaâda sont regroupés dans le tableau (II.1) ci-dessous :

| Poids initial = 1000 g |             |                   |                |                 |             |
|------------------------|-------------|-------------------|----------------|-----------------|-------------|
| Module AFNOR           | Tamis en mm | Refus Partiel (g) | RefusCumulé(g) | RefusCumulé (%) | Tamisat (%) |
| 39                     | 6,3         | 0                 | 0              | 0               | 100         |
| 38                     | 5           | 42,5              | 42,5           | 4,25            | 95,75       |
| 35                     | 2.5         | 126,1             | 168,6          | 16,86           | 83,14       |
| 32                     | 1.25        | 82,7              | 251,3          | 25,13           | 74,87       |
| 29                     | 0.63        | 105,6             | 356,9          | 35,69           | 64,31       |
| 26                     | 0.315       | 165,1             | 522            | 52,2            | 47,80       |
| 23                     | 0.16        | 314,3             | 836,3          | 83,63           | 16,37       |
| 20                     | 0.08        | 148,1             | 984,4          | 98,44           | 1,56        |
| -                      | Fond        | 0                 | 0              | 100             | 0           |
| D max                  |             |                   | 5 mm           |                 |             |

Tableau II.1. Analyse granulométrique du sable de dune de BOUSAADA.

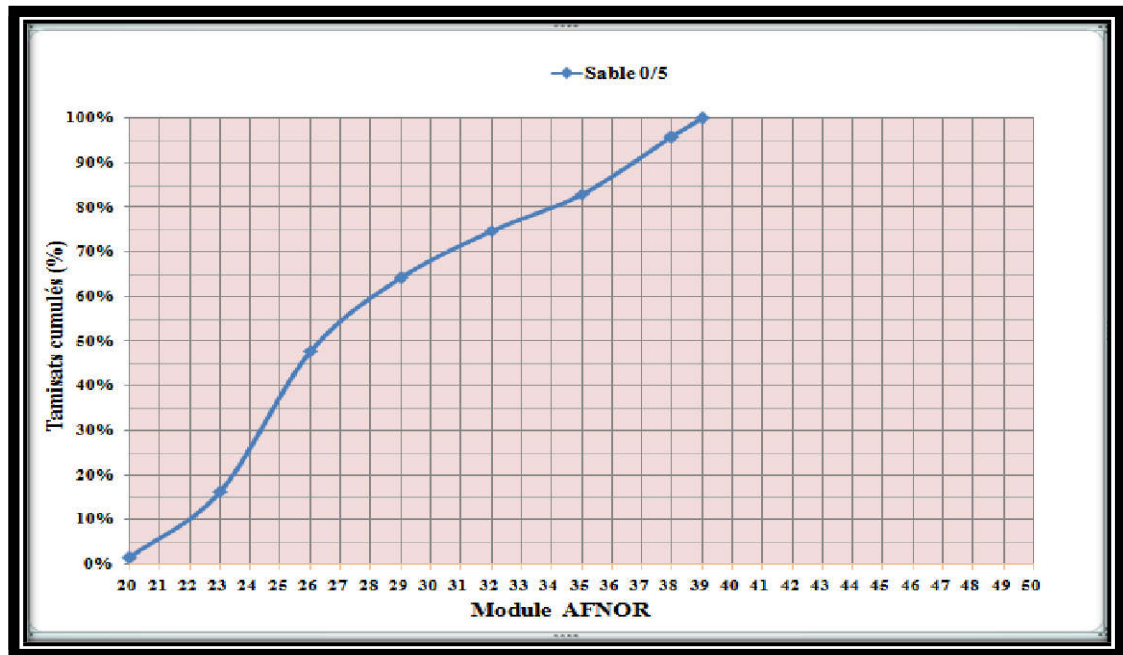


Figure II.2. L'Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA).

### II.2.1.2. Module de finesse (NF P18-540):

Le module de finesse est calculé par la somme des refus sur les tamis de module 23, 26, 29, 32, 35, 38, divisée par cent.

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, on trouve que la norme Française donne la classification suivante :

| Qualité du sable | Module de finesse |
|------------------|-------------------|
| Gros             | >2.5              |
| Moyen            | 2 à 2.5           |
| Fin              | 1.5 à 2           |
| Très fin         | 1 à 1.5           |

Tableau II.2. Classification des sables en fonction du module de finesse.

On a obtenu pour le sable testé un module de finesse  $MF=2.18$ ,

ce qui nous donne une indication sur :

La grosseur du sable.  $MF < 2,5$  C'est un sable moyen

### II.2.1.3. Propreté « équivalent de sable » (NF PI8-590):

Il permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique, plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston selon la norme NF-18-598 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai [20].

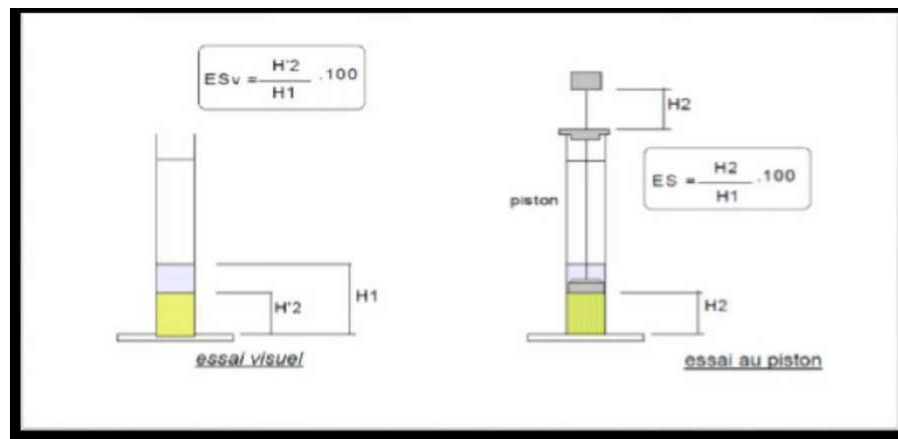


Figure II.3. Essais d'équivalent de sable

- **Mode opératoire :**
  - ✓ Remplir les éprouvettes avec la solution la vante, jusqu'au premier trait (trait inférieur).
  - ✓ A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de  $120 \pm 1g$  dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
  - ✓ On laisse la prise d'essai reposer 10 min.
  - ✓ Après le repos, on bouche l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc, puis on la fixe horizontalement sur l'agitateur qui le fait remuer 90 cycles (allers retours en 30 secondes).
  - ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vante au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
  - ✓ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant

au tube un léger piquage

✓ Après 20 min de dépôt, on mesure à l'aide d'une règle les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$

$h_1$  : la hauteur entre le niveau supérieur du floculat et le fond de l'éprouvette.

$h_2$  : hauteur entre le niveau de la couche inférieure et le de l'éprouvette, Et

on calcul  $E_{sv}$ .

$$E_{sv} = h_2 / h_1 \times 100 \%$$

On détend lentement le piston taré jusqu'à ce qu'il repose sur le sable sédiment, puis on le fixe grâce au manchon, et on retire, après ; on lit la hauteur  $h_2$  au niveau supérieure du manchon, Et on calcul  $E_{sp}$ .

$$E_{sp} = h'_2 / h_1 \times 100\%$$

Avec :

$h_1$ : hauteur du sable plus floculat.

$h'_2$ : hauteur du sable.

- **Interpretation des résultats:**

| $E_{sv}$              | $E_{sp}$              | Nature et qualité de sable  |
|-----------------------|-----------------------|---|
| $E_s < 65$            | $E_s < 60$            | <b>Sable argileuse</b> : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.   |
| $65 < E_s < 75$       | $65 < E_s < 70$       | <b>Sable légèrement argileux</b> : de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.         |
| $75 \leq E_s \leq 85$ | $70 \leq E_s \leq 80$ | <b>Sable propre</b> : à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.   |
| $E_s \geq 85$         | $E_s \geq 85$         | <b>Sable très propre</b> : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau. |

**Tableau II.3. Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable  $E_{sv}$  et  $E_{sp}$ .**

| N° échantillon   | 1            | 2     | 3     |
|------------------|--------------|-------|-------|
| h1               | 11,4         | 11,3  | 11,5  |
| h2               | 8,6          | 8,5   | 8,6   |
| Esv %            | 75,43        | 75,22 | 74,78 |
| <b>Esv moy %</b> | <b>75,14</b> |       |       |
| h'2              | 8,1          | 8     | 8,2   |
| Esp%             | 71,05        | 70,79 | 71,3  |
| <b>Esp moy %</b> | <b>71,04</b> |       |       |

**Tableau II.4. Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune**

Le sable testé donne les résultats suivants :

**Esv=75,144(%)**

**Esp=71,04(%)**

Les essais réalisés ont montré que les sables présentent des faibles pourcentages de fines argileuses et par conséquent ils sont conclus convenables pour le BCR.

#### **II.2.1.4. Masse volumique absolue (NF P 18-555):**

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend trois (03) échantillons de masse 300g. On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 300ml d'eau préparé préalablement dans deuxième récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable- eau soit (V) ce volume. Sachant que le volume ( $V_1$ ) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume de sable :  $V_1 = V - 300$  (ml)

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$\rho_{abs} = M/V_1$$

### II.2.1.5. Masse volumique apparente (NF P 18-554) :

#### a) Masse volumique à l'état compact:

C'est la masse du matériau par unité de volume après remplissage du récipient et compactage par tassement à 30 secousses manuelles, jusqu'au remplissage du récipient, après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit  $M_2$  la masse de l'ensemble (sable + récipient)  $M_1$  la masse du récipient. La masse volumique à l'état compact est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

$M_1$  : Masse du récipient vide.

$M_2$  : Masse du récipient plus le sable.  $V_r$  : Volume du récipient ( $V_r = 1L$ ).

#### b) Masse volumique à l'état lâche:

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé et un récipient de capacité 1L. On remplit l'entonnoir avec du sable sec. On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable. On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit  $M_2$  ce poids. La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

On note ici que les résultats présentés dans le tableau (II.5) ci-dessous sont calculés comme moyennes des essais effectués en laboratoire après avoir fait l'échantillonnage.

| Masse volumique apparente (kg/dm <sup>3</sup> ) | Masse volumique Absolue (kg/dm <sup>3</sup> ) | Masse volumique à l'état lâche (kg/dm <sup>3</sup> ) | Masse volumique à l'état compact (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---|---|--|--|
| 1.40  | 2.5   | 1.53   | 1.58   |
| Compacité (%)                                   |   | Porosité (%)   | Indice des vides (%)                                   |
| 61.25   |   | 40.15  | 65.35  |

Tableau II.5. Caractéristique physiques du sable de dune (BOUSAADA).

## II.2.2. Caractéristiques des graviers:

Les granulats sont caractérisés par des spécificités qu'ils doivent satisfaire pour réaliser une bonne utilisation dans différents domaines. Ces spécifications dites caractéristiques des granulats sont bornées par des normes et des exigences. Elles servent à prendre en compte l'utilisation, la fiabilité, l'économie en se basant sur les recherches et les expériences scientifiques.

Les fractions utilisées appartiennent à la plage 3-20 mm soit : **(3/8), (8/15) et (15/20)**.

### II.2.2.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560):

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. L'essai 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 les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

La quantité à utiliser doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée doit répondre au critère suivant :  **$M > 0,2D_{max}$**

**$D_{max}$** : diamètre maximal du gros granulat en mm.

**$M$**  : la masse de l'échantillon en (kg).

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil ensuite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois [23].

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux (II.6 ; II.7 ; II.8). Les courbes granulométriques de différentes fractions similaires utilisées sont tracés dans la figure (II.4).

| Analyse granulométrie de G 3/8 M=1600g |            |                  |                  |                   |                     |
|--|------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Module AFNOR                           | Tamis (mm) | Refus partiel(g) | Refus cumulés(g) | Refus Cumulés (%) | Tamisat cumulés (%) |
| 41                                     | 10         | 0                | 0                | 0                 | 100                 |
| 40                                     | 8          | 88,3             | 88,3             | 5,52              | 94,48               |
| 39                                     | 6,3        | 277,8            | 366,1            | 22,89             | 77,11               |
| 38                                     | 5          | 359,9            | 726              | 45,38             | 54,62               |
| 35                                     | 2,5        | 743,9            | 1469,9           | 91,87             | 8,13                |
| 32                                     | 1,25       | 110,5            | 1580,4           | 98,78             | 1,22                |
| -                                      | Fond       | 19,5             | 1599,9           | 99,993            | 0,07                |

Tableau II.6. L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8).

| Analyse granulométrie de G 8/15 M=3000 g |            |                  |                  |                   |                     |
|--|------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Module AFNOR                             | Tamis (mm) | Refus partiel(g) | Refus cumulés(g) | Refus Cumulés (%) | Tamisat cumulés (%) |
| 44                                       | 20         | 0                | 0                | 0                 | 100                 |
| 43                                       | 16         | 0                | 0                | 0                 | 100                 |
| 42                                       | 12,5       | 875              | 875              | 29,17             | 70,83               |
| 41                                       | 10         | 988,9            | 1863,9           | 62,13             | 37,87               |
| 40                                       | 8          | 667,3            | 2531,2           | 84,38             | 15,62               |
| 39                                       | 6,3        | 410,2            | 2941,4           | 98,05             | 1,95                |
| -  | Fond       | 58               | 2999,4           | 99,98             | 0,02                |

Tableau II.7. L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15).

| Analyse granulométrie de G 15/20 M=5000 g |            |                  |                  |                   |                     |
|---|------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| Module AFNOR                              | Tamis (mm) | Refus partiel(g) | Refus cumulés(g) | Refus cumulés (%) | Tamisat cumulés (%) |
| 45  | 25         | 47,2             | 47,2             | 1,95              | 99,05               |
| 44  | 20         | 1122,4           | 1169,6           | 23,40             | 76,60               |
| 43  | 16         | 3111             | 4280,6           | 85,62             | 14,38               |
| 42  | 12,5       | 591,1            | 4871,7           | 97,44             | 2,56                |
| 41  | 10         | 92,9             | 4964,6           | 99,30             | 0,70                |
| -   | Fond       | 33,9             | 4998,5           | 99,97             | 0,03                |

Tableau II.8. L'analyse granulométrique de gravier (15/20).

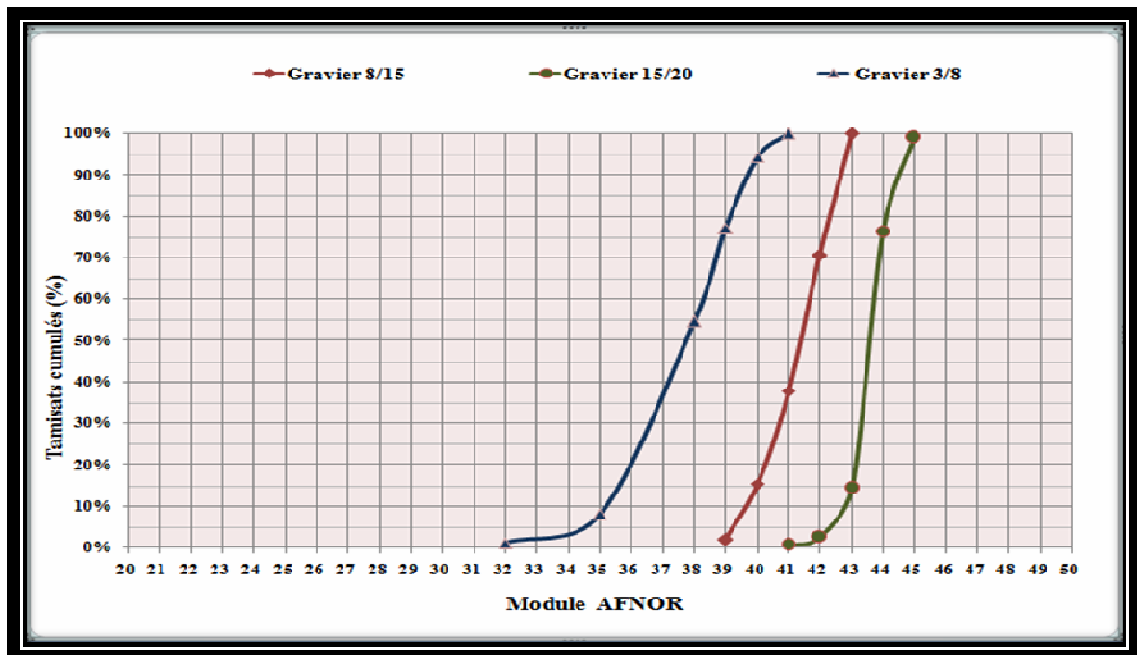


Figure II. 4. Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/15), (15/20).

#### II.2.2.2. Masse volumique:

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

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

| Gravier | $M_2$ (kg) | $M_1$ (kg) | V (L) | $\rho_{app}$ (kg/L) | $\rho_{app}$ (kg/L) |
|---------|------------|------------|-------|---------------------|---------------------|
| (3/8)   | 7.550      | 0.841      | 5     | 1.34                | 1.34                |
|         | 7.531      |            |       | 1.33                |                     |
|         | 7.620      |            |       | 1.35                |                     |
| (8/15)  | 7.681      | 0.841      | 5     | 1.36                | 1.37                |
|         | 7.775      |            |       | 1.38                |                     |
|         | 7.691      |            |       | 1.37                |                     |
| (15/20) | 7.941      | 0.841      | 5     | 1.420               | 1.40                |
|         | 7.841      |            |       | 1.401               |                     |
|         | 7.741      |            |       | 1.400               |                     |

Tableau II.9. La masse volumique apparente à l'état lâche des graviers.

| Gravier | M (g) | V <sub>1</sub> (ml) | V <sub>2</sub> (ml) | ρ <sub>abs</sub> (kg/L) | ρ <sub>abs</sub> (kg/L) |
|---------|-------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| (3/8)   | 300   | 300                 | 415                 | 2.60                    | 2.60                    |
|         |       |                     | 415                 | 2.60                    |                         |
|         |       |                     | 415                 | 2.60                    |                         |
| (8/15)  |       |                     | 415                 | 2.60                    | 2.60                    |
|         |       |                     | 415                 | 2.60                    |                         |
|         |       |                     | 415                 | 2.60                    |                         |
| (15/20) |       |                     | 415                 | 2.60                    | 2.60                    |
|         |       |                     | 416                 | 2.58                    |                         |
|         |       |                     | 414                 | 2.62                    |                         |

Tableau II.10. Masse volumique absolue des graviers.

**II.2.2.3. La porosité:**

C'est le rapport du volume des vides d'un matériau et son volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides. La porosité est exprimée en pourcentage (%) et définie par la relation :

$$P(\%) = \frac{1 - \rho_{app}}{\rho_{abs}} \times 100$$

**II.2.2.4. La compacité:**

C'est le quotient du volume des grains solides et le volume total du matériau, elle est exprimée en pourcentage (%) et donnée par la relation suivante :

$$C = (\rho_{app} / \rho_{abs}) = 100 - P$$

**II.2.2.5. L' indice des vides:**

C'est le rapport entre le volume occupé par les vides et le volume de la partie solide des grains, V étant le volume total occupé par les granulats.

$$e = \frac{P}{100 - P}$$

Les grandeurs de la porosité, la compacité et l'indice des vides des granulats sont rapportées sur le tableau suivant :

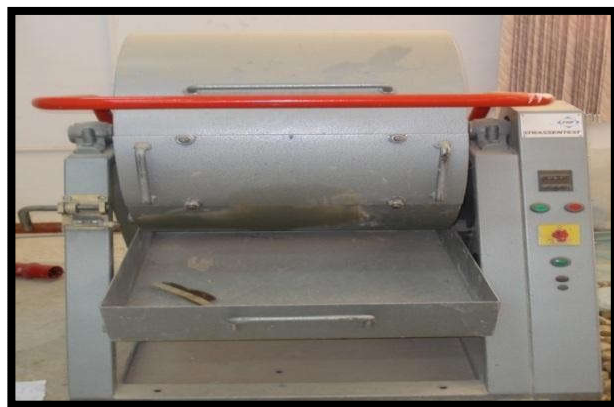
| Fraction de gravier | Porosité (%) | Compacité (%) | l'indice de vide |
|---------------------|--------------|---------------|------------------|
| 3/8                 | 48.41        | 51.58         | 0.938            |
| 8/15                | 48.20        | 51.79         | 0.930            |
| 15/20               | 47.80        | 52.19         | 0.915            |

**Tableau II.11. Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé.**

### **II.2.2.6. La résistance à la fragmentation par chocs, essai Los Angeles (NFP18-573):**

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

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



**Figure II.5. Appareil de l'essai Los Angeles.**

#### **Principe de l'essai :**

- L'essai consiste à mesurer la masse  $m$  d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits

par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

**Formulation :**

- Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles  $L_A$  :  $L_A = (m/M) \cdot 100$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

| Fraction de Gravier | Nombre de boules | M (Kg) | m (Kg) | Coef $L_A$ % |
|---------------------|------------------|--------|--------|--------------|
| Gravier 3/8         | 7                | 5      | 1.050  | 21%          |
| Gravier 8/15        | 11               | 5      | 0.942  | 19%          |
| Gravier 15/20       | 12               | 5      | 1.149  | 22%          |

**Tableau II.12. Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.**

- **Classification:**

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

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

**Tableau II.13. Classification des roches en fonction du coefficient  $L_A$**

- ❖ **Commentaire:**

- Le gravier (3/8) : c'est un gravier dure ( $L_A=21\%$ ) / ( $L_A$  entre 20 à 25),
- Le gravier (8/15) : c'est un gravier très dure ( $L_A=19\%$ ) / ( $L_A < 20$ ),
- Le gravier (15/20) : c'est un gravier dure ( $L_A=22\%$ ) / ( $L_A$  entre 20 à 25)

### II.2.3. Caractéristiques du ciment utilisé:

Le ciment utilisé dans cette recherche est portland composé classe 42.5 présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301194 provient de la cimenterie Lafarge de M'sila.

#### II.2.3.1. Caractéristiques physiques:

|                             |          | Unité              | Valeur              |
|-----------------------------|----------|--------------------|---------------------|
| Masse volumique absolue     |          | g/cm <sup>3</sup>  | <b>3.1</b>          |
| Consistance normale         |          | %                  | <b>25%</b>          |
| La finesse (blaine)         |          | cm <sup>2</sup> /g | <b>3000-3200</b>    |
| Le chatelier                | A froid  | mm                 | <b>00</b>           |
|                             | A chaud  |                    | <b>2</b>            |
| Temps de prise              | Début    | min                | <b>2:30</b>         |
|                             | Fin      |                    | <b>3:30</b>         |
| Résistance a la compression | 2 jours  | MPa                | <b>18</b>           |
|                             | -        |                    | -                   |
|                             | 28 jours |                    | <b>Plus de 42.5</b> |

Tableau II.14. Caractéristiques physique du CPJ -CEM II/B 42,5 R

#### II.2.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ -CEM II/B 42,5 R:

| Oxyde    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO          | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO         | So <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------|-----------------|-------------------|
| Teneur % | <b>20.7</b>      | <b>4.75</b>                    | <b>62.92</b> | <b>3.75</b>                    | <b>1.90</b> | <b>1.98</b>     | <b>0.09</b>       |

Tableau II.15. Les compositions chimiques du CEM II/B 42,5 R

- La composition chimique est établie par laboratoire de cimenterie Lafarge de M'sila

### II.2.3.3. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CEM II/B 42,5 R:

Selon la méthode de bogue, La composition minéralogique de ciment CEM II/B42.5R

donnée :

| Elements | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C3A | C <sub>4</sub> AF |
|----------|------------------|------------------|-----|-------------------|
| Teneur % | 59               | 14               | 6   | 21                |

Tableau II.16. Les compositions minéralogiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R.

### II.2.4. Eau de gâchage:

Il s'agit de l'eau du robinet de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

#### II.2.4.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisé:

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 10/05/2005, au laboratoire de chimie (M'Sila). Elle est donnée par:

| La mesure                            | Teneur en (mg/l)  |
|--------------------------------------|-------------------|
| Le temps de prise d'échantillon      | 10/05/2005(9 :25) |
| Degré de température                 | 24.7              |
| PH                                   | 7.78              |
| Conductibilité                       | 1799              |
| Chlore Cl <sup>-</sup>               | 234.3             |
| Sulfate So <sub>4</sub> <sup>-</sup> | 351.6             |
| Magnésium Mg <sup>2+</sup>           | 110.8             |
| Sodium Na <sup>+</sup>               | /                 |
| Calcium Ca <sup>2+</sup>             | 267.2             |
| Sédiment sec                         | 1412              |
| Rééligibilité d'oxydation en eau     | 1024              |

Tableau II.17. Caractéristiques chimiques de l'eau de gachage.

## II.3 FORMULATION DU BCR :

### II.3.1. Fuseau granulométrique:

Pour choisir les pourcentages de différentes fractions d'agrégats il faut que la courbe combinée soit à l'intérieur du fuseau, les résultats sont représentés dans le tableau II.18 et la figure II.6.

| tamis<br>(mm) | sable | G 3/8 | G 8/16 | G 16/20 | Combine |
|---------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| 20            | 100   | 100   | 100    | 76,60   | 97,66   |
| 16            | 100   | 100   | 100    | 14,38   | 91,44   |
| 12,5          | 100   | 100   | 70,83  | 2,56    | 84,42   |
| 10            | 100   | 100   | 37,87  | 0,70    | 77,64   |
| 8             | 100   | 94,48 | 15,62  |         | 71,54   |
| 6,3           | 100   | 77,11 | 1,95   |         | 63,59   |
| 5             | 95,75 | 54,62 |        |         | 55,15   |
| 2,5           | 83,14 | 8,13  |        |         | 36,16   |
| 1,25          | 74,87 |       |        |         | 30,77   |
| 0,63          | 64,31 |       |        |         | 26,55   |
| 0,315         | 47,80 |       |        |         | 19,95   |
| 0,16          | 16,37 |       |        |         | 7,37    |
| 0,08          | 1,56  |       |        |         | 1,45    |
| Fond          | 0     |       |        |         | 0       |

Tableau II.18. Tamisât de différentes fractions d'agrégats

### II.3.2. La courbe combinée:

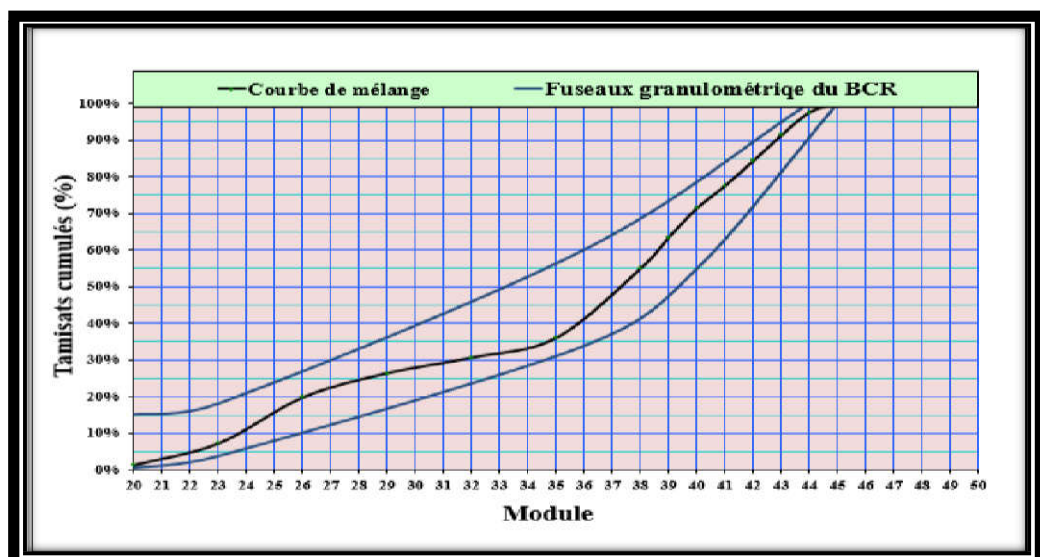
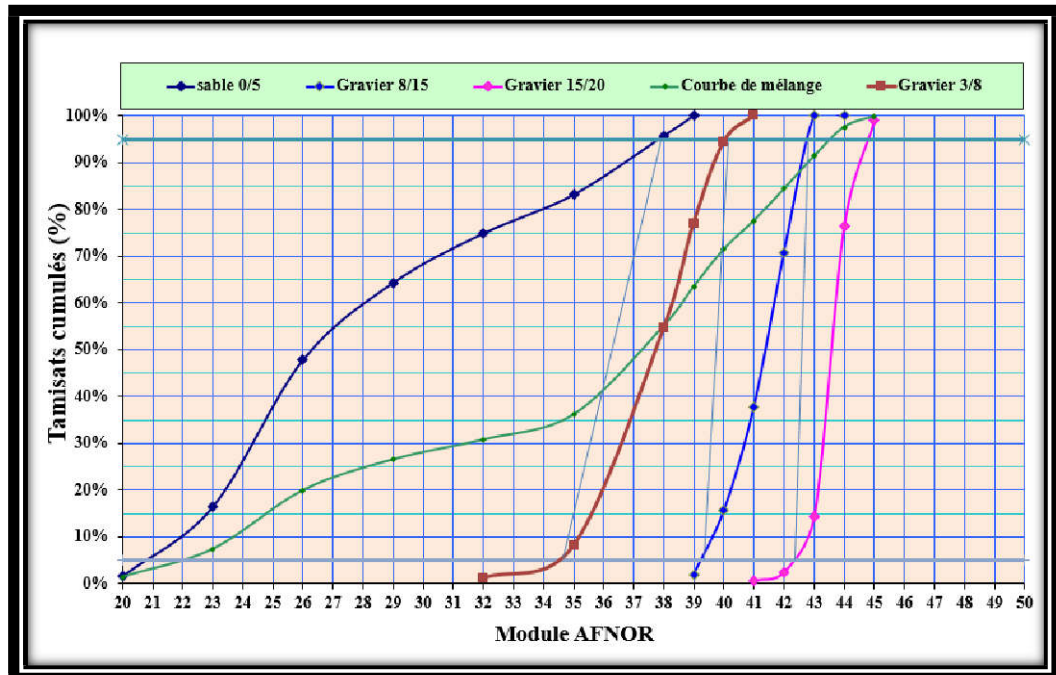


Figure II.6. Fuseau granulaire.

**II.3.3. Pourcentage des granulats:**



**Figure II.7. détermination des pourcentages des différentes fractions des granulats.**

D'après le fuseau granulaire correspondant au mélange, nous avons obtenu les pourcentages des différentes fractions des granulats tels que montrés dans la figure II.7

|               |     |
|---------------|-----|
| Sable de dune | 40% |
| Gravier 3/8   | 30% |
| Gravier 8/15  | 20% |
| Gravier 15/20 | 10% |

**Tableau II.19. Pourcentage des granulats.**

**II.3.4. Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment:**

La quantité d'eau optimale est déterminée à l'aide de l'essai de marteau piqueur Hilti. Cette méthode permet de sélectionner la teneur en eau qui correspond à la masse volumique sèche maximale.



Figure II.8. Marteau piqueur Hilti.

- **Conduite de l'essai:**

- ✓ Premièrement, la proportion des granulats fins par rapport aux granulats grossiers est déterminée par les fuseaux granulométriques donnés à la figure II.6.
- ✓ Une série de mélanges de béton à différentes teneurs en liant avec trois teneurs en eau (4, 5, 6%) sont réalisés. La quantité de liant varie entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. Les résultats sont regroupés dans le tableau II.19.
- ✓ Le moule a un volume de 0,00157 m<sup>3</sup>, la masse des granulats utilisée pour chaque gâchis est de 4.790 Kg après séchage à l'étuve pendant 24 heures afin de déterminer une teneur en eau précisée.

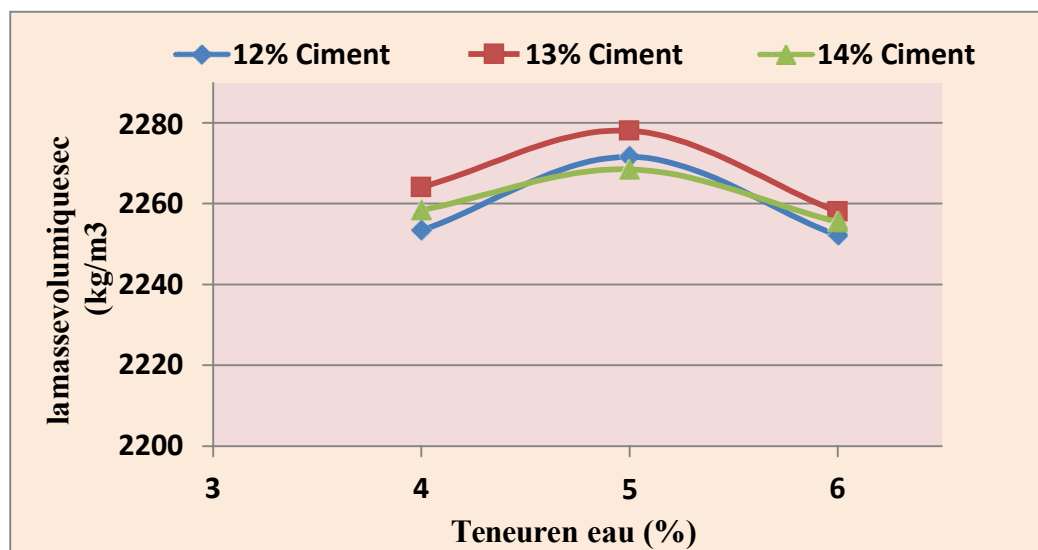
| 12% Ciment |         |            |           |           |           |            |
|------------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| mode       | Eau (%) | Ciment(kg) | Sable(kg) | G3/8 (kg) | G8/15(kg) | G15/20(kg) |
| 1          | 4       | 0.574      | 1.978     | 1.100     | 1.028     | 0.688      |
| 2          | 5       |            |           |           |           |            |
| 3          | 6       |            |           |           |           |            |
| 13% Ciment |         |            |           |           |           |            |
| mode       | Eau (%) | Ciment(kg) | Sable(kg) | G3/8 (kg) | G8/15(kg) | G15/20(kg) |
| 1          | 4       | 0.623      | 1.978     | 1.100     | 1.028     | 0.688      |
| 2          | 5       |            |           |           |           |            |
| 3          | 6       |            |           |           |           |            |
| 14% Ciment |         |            |           |           |           |            |
| mode       | Eau (%) | Ciment(kg) | Sable(kg) | G3/8 (kg) | G8/15(kg) | G15/20(kg) |
| 1          | 4       | 0.670      | 1.978     | 1.100     | 1.028     | 0.688      |
| 2          | 5       |            |           |           |           |            |
| 3          | 6       |            |           |           |           |            |

Tableau.II.20. Les quantités des granulats, ciment et d'eau pour les mélanges de BCR.

| 12% ciment                                    |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|
| Teneur en eau (%)                             | 4       | 5       | 6       |
| Volume de moule                               | 0,00157 | 0,00157 | 0,00157 |
| Masse volumique frais                         | 2310,15 | 2356,35 | 2328,35 |
| Masse volumique sec                           | 2253,35 | 2271,65 | 2252,16 |
| Résistance à la compression en Mpa (07 jours) | 14,15   | 18,23   | 15,45   |
| 13% ciment                                    |         |         |         |
| Teneur en eau (%)                             | 4       | 5       | 6       |
| Volume de moule                               | 0,00157 | 0,00157 | 0,00157 |
| Masse volumique frais                         | 2348,05 | 2378,53 | 2331,14 |
| Masse volumique sec                           | 2264,12 | 2278,13 | 2258,05 |
| Résistance à la compression en Mpa (07 jours) | 15,82   | 20,78   | 16,22   |
| 14% ciment                                    |         |         |         |
| Teneur en eau (%)                             | 4       | 5       | 6       |
| Volume de moule                               | 0,00157 | 0,00157 | 0,00157 |
| Masse volumique frais                         | 2334,12 | 2363,38 | 2362,23 |
| Masse volumique sec                           | 2258,42 | 2268,56 | 2255,52 |
| Résistance à la compression en Mpa (07 jours) | 15,54   | 19,56   | 18,82   |

**Tableau II.21. Résultats de la formulation aux différents dosages en ciment et teneurs en eau.**

La relation entre la masse volumique sèche et teneur en eau à chaque pourcentage du ciment est mise en graphique, comme montré à la Figure II.9, la valeur maximale sur la courbe correspond ; en abscisse : à la teneur en eau optimale permettant d'obtenir le mélange à masse volumique sèche la plus grande.



**Figure II.9. la densité sèche en fonction de la teneur en eau et le dosage de ciment.**

- **Commentaire et discussion des résultats:**

A partir des résultats représentés ci-dessus nous tirons les observations suivantes

- :
- ✓ Pour la teneur en eau ; les résultats obtenus aux dosages en ciment 12 et 14 % montrent que l'optimum est compris entre 5 et 6%,
  - ✓ En ce qui concerne la densité, les résultats obtenus montrent une densité du BCR plus élevée avec 13 et surtout 14 % en ciment.
  - ✓ En ce qui concerne les dosages en ciment, la valeur ayant conduit aux résultats les plus satisfaisants et requise pour notre béton est : 13% : tant pour la résistance (20,78MPa) que pour la masse volumique 2378,53kg/m<sup>3</sup>

Sur la base de ce qui a précédé nous avons opté pour :

- Une teneur en eau optimal égale à 5 % de la masse total des agrégats secs.
- Un dosage en ciment égale à 13% de la masse total des agrégats secs.

### II.3.5. Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR:

Après la détermination de la teneur en eau 5% et le dosage du ciment 13% les pourcentages des constituants de formulations du BCR dans un mètre cube (1m<sup>3</sup>) deviennent comme suit:

|                  |      |
|------------------|------|
| <b>Sable de</b>  | 33.9 |
| <b>Gravier3/</b> | 27%  |
| <b>Gravier8/</b> | 14.8 |
| <b>Gravier15</b> | 11.3 |
| <b>Ciment</b>    | 13%  |
| <b>Eau</b>       | 5%   |

Tableau II.22. Pourcentage des constituants de BCR dans un (m<sup>3</sup>).

| Matériaux   | Sable | Gravier3/ | Gravier8/1 | Gravier15/2 | Cimen | Eau |
|-------------|-------|-----------|------------|-------------|-------|-----|
| Quantité en | 732   | 586       | 322        | 246         | 291   | 109 |

Tableau II.23. Les quantités des constituants de BCR dans un (m<sup>3</sup>).

#### II.4. Le laitier de haut fourneau:

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Après le broyage, il se présente sous forme de nodules dont les diamètres sont compris entre 10 et 45  $\mu\text{m}$ . La composition chimique de laitier comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [G. Dreux & J. Festa, 1998].

Le laitier granulé broyé est considéré comme un véritable ciment car il suffit d'ajouter un catalyseur activant pour amorcer la prise et le développement des résistances mécaniques [M. Venuat. 1989].

Les laitiers de haut fourneau trouvent leur utilisation surtout dans les ciments et pour les travaux routiers. Il existe d'autres laitiers métallurgiques provenant de métaux non ferreux et qui pourraient être utilisés [Moll H.L, 1964].

Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke que l'on utilise pour réduire l'oxyde de fer se retrouvent dans le laitier de haut fourneau, comme ces impuretés pourraient avoir un point de fusion très élevé si l'on n'ajustait pas leur composition chimique, on ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie du diagramme  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (figure 1-1.).

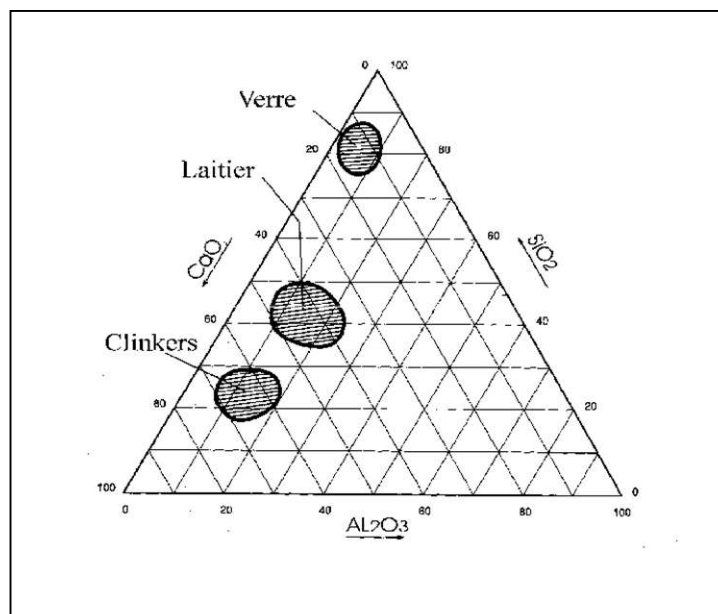
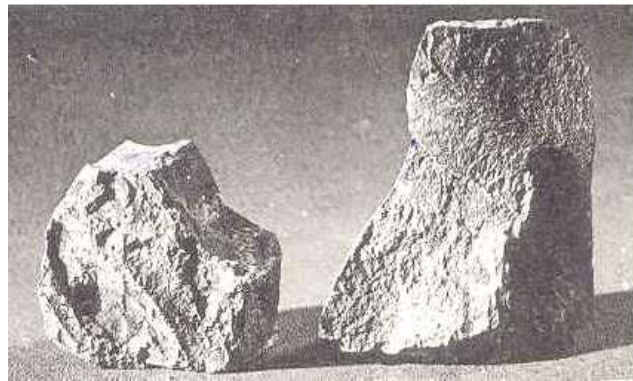


Figure II.10 Plage de laitier dans le diagramme de RANKIN d'après [Venuat 1989].

Zone où la température de fusion de ces trois oxydes est parmi la plus basse. Ainsi du point de vue chimique, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte [Aitcin P.C, 2000]. Le laitier fondu a une densité plus faible (de l'ordre de 2,8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7) de telle sorte que le laitier fondu flotte au dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut soutirer ces deux liquides séparément [Aitcin P.C, 2000].

La quantité de laitier recueillie par tonne de fonte varie suivant les minerais utilisés et les régions de production [Moll H.L, 1964].



**Figure II.11. Laitier cristallisé d'après [Venuat M, 1989]**



**Figure II.12. Laitier granulé d'après [Venuat M; 1989].**

La composition chimique des laitiers de haut fourneau est déterminée à partir:

- du Combustible utilisé.
- du métal à obtenir.
- des conditions de refroidissement [Locher, F.w, 1968.].

### **II.5. Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température :**

Le béton est le matériau le plus fréquemment utilisé dans le domaine de la construction. Il se caractérise, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young.

En situation d'incendie, le béton est exposé à des températures élevées qui entraînent un certain nombre de transformations physico-chimiques et microstructurales qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température.

Pendant ces dernières années, plusieurs équipes de différents pays se sont investies dans la réalisation des essais sur les différents types de béton soumis à hautes températures. Les résultats de ses essais interprètent différemment les évolutions des propriétés mécaniques du béton. Ces différences ne sont pas dues seulement au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme le régime d'échauffement et refroidissement, la géométrie des éprouvettes, la présence de la charge mécanique et histoire de son application, le moment de la réalisation d'essai : à chaud ou après refroidissement, etc.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec une élévation de température.

- **Résistance en compression à hautes températures :**

La résistance en compression est la principale caractéristique utilisée pour faire la distinction entre les différents types de béton. Elle est aussi utilisée pour caractériser l'évolution des propriétés mécaniques des bétons avec la température.

Tous les auteurs, qui ont étudié l'influence de la température sur la résistance à la compression du béton, s'accordent sur le fait que cette dernière varie en fonction de la température. Ils ont également montré une diminution graduelle de cette résistance avec la température. La principale raison de la diminution de la résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par dés'hydratation.

La figure I.23 regroupe les résistances en compression déterminées à chaud obtenues par Phan [Phan et Carino, 2003] et comparées à celles obtenues par d'autres chercheurs.

On peut observer une importante dispersion des résultats pour un chauffage à 150°C. Les bétons présentent un gain de résistance de l'ordre de 20 % ou une perte de résistance allant jusqu'à 30 %. La principale raison de la diminution de la résistance en compression, entre 100 et 150°C, est la dilatation thermique de l'eau qui peut entraîner un écartement des feuillettes du gel de CSH. Cet écartement provoque une diminution des forces d'attraction entre ces feuilles [Hager, 2004], [Mindeguia, 2009]. De 200 à 400°C, la résistance en compression augmente.

## **CHAPITRE III**

### **COMPOSITION ET ESSAIS SUR BCR**

### III .L INTRODUCTION

Dans ce chapitre, la méthode de formulation d'un béton compacté au rouleau a été présentée, l'influence de la température sur le comportement d'un béton compacté au rouleau a été étudié l'effet de l'addition de laitier de haut fourneau (laitier broyé) avec des différentes teneur par rapport au poids de a été aussi examiné.

Le travail présenté est une recherche expérimentale. nous avons réalisées des essais sur le béton à l'état frais (Essai de consistance, Essai de vété , la masse volumique )

Aussi que des essais à l'état durci (Résistance à la compression, Teneur en eau, et la Pert de masse) en tenant compte les deux paramètres variables (température et teneur en laitier).

Le laitier prendre comme un pourcentage de le ciment

#### III.1. CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES:

Notre béton étudié a été confectionné en éprouvettes cubique ( 54 éprouvettes dde forme cubique 10 x 10 x 10 cm).

Dans ce travail a été organisé suivant le tableau ci dessous :

| Teneur en laitier | T=20°C | T=300°C | T=400°C | T=500°C | T=600°C | teneur en eau |
|-------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| 0%                | 03     | 03      | 03      | 03      | 03      | 03            |
| 5%                | 03     | 03      | 03      | 03      | 03      | 03            |
| 10%               | 03     | 03      | 03      | 03      | 03      | 03            |

**Tableau.III.1** : Nombre les 'éprouvettes pour les'essai

Après la conservation à l'air libre dans le laboratoire pendant pendant 28 jours à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , les éprouvettes ont été étuvées par la suite dans une four. Finalement les éprouvettes ont été exposées à des hautes températures variants de  $300^\circ\text{C}$  à  $600^\circ\text{C}$  dans une four avec une vitesse de la montée en température de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  et un maintien en température dans le four à moufle pendant 1 heure.

Le procédé expérimental appliqué après repose et refroidissement tous l'éprouvettes (après 24 heures à l'air libre ) et écrasement après refroidissement .

## **III.2. PROCEDURES D'ESSAIS REALISES :**

### **III.2.1. Essais sur le béton frais :**

#### **III.2.1.1. Maniabilité (ouvrabilité) du béton essai de vébé ( NF en 12350-3 ) :**

Compte tenu de la consistance sèche du BCR à l'état frais, la mesure de sa consistance à l'aide des essais utilisés pour le BC n'est pas applicable, la maniabilité du BCR est par conséquent mesurée à l'aide de l'appareil VEBE modifiée [1].

Cet essai est particulièrement utile pour tester les bétons de faible ouvrabilité.

La dimension des granulats ne doit pas dépasser 40 mm.

#### **a) Principe de l'essai :**

Dans cet essai, la consistance est définie par le temps que met un cône de béton à remplir un volume connu sous l'effet d'une vibration donnée. Plus ce temps est court et plus le béton sera considéré comme fluide.

#### **b) Matériel nécessaire :**

L'appareillage est entièrement décrit dans la norme ISO4110. Il est constitué d'un consistomètre Schématisé sur figure III.16 et comportant les éléments suivants :

- Un récipient cylindrique de 24 cm de diamètre et de 20 cm
- Un cône d'Abrams.
- Un disque horizontal transparent de 23 cm De diamètre.
- Une table vibrante équipée d'un vibreur
- Fonctionnant à la fréquence de 3000 vibrations par minute et conférant à la table des mouvements d'une amplitude verticale de + 0.5mm environ.
- Une tige de piquage.

#### **c) Conduite de l'essai :**

Le cône d'Abrams est fixé à l'intérieur du récipient cylindrique. Le béton est mis en place dans ce cône. Le cône d'Abrams est alors soulevé et, à ce stade de l'essai, il est donc possible de mesurer l'affaissement au cône comme indiqué précédemment. L'essai se poursuit ensuite

par la vibration de la table durant un temps tel que la face supérieure du béton soit entièrement aplanie et au contact du disque transparent accompagne la descente du béton pendant le compactage

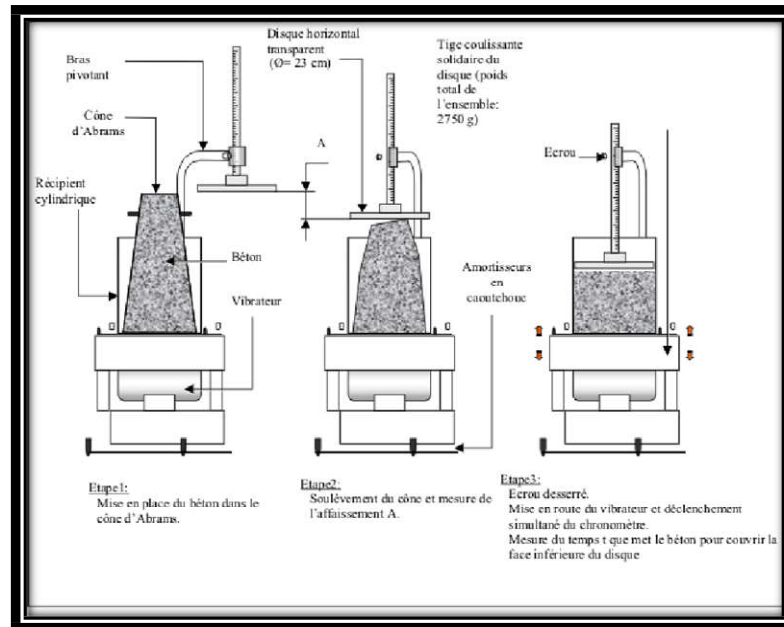


Figure III.1. Mesure de la consistance (Essai Vébé).

L'expérience en chantier a montré que la maniabilité du BCR doit être généralement comprise entre 40 et 90 secondes (temps VEBE) au moment de la mise en place du BCR. Le délai maximal pour la mise en place du béton, depuis le contact initial eau/liant, est de 60 minutes.

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| $t > 31 \text{ s}$                | <b>Béton très sec</b>    |
| $21 \text{ s} < t < 30 \text{ s}$ | <b>Béton sec</b>         |
| $11 \text{ s} < t < 20 \text{ s}$ | <b>Béton plastique</b>   |
| $5 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$  | <b>Béton fluide</b>      |
| $t < 4 \text{ s}$                 | <b>Béton très fluide</b> |

Tableau III.1. Classes de consistance Vébé en fonction du temps t.

**III.2.1.2. La masse volumique sur béton frais (NF en 12350-6) :**

La mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais permet de vérifier l'uniformité de la production et sert de valeur de référence pour évaluer le niveau de compactage du matériau en place. Elle permet également de comparer la valeur de la masse volumique humide expérimentale à la valeur théorique.

**III.2.2 Essais sur le béton durci:****III.2.2.1. La masse volumique sur béton durci (NF en 12390-7):****a) La masse volumique :**

La masse volumique du béton est un facteur très important, qui influe directement sur la qualité du béton. Pour obtenir un béton de bonne qualité il faut contrôler bien leur masse volumique puisque une diminution dans la masse volumique de béton entraîne une structure poreuse de béton, ce qui nous permet de donner un jugement négatif sur la qualité de béton.

**b) Objectif de l'essai :**

Dans cette partie de ce travail, on a fait cet essai pour étudier l'effet de variation de température sur la masse volumique du béton.

**c) Principe de l'essai :**

Cet essai consiste à mesurer le rapport de poids sur le volume de l'éprouvette de béton à on a mesuré la masse volumique pour chaque type variation de température ( $T=20^{\circ}\text{C}$  ,  $T=300^{\circ}\text{C}$  ,  $T=400^{\circ}\text{C}$  ,  $T=500^{\circ}\text{C}$  ,  $T=600^{\circ}\text{C}$ )

Voir été essuyées ou nettoyées, les éprouvettes sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000 la masse volumique est alors calculée en divisant sa le volume de l'éprouvette.

C'est-à-dire:  $\gamma = M/V$ .

La masse volumique exprimée en  $\text{kg/m}^3$  car la densité.



Figure III.2. éprouvettes de forme cubiques 10 x 10 x 10 cm en BCR.

### III.2.2.2. Perte de masse (NF P 98-340/CN)

Afin de déterminer l'évolution de la perte de masse du béton en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, toutes les éprouvettes cubiques sont pesées avant et tout de suite après le cycle thermique. Le fait de peser l'éprouvette tout de suite après la sortie du four permet d'éviter d'intégrer un éventuel gain de poids dû à une réhydratation.

Les masses avant et après le chauffage sont mesurées à l'aide d'une balance d'une capacité de 25 kg et d'une précision de 0,1 kg. La perte de masse pour une formulation est déterminée par la moyenne des pertes de masse de toutes les éprouvettes chauffées. La perte de masse est exprimée en pourcentage massique, [21] obtenu selon le calcul suivant :

$$\text{perte de masse} = \frac{m_{\text{ambient}} - m_{\text{refroidissement}}}{m_{\text{ambient}}} \times 100$$

$m_{\text{ambient}}$  : la masse de l'éprouvette à température ambiante avant le chauffage,

$m_{\text{refroidissement}}$  : la masse de l'éprouvette après refroidissement à la sortie du four.

### III.2.2.3. Teneur en eau (NF EN 1097-5 )

Bien que protocole particulier de mesure de teneur en eau ( $W_0$ ), nous avons déterminé cette teneur en eau pour chaque série de béton ( 0% laitier , 5% laitier , 10% laitier ) sur des 'une éprouvette cubique . Après la mesure de leur masse humide ( $M_h$ ), les échantillons ont été

soumis à un séchage dans une étuve à 120°C jusqu'à ce que les pesées successives espacées de 24 heures ne se différencient pas de plus de 0,1 g (Ms). [22] La teneur en eau a été déterminée d'après la formule suivante :

$$Teneur\ en\ eau = \frac{(M_n - M_s)}{M_s} \times 100$$

#### III.2.2.4. Détermination de la résistance à la compression (NFP18-411):

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

##### a) Objectif de l'essai :

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes

##### b) Principe de l'essai :

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette

##### c) Equipement nécessaire :

Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412. Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes surfaçage au soufre, ou disque diamanté.[26]



Figure III.3.la presse d'essai



**Figure III.4. Four d'essai**

### **III.3 CONCLUSION :**

Dans ce travail expérimental, des analyses thermiques différentielles ont été l'objet d'une partie de cette étude afin de suivre l'évolution des phases solides présente dans le béton compacté au rouleau (BCR) lorsqu'il est exposé à des températures élevées.

**CHAPITRE IV**

**RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

**IV. INTRODUCTION :**

Ce chapitre contient les résultats obtenus d'après le plan expérimental d'essais puis suivi par la discussion de ces résultats.

**IV.1. RESULTATS D'ESSAIS SUR BETON FRAIS :****IV.1.1. La masse volumique de BCR:**

La masse volumique d'un béton représente un facteur important dans la détermination finale de la résistance. Elle peut donner un jugement préliminaire sur la qualité de béton.

En principe l'addition de laitier au mélange de béton ne change pas la masse volumique de ce dernier lorsqu'il est ajouté avec une teneur faible (inférieure ou égale 10%).

Notre but dans cette partie est de voir la masse volumique d'un BCR avec l'ajout de laitier allant de 0% à 10%.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessus et schématisés par la Figure. IV.1.

| <b>% de laitier</b> | <b>N° d'éprouvette</b> | <b>la masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>la masse volumique moy (Kg/m<sup>3</sup>)</b> |
|---------------------|------------------------|--|--|
| <b>0%</b>           | <b>1</b>               | <b>2462</b>                                  | <b>2463</b>                                      |
|                     | <b>2</b>               | <b>2465</b>                                  |  |
|                     | <b>3</b>               | <b>2463</b>                                  |  |
| <b>5%</b>           | <b>1</b>               | <b>2500</b>                                  | <b>2500</b>                                      |
|                     | <b>2</b>               | <b>2498</b>                                  |  |
|                     | <b>3</b>               | <b>2503</b>                                  |  |
| <b>10%</b>          | <b>1</b>               | <b>2510</b>                                  | <b>2510</b>                                      |
|                     | <b>2</b>               | <b>2508</b>                                  |  |
|                     | <b>3</b>               | <b>2514</b>                                  |  |

**Tableau. IV.1. Effet de la teneur en laitier sur la masse volumique de béton**

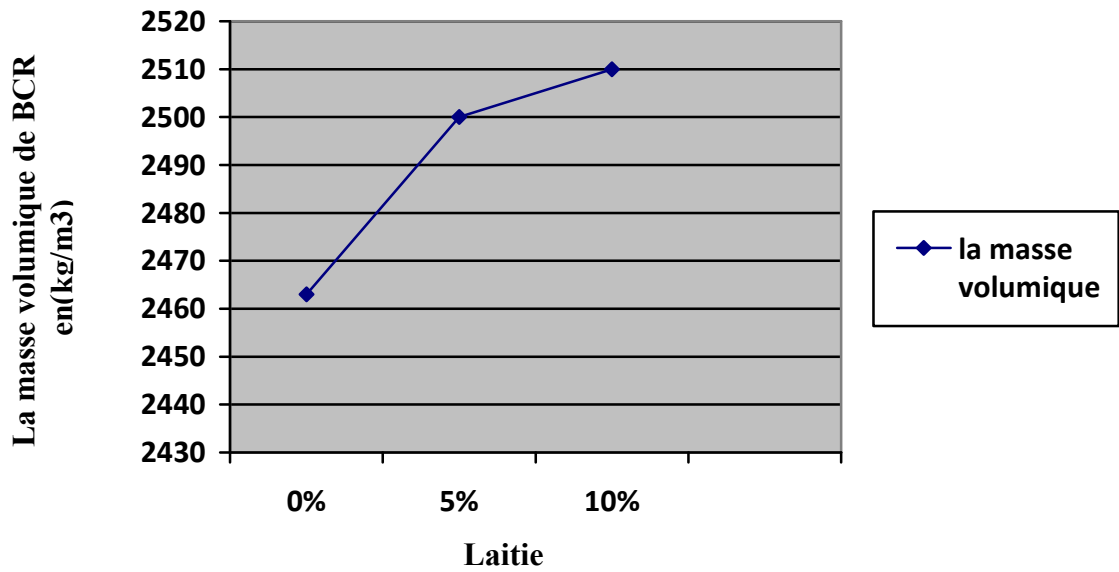


Figure. IV.1.Effet de la teneur en laitier sur la masse volumique du BCR

#### Discussion des résultats :

D'après ces résultats, on constate que la masse volumique de BCR est légèrement augmentée ( $mv \approx 1,8 \%$ ). Ceci implique que l'addition de laitier ne rapporte aucun changement considérable à la masse volumique de béton.

Le laitier broyé joue ici le rôle d'une charge de remplissage des vides, dans la structure du béton.

#### IV.1.2. L'essai Vébé :

En faisant l'essai Vébé sur tous les types de mélange, Pour tester les bétons de faible ouvrabilité, en fonction de l'augmentation des pourcentages de laitier.

| type de béton | 0% laitier | 5% laitier | 10% laitier |
|---------------|------------|------------|-------------|
| temps (s)     | 33         | 29         | 27          |

Tableau. IV.2. Effet du laitier sur l'ouvrabilité de BCR

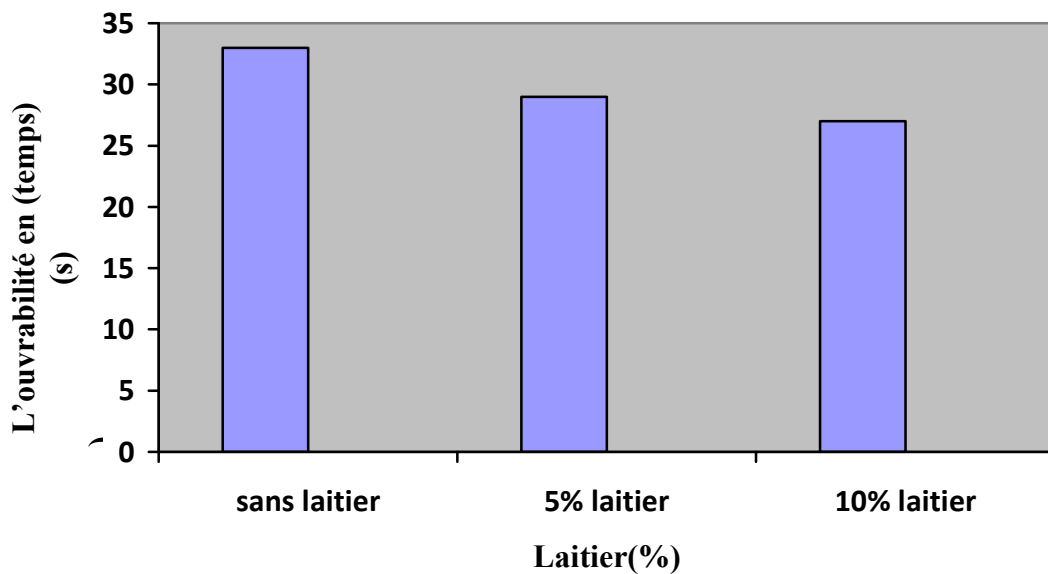


Figure. IV.2. Effet du laitier sur l'ouvrabilité de BCR

#### Discussion des résultats :

Les résultats présentés dans le tableau IV.2. montrent que plus la teneur en laitier est élevée, plus le temps diminue et l'ouvrabilité du béton est élevée.

Ceci peut être expliqué par les résultats ce qui est une caractéristique du laitier dans l'augmentation de l'ouvrabilité, c'est-à-dire en augmentant la proportion de laitier on augmente l'ouvrabilité, mais tout en restant dans la zone du béton ferme.

## IV.2. RESULTATS D'ESSAIS SUR LE BETON A L'ETAT DURCI :

### IV.2.1. La masse volumique du BCR:

L'objectif de cet essai est de connaître l'effet de laitier et la haute température sur la masse volumique de béton, on a mesuré les masses volumiques de tous les types de béton et on a calculé la perte de masse. Les résultats obtenus sont représentés au tableau tableau .IV.3:

○ La masse volumique avant Chauffage =  $M1 / V$

- M1= masse éprouvette avant Chauffage (kg)

- V = volume éprouvette (0,001 dm<sup>3</sup>)....

○ La masse volumique après Chauffage =  $M2 / V$

- M2= masse éprouvette après Chauffage (kg)

○ La Perte de masse (g) =  $M1 - M2$

| Laitier      | âge     | température | avant Chauffage (Kg/m <sup>3</sup> ) | après Chauffage (Kg/m <sup>3</sup> ) | La perte de masse (g) |
|--------------|---------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| sans laitier | 28 JOUR | 20°C        | 2460                                 | 2460                                 | 0                     |
|              |         | 300°C       | 2460                                 | 2448                                 | 12                    |
|              |         | 400°C       | 2460                                 | 2446                                 | 14                    |
|              |         | 500°C       | 2460                                 | 2439                                 | 21                    |
|              |         | 600°C       | 2460                                 | 2435                                 | 25                    |
| 5% laitier   | 28 JOUR | 20°C        | 2500                                 | 2500                                 | 0                     |
|              |         | 300°C       | 2500                                 | 2486                                 | 14                    |
|              |         | 400°C       | 2500                                 | 2479                                 | 21                    |
|              |         | 500°C       | 2500                                 | 2465                                 | 35                    |
|              |         | 600°C       | 2500                                 | 2462                                 | 38                    |
| 10% laitier  | 28 JOUR | 20°C        | 2510                                 | 2510                                 | 0                     |
|              |         | 300°C       | 2510                                 | 2498                                 | 12                    |
|              |         | 400°C       | 2510                                 | 2494                                 | 16                    |
|              |         | 500°C       | 2510                                 | 2486                                 | 24                    |
|              |         | 600°C       | 2510                                 | 2478                                 | 32                    |

**Tableau .IV.3.Effet du laitier et de la température sur la masse volumique du BCR et sur la perte de masse**

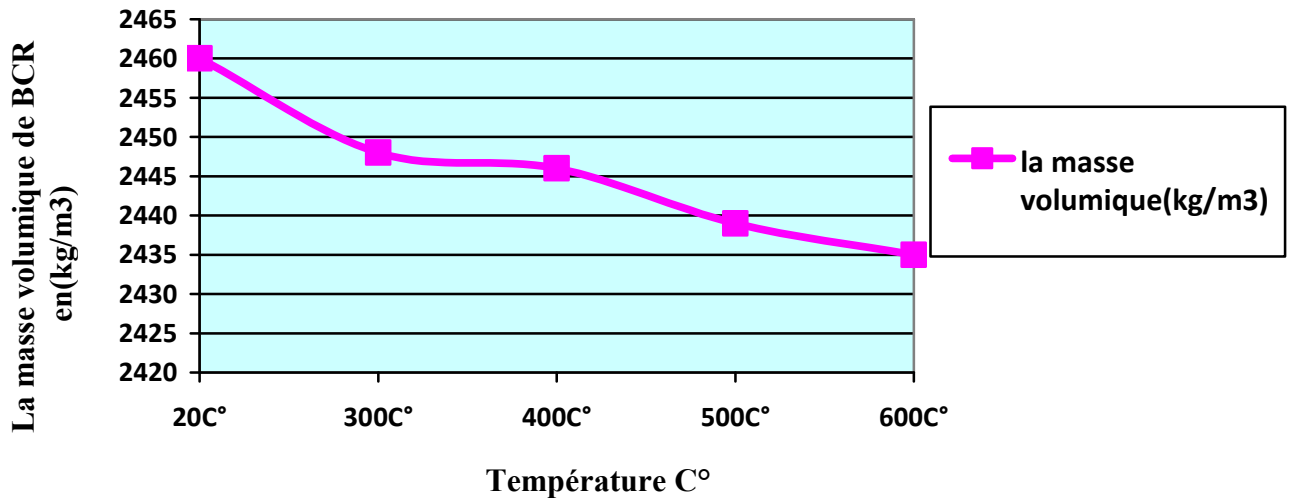


Figure. IV.3. Effet de la température sur la masse volumique de BCR.

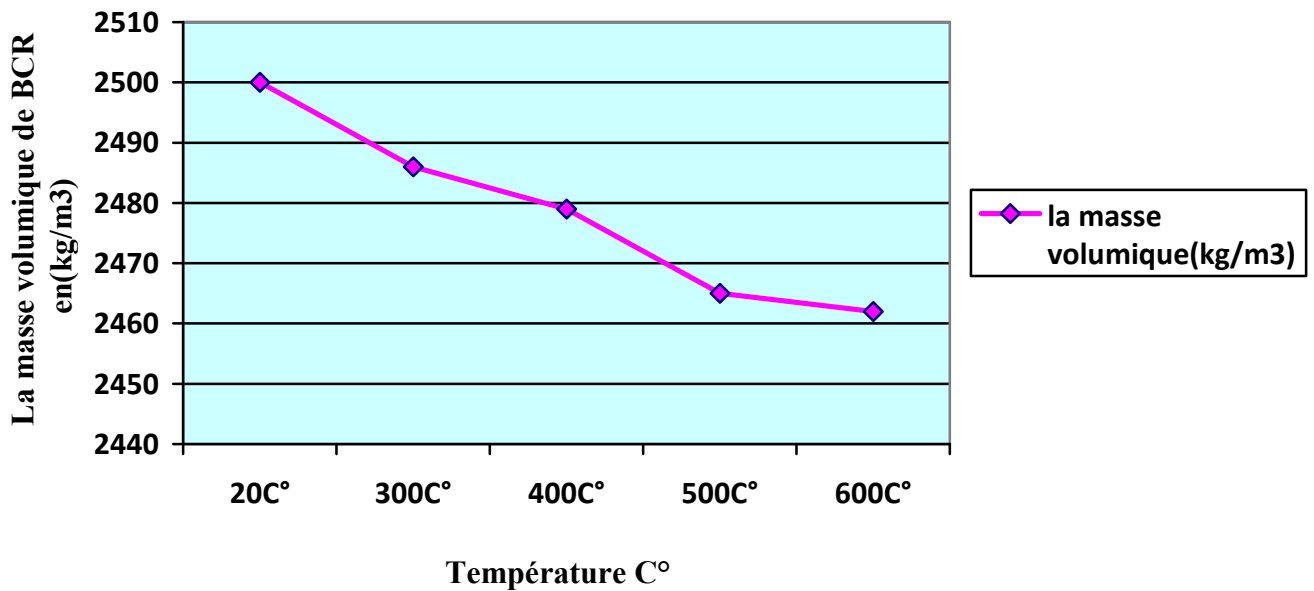


Figure. IV.4. Effet de la température et du laitier à (5%) sur la masse volumique de BCR.

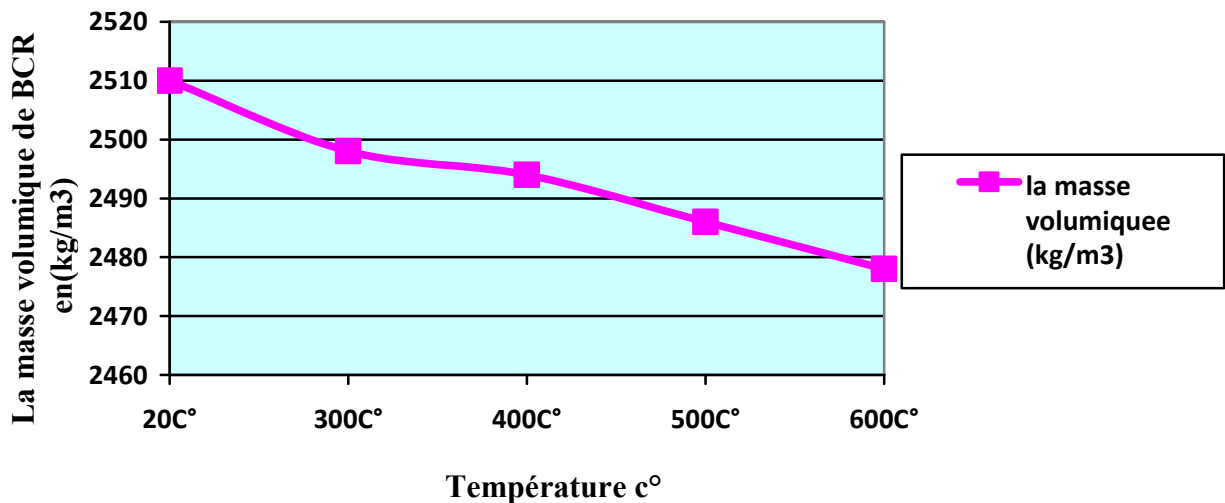


Figure. IV.5. Effet de la température et du laitier à (10%) sur la masse volumique de BCR.

### Discussion des résultats :

D'après ces résultats on a remarqué que la masse volumique diminue avec l'augmentation de la température, et aussi nous avons remarqué l'augmentation de la masse volumique avec l'augmentation des pourcentages de laitier (0% ,5% ,10%) .

Ceci peut être expliqué par le taux d'évaporation dans le béton dans une haute température qui favorise le dégagement d'une quantité d'eau contenu dans la masse de béton, et implicitement diminue le poids de béton, ce qui entraîne une faible masse volumique.

L'augmentation du taux de laitier entraîne une augmentation de la masse volumique due au manque d'eau évaporée et à l'augmentation de la masse de béton.

### IV.2.2.Effet de la température et du laitier sur la perte de masse du BCR:

Les résultats obtenus après avoir mesuré la masse des éprouvettes avant le chauffage (kg) et mesurer la masse des éprouvettes après le chauffage (kg) à 28 jours , et ce puis mesurer la différence.

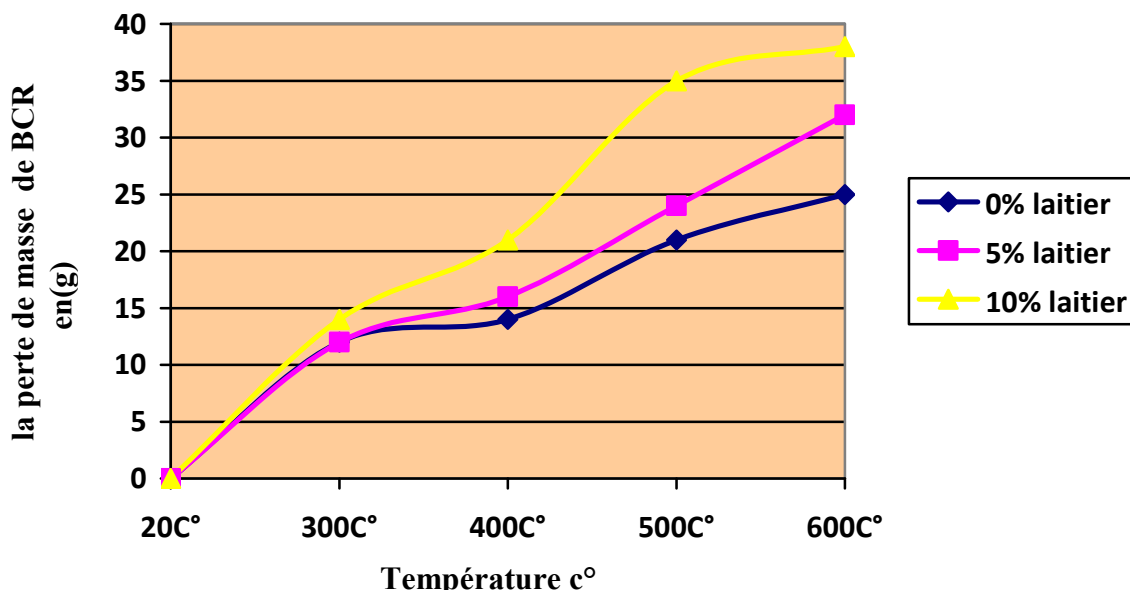


Figure. IV.6. Effet de température et du laitier sur la perte de masse du BCR.

### Discussion des résultats

On remarque qu'avec l'augmentation de la température, la perte de masse augmente et Lors de l'ajout de laitier, la valeur de la perte de masse augmente à son tour.

**10%laitier > 5% laitier > 0%laitier**

Ceci peut être expliqué par durant l'échauffement du béton sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et à la déshydratation progressive du gel CSH. L'effet de la haute température sur la perte en masse des éprouvettes en béton est observé sur la Fig. IV 6.

Les pertes en masse augmentent lorsque la température augmente. Et aussi la teneur en laitier augmentent la perte en masse augmentent. Cette augmentation est quasi linéaire jusqu'à une température de 600°C. Ceci est du à l'évaporation de l'eau.

**IV.2.3. Effet de la teneur en laitier sur la teneur en eau de BCR:**

L'Objectif d'essai est de Connaître la teneur en eau intérieure dans la structure de béton.

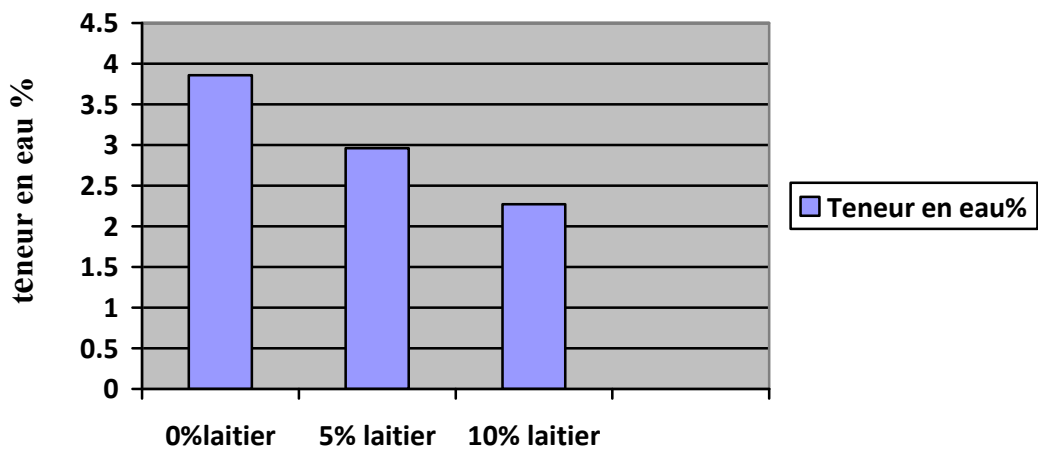
D'après les expériences nécessaires pour mesurer le teneur en l'eau et appliquer par l'équation suivante :

$$Teneur\ en\ eau = \frac{(M_h - M_g)}{M_g} \times 100$$

Nous obtenons les résultats indiqués dans le tableau :

| Teneur en laitier % | 0% laitier | 5% laitier | 10% laitier |
|---------------------|------------|------------|-------------|
| Teneur en eau W0    | 3.86 %     | 2.96%      | 2.27%       |

**Tableau .IV.4.Effet du laitier sur la teneur en eau du BCR**



**Figure. IV.7. Effet du laitier sur la teneur en eau du BCR**

### Discussion des résultats

On notera que l'augmentation du taux de laitier conduit à une diminution de la teneur en eau et cela est dû au comportement des laitiers à l'intérieur du béton de sorte que les laitiers contribuent à réduire le volume d'eau à l'intérieur du béton et réduisent les pores.

#### IV.2.4. Effet de température et du laitier sur la résistance à la compression du BCR :

Cet essai a été effectué sur tous les types de béton et à différents pourcentages à L'éprouvette de béton testé a une forme cubique ( $10 \times 10 \times 10$ ).

Les résultats obtenus après l'écrasement des éprouvettes à l'âge de 7j, 14j, et 28j sont résumés dans le tableau IV.2 et la figure IV.2.

| température | N° d'éprouvette | fc28 Mpa     |            |             |
|-------------|-----------------|--------------|------------|-------------|
|             |                 | sans laitier | 5% laitier | 10% laitier |
| 20C°        | 1               | 60.94        | 62.11      | 65.12       |
|             | 2               | 53.55        | 67.76      | 66.63       |
|             | 3               | 51.21        | 64.81      | 64.2        |
|             | Moy             | 55.23        | 64.89      | 65.31       |
| 300C°       | 1               | 42.75        | 55.46      | 49.23       |
|             | 2               | 64.75        | 64.52      | 50.4        |
|             | 3               | 45.22        | 53.03      | 52.6        |
|             | Moy             | 50.9         | 57.67      | 50.74       |
| 400C°       | 1               | 39.99        | 58.2       | 57.37       |
|             | 2               | 37.31        | 53.6       | 55.02       |
|             | 3               | 35.42        | 57.26      | 51.1        |
|             | Moy             | 37.57        | 56.35      | 54.49       |
| 500C°       | 1               | 37.41        | 55.1       | 44.88       |
|             | 2               | 35.2         | 55.4       | 48.5        |
|             | 3               | 34.65        | 54.2       | 50.2        |
|             | Moy             | 35.75        | 54.9       | 47.86       |

|       |     |       |       |       |
|-------|-----|-------|-------|-------|
| 600C° | 1   | 35.56 | 53.49 | 43.1  |
|       | 2   | 31.36 | 53.6  | 45.26 |
|       | 3   | 32.01 | 54.7  | 47.11 |
|       | Moy | 32.96 | 53.93 | 45.15 |

Tableau .IV.5.Effet du laitier et de la température sur la compression de BCR

## 1) sans laitier

| Age (Jours) | 20C°       | 300C°     | 400C°     | 500C°     | 600C°     |
|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 7           | 21 ,18 Mpa | 20,74 Mpa | 19,21 Mpa | 17,06 Mpa | 15,65 Mpa |
| 14          | 30.23 Mpa  | 25,54 Mpa | 23,72 Mpa | 22,1 Mpa  | 20,13 Mpa |
| 28          | 55,23 Mpa  | 50.9 Mpa  | 37.57 Mpa | 35.75 Mpa | 32.96 Mpa |

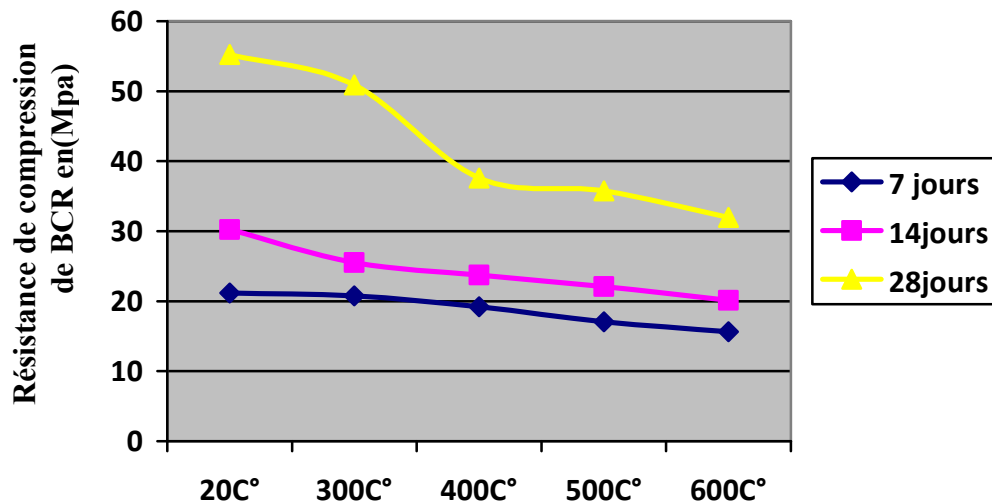
Tableau .IV.6.Effet de la température sur la résistance à la compression de BCR  
(Sans laitier)

Figure. IV.8. Effet de la température sur la résistance à la compression de BCR. (Sans laitier)

## Discussion des résultats :

D'après ces résultats on remarque que la résistance à la compression  $R_c$  diminue avec l'augmentation de la température surtout avec les degrés de températures élevées , et on a

aussi remarqué que la valeur de la résistance à la compression du BCR est plus élevée par rapport au béton normal.

Ceci peut être expliqué par ce qui suit : des températures élevées conduisent à une diminution de la compression Rc car à haute température la proportion d'eau évaporée est importante, et qu'elle a affectée la structure interne du béton.

2) 5% laitier

| Age (Jours) | 20C°      | 300C°     | 400C°     | 500C°    | 600C°     |
|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 7           | 32,14 Mpa | 25,31 Mpa | 24,05 Mpa | 23,5 Mpa | 23 Mpa    |
| 14          | 39,7 Mpa  | 33,49 Mpa | 32,67 Mpa | 31 Mpa   | 30.1 Mpa  |
| 28          | 64.89 Mpa | 57.67 Mpa | 56.35 Mpa | 54.9 Mpa | 53.93 Mpa |

Tableau .IV.7. Effet de la température et du laitier sur la résistance à la compression de BCR. (5% laitier)

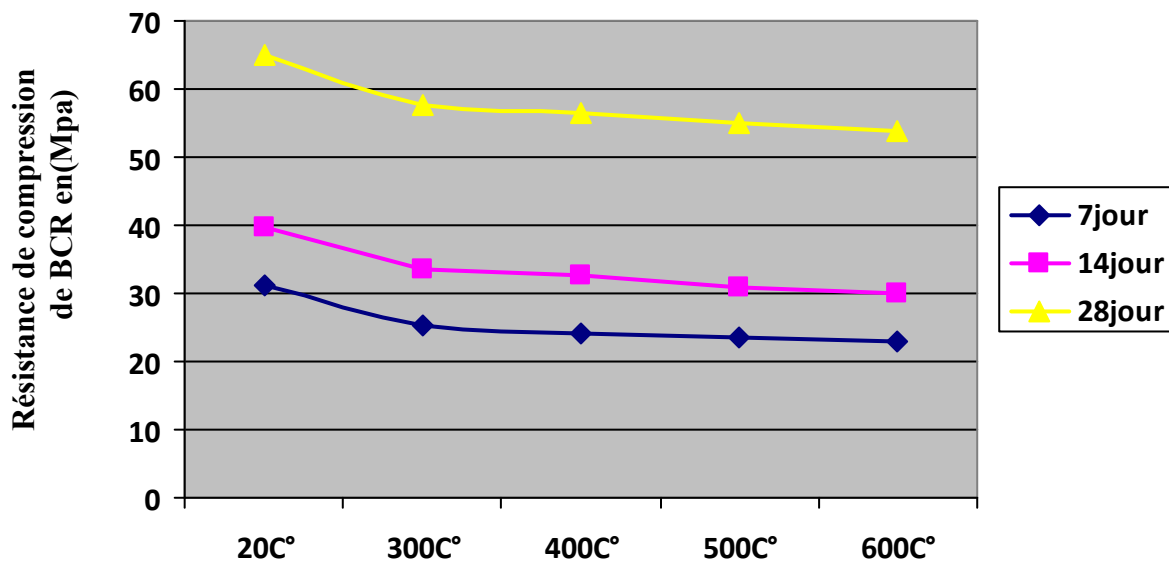


Figure. IV.9. Effet de la température et du laitier sur la résistance à la compression .de BCR. (5% laitier)

- Discussion des résultats :

D’après ces résultats on remarque que la résistance à la compression Rc diminue avec l’augmentation de la température surtout les degrés de la température élevée.

Et on a remarqué que l’augmentation du pourcentage de laitier (de 0% à 5%) a augmenté la valeur de la compression Rc dans tous les cas de température (de 20 C° à 600 C°)

Ceci peut être expliqué par : les propriétés du laitier augmentent la valeur de compression dans le béton, c.-à-d., En ajoutant du laitier au BCR on augmente la valeur de la compression  $R_c$  même aux températures élevées (de 300 C° à 600 C°)

### 3) 10% laitier :

| Age (Jours) | 20C°      | 300C°     | 400C°      | 500C°     | 600C°     |
|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 7           | 34,82 Mpa | 25,02 Mpa | 23 ,12 Mpa | 21,15 Mpa | 21 Mpa    |
| 14          | 41,12 Mpa | 31,15 Mpa | 30,27 Mpa  | 29,87 Mpa | 28,22 Mpa |
| 28          | 65,31 Mpa | 54,49 Mpa | 50,74 Mpa  | 47,86 Mpa | 45,15 Mpa |

Tableau .IV.8. Effet de la température et du laitier sur la résistance à la compression de BCR. (10% laitier)

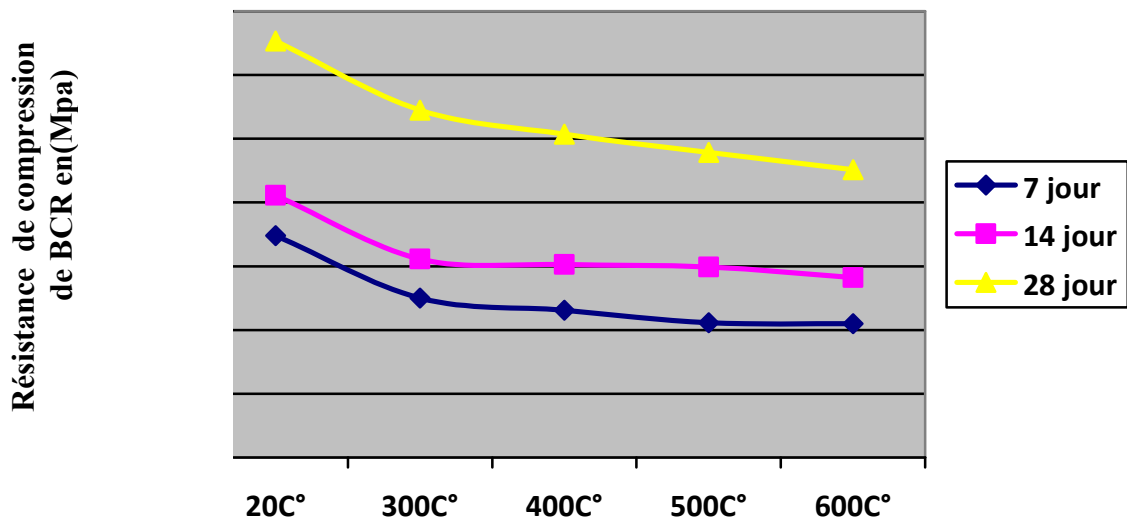


Figure. IV.10. Effet de la température et du laitier sur la résistance à la compression de BCR. (10% laitier)

#### - Discussion des résultats :

D'après ces résultats on remarque que la résistance à la compression  $R_c$  diminue avec l'augmentation de la température surtout les degrés les plus élevée. On constate que l'augmentation du pourcentage de laitier (de 5% à 10%), augmente la valeur de la compression  $R_c$  dans le cas de température ambiante (de 20 C°).

Mais nous notons également qu'à valeur de la résistance de compression diminue lorsqu'on ajoute le laitier (5 et 10%) dans les cas de la température de 300°C à 600°C.

On peut conclure, en générale, que dans la température ambiante, le laitier a on effet positif sur la résistance de béton compacté. Cela peut être expliqué par le fait que le laitier à remplir les vides et rend le béton plus compact. Alors que dans les hautes degrés de la température la résistance à la compression diminue avec l ajout de laitier. Ceci peut être expliqué par le fait que la liaison entre les grains de béton est de venu plus fragile (céramique) et le laitier n'a aucun rôle dans ce cas.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

### CONCLUSION GÉNÉRALE :

Le béton compacté au rouleau est un béton très ferme (d'affaissement nul composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. Ce béton raide, n'est pas armé et sa compacité très élevée.

Le BCR present une grande résistance et une bonne durabilité, donc est bien adapté aux charges des équipements lourds.

On cherche dans cette étude, l'effet de la haute temperature et le laitier a examiné les propriétés mécaniques du béton compacté au rouleau (dans le cas des incendies).

A cet effet, des expériences ont été réalisées à des températures de 20C° à 600.

Le béton compacté au rouleau a été préservé dans deux environnements différents, simulant l'environnement normal et l'environnement en cas d'incendie.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Les températures élevées affectent négativement les propriétés mécaniques du béton compacté au rouleau, entraînant une diminution de la valeur de la compression dans le béton compacté au rouleau.
- L'augmentation du pourcentage du laitier conduit à une augmentation de la résistance à des températures ambiantes, mais à des hautes températures, la résistance diminue.
- Les propriétés mécaniques à haute température lorsque le béton compacté au rouleau (en cas d'incendie) ne change pas beaucoup par rapport au béton ordinaire ou à l'asphalte.
- Au final, on peut dire que le béton compacté au rouleau peut résister lorsqu'il est exposé à des températures élevées (incendie) et conserve les plus ses propriétés mécaniques.

**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] GAGNE, Richard : Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR. CRIB2004.
- [2] GAGNE, Richard: Les bétons compactés au rouleau- principes, application et Nouveau développement BCR, CRIB 2004.
- [3] ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT: Conception et réalisation des revêtements en BCR2001.
- [4] Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.
- [5] Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M., (2000), Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.
- [6] Belaïd M., (2004), Etude des Matériaux du Béton Compacté au Rouleau et du remblai dur, Annales de l'Équipement, Volume XIV, N° 02, Tunisie.
- [7] ZDIRI, Mustapha NEJI, Jamel BEN OUEZDOU, Monji EL OUNI Mohamed Ridha : Formulation et Simulation des bétons compactés au rouleau : application aux matériaux de gisement locaux, Colloque CMEDIMAT2005.
- [8] R. Karsten, H. Otmar, revêtements routiers en béton compacté au rouleau : expériences Faites en Allemagne 2006.
- [09] GUIRAUD, H., PIGEON, M. (1994) Compréhension au gel des bétons compactés au rouleau, Atelier scientifique international sur les bétons compactés au rouleau, Québec, Mai, p. 207 -225.
- [10] ACI. Guide to Curing Concrete (Reapproved 2008), États-Unis. American Concrete Institute, 2001, 311p. (ACI 308R-01).
- [11] Site Web Association Canadienne du ciment, <https://www.cement.ca>
- [12] Belaïd M., Photos de Barrage en Tunisie Communication personnelle, Tunisie.
- [13] Site Web de ciment de Québec, <https://www.BCR.CC.html>

## Références Bibliographiques

---

- [14] ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- [15] Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes. Chaussée en béton de ciment. Presse de l'École Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France, pp. 29-47 et 112-133.
- [16] Projet National BaCaRa 1988-1995. "Le béton compacté au rouleau". Presse ENPC 1996, pp.200.
- [17] Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- [18] Tremblay, S., 1997. Méthodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraîneur D'air Sur La Maniabilité. Université de Laval.
- [19] Pouliot, N., 2001. Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. Bulletin de LPC, Réf.4370, pp.23-36.
- météorologique de M'sila) 2008.
- [20] GEORGE DREUX, JEAN FESTA, nouveau guide du béton et de ses constituants, Edition Eyrolles 1998, pp. 8-20. Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Eyrolles Paris, pp. 20-149.
- [21] Noumowé A. 1995, 'Effets des hautes températures (20 - 600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances', *Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon*, No. 95 ISAL 0092, 232p.
- [22] Nonna YERMAK. Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres. Rencontres Universitaires de génie civil, May 2015, Bayonne, France, pp.82-86