

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POBULAIRE**  
**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 Master Académique**

**Par: - BOUGUERRA Rafik**  
**- KASRI Mounir**

**Intitulé**

***Performance d'un béton compacté au rouleau(BCR)  
dans un climat chaud***

**Soutenu devant le jury composé de:**

**Dr. MAZA Mekki**  
**Pr. BEDDAR Miloud**  
**Dr. DJEBBRI Noura**

**Université de M'sila**  
**Université de M'sila**  
**Université de M'sila**

**Président**  
**Encadreur**  
**Examineur**

**Année universitaire:2016/2017.**





## *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 professeur beddar miloud.*

*Pour sa sollicitude, ses efforts qu'il a déployé pour nous aide, encourage conseiller et corriger.*

*Nous remercions particulièrement (yamna) responsable de laboratoire de génie civil.*

*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 :*

*Mestrès chers*

*parents,*

*Mes frères*

*Ma famille grands et petits surtout ma fille (Meryem djouri), mes  
camarades, mes amies Mounir et Hocine et Nadir Allal surtout tous  
mes enseignants,*

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

***Rafik***





## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes trèschers*

*parents,*

*Mes frères*

*Ma grand-mère qui serait tant fière de moi si elle était là,  
Mafamillegrandsetpetitssurtoutmesfils(AmiraetWailetSaleh),  
mes camarades, mesamies etsurtouttous mes enseignants,*

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

***Mounir***



# Sommaire

---

## SOMMAIRE

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Introduction générale ..... | 1 |
|-----------------------------|---|

### CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique sur le BCR

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Définition .....                                            | 3  |
| I.2. Historique .....                                            | 3  |
| I.3. Les composants .....                                        | 4  |
| I.3.1. Le liant.....                                             | 4  |
| I.3.2. Les granulats .....                                       | 5  |
| I.3.3. L'eau de gâchage.....                                     | 5  |
| I.4. Préparation et mise en place du BCR.....                    | 6  |
| I.5. Cure du BCR .....                                           | 7  |
| I.6. Applications .....                                          | 8  |
| I.6.1. Le BCR en corps des barrages .....                        | 8  |
| I.6.2. Le BCR en technique routière (Pavages) .....              | 10 |
| I.7. Intérêts du BCR.....                                        | 12 |
| I.8. Inconvénients du BCR .....                                  | 14 |
| I.9. Méthodes du formulation .....                               | 14 |
| I.9.1. Méthode basée sur les limites de maniabilité.....         | 15 |
| I.9.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique ..... | 16 |
| I.9.3. Autres méthodes .....                                     | 18 |
| I.10. Conclusion.....                                            | 19 |

### Chapitre II : Aperçu sur les conditions climatiques de la région de M'sila

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction.....                            | 20 |
| II.2. Situation géographique .....                 | 20 |
| II.3. Climat de M'sila .....                       | 21 |
| II.3.1. CLASSIFICATIONS .....                      | 21 |
| II.4. Caractéristiques climatiques de M'sila ..... | 22 |
| II.4.1. Informations générales.....                | 22 |

## Sommaire

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| II.4.2. Températures et précipitations moyennes..... | 22 |
| II.4.2.1. La température .....                       | 22 |
| II.4.2.1.1. Températures maximales .....             | 24 |
| II.4.2.2. Les précipitations .....                   | 24 |
| II.4.2.2.1. Quantité de précipitations .....         | 26 |
| II.4.3. Le vent .....                                | 27 |
| II.4.3.1. La vitesse du vent.....                    | 27 |
| II.4.3.1. La rose des vents.....                     | 28 |
| II.5. Conclusion .....                               | 28 |

### Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et la formulation d'un BCR

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1Introduction .....                                                                   | 29 |
| III.2. Matériaux utilisés .....                                                           | 29 |
| III.2.1. Caractéristiques du sable .....                                                  | 29 |
| III.2.1.1. Analyse granulométrique (NF P 18304).....                                      | 29 |
| III.2.1.2. Module de finesse (NF P18-540).....                                            | 31 |
| III.2.1.3. Propreté « équivalent de sable» (NF P18-590) .....                             | 32 |
| III.2.1.4. Masse volumique absolue (NF P 18-555).....                                     | 34 |
| III.2.1.5. Masse volumique apparente (NF P 18-554) .....                                  | 34 |
| III.2.2. Caractéristiques des graviers .....                                              | 35 |
| III.2.2.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560) .....                        | 36 |
| III.2.2.2. Masse volumique .....                                                          | 38 |
| III.2.2.3. La porosité .....                                                              | 39 |
| III.2.2.4. La compacité.....                                                              | 39 |
| III.2.2.5. L'indice des vides.....                                                        | 39 |
| III.2.2.6. La résistance à la fragmentation par chocs, essai Los Angeles (NFP18-573)..... | 40 |
| III.2.3. Caractéristiques du ciment utilisé.....                                          | 42 |
| III.2.3.1. Caractéristiques physiques .....                                               | 42 |

## Sommaire

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.2.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ -CEM II/B 42,5 R.....       | 42 |
| III.2.3.3. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ -CEM II/B 42,5 R .....     | 43 |
| III.2.4. Eau de gâchage .....                                                           | 43 |
| III.2.4.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisé.....                             | 43 |
| III.3. Formulation du BCR et Procédures des essais réalisés .....                       | 44 |
| III.3.1. Formulation du BCR .....                                                       | 44 |
| III.3.1.1. Fuseau granulométrique .....                                                 | 44 |
| III.3.1.2. La courbe combinée.....                                                      | 45 |
| III.3.1.3. Pourcentage des granulats .....                                              | 45 |
| III.3.1.4. Détermination de la teneur en eau optimale et le pourcentage de ciment ..... | 46 |
| III.3.1.6. Les quantités des matériaux pour un mètre cube de BCR .....                  | 48 |
| III.3.1.7. Confection et conservation des éprouvettes .....                             | 49 |
| III.3.2. Procédures d'essais réalisés.....                                              | 51 |
| III.3.2.1. Essais sur le béton frais .....                                              | 51 |
| III.3.2.1.1. Maniabilité (ouvrabilité) du béton.....                                    | 51 |
| III.3.2.1.2. La masse volumique sur béton frais (NF en 12350-6).....                    | 52 |
| III.3.2.2. Essais sur le béton durci .....                                              | 53 |
| III.3.2.2.1. La masse volumique sur béton durci (NF en 12390-7) .....                   | 53 |
| III.3.2.2.2. Détermination de la résistance à la compression (NFP18-411).....           | 54 |
| III.4. Conclusion .....                                                                 | 54 |

## Chapitre IV : Résultats et discussions

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1. Introduction .....                                                                         | 55 |
| IV.2. L'effet de l'environnement de conservation sur la masse volumique de BCR .....             | 55 |
| IV.3. L'effet de l'environnement de conservation sur la résistance à la compression de BCR ..... | 56 |

## **Sommaire**

---

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>IV.4. L'effet des méthodes de cure sur la masse volumique de BCR .....</b>            | <b>57</b> |
| <b>IV.5. L'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression de BCR.....</b> | <b>59</b> |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                                         | <b>60</b> |

# Liste des figures

---

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique sur le BCR

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure.I.1.</b> Mise en place de BCR par bandes .....                                                                     | 7  |
| <b>Figure.I.2.</b> Cure du béton par arrosages ciblés .....                                                                  | 7  |
| <b>Figure.I.3.</b> Bâche de protection contre la pluie .....                                                                 | 8  |
| <b>Figure.I.4.</b> Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie).....                                   | 9  |
| <b>Figure.I.5.</b> Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie) .....                                                 | 9  |
| <b>Figure.I.6.</b> Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada.....                                                            | 10 |
| <b>Figure.I.7.</b> Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada .....                                       | 10 |
| <b>Figure.I.8.</b> Mise en place du BCR en pavage - Atlant a USA .....                                                       | 11 |
| <b>Figure.I.9.</b> Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand, 2001) .....                                 | 15 |
| <b>Figure.I.10.</b> Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al. 1997 ;<br>Gauthier & Marchand ,2001)..... | 17 |
| <b>Figure.I.11.</b> Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001).....                                                      | 17 |

### Chapitre II : Aperçu sur les conditions climatiques de la région de M'sila

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure.II.1.</b> La carte géographique d'un M'sila .....                                                                                                      | 21 |
| <b>Figure. II.2.</b> Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de M'sila<br>pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila»..... | 23 |
| <b>Figure.II.3.</b> La température maximale à M'Sila montre le nombre de jours par mois.....                                                                     | 24 |
| <b>Figure. II.4.</b> Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) pour la période<br>(1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila ».....      | 25 |
| <b>Figure. II.5.</b> La quantité précipitation dans la région de M'Sila, montre combien de jours<br>par mois .....                                               | 26 |
| <b>Figure. II.6.</b> La Vitesse du vent dans la région de M'Sila, montre combien de jours<br>dans un mois .....                                                  | 27 |
| <b>Figure. II.7.</b> La Rose des Vents dans la région de M'Sila montre combien d'heures<br>par an .....                                                          | 28 |

## Liste des figures

---

### Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et la formulation d'un BCR

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.1.</b> Une balance et une tamiseuse vibrante.....                                    | 30 |
| <b>Figure III.3.</b> L'Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA) .....                   | 31 |
| <b>Figure III.4.</b> Essais d'équivalent de sable .....                                            | 32 |
| <b>Figure III. 5.</b> Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/15), (15/20) .....  | 37 |
| <b>Figure III.6.</b> Appareil de l'essai Los Angeles .....                                         | 40 |
| <b>Figure III.7.</b> Fuseau granulaire.....                                                        | 45 |
| <b>Figure III.8.</b> Détermination les pourcentages des différentes fractions des granulats .....  | 45 |
| <b>Figure III.9.</b> Marteau piqueur Hilti .....                                                   | 46 |
| <b>FigureIII.10.</b> La densité sèche en fonction de la teneur en eau et le dosage de ciment ..... | 48 |
| <b>FigureIII.11.</b> Conservation des éprouvettes du BCR dans le four .....                        | 49 |
| <b>FigureIII.12.</b> Conservation des éprouvettes du BCR dans la chambre de l'humidité.....        | 50 |
| <b>FigureIII.13.</b> Conservation des éprouvettes du BCR dans l'air libre .....                    | 50 |
| <b>FigureIII.14.</b> Conservation des éprouvettes du BCR dans un réservoir d'eau.....              | 51 |
| <b>FigureIII.15.</b> Cure des éprouvettes du BCR par utilisation film de plastique.....            | 51 |
| <b>Figure III.16.</b> Mesure de la consistance (Essai de Vébé).....                                | 52 |
| <b>Figure III.17.</b> Mesure de la masse volumique du BCR à l'état frais.....                      | 53 |
| <b>Figure III.18.</b> Mesure de la masse volumique du BCR à l'état durci.....                      | 53 |
| <b>Figure III.19.</b> La presse hydraulique .....                                                  | 54 |

### Chapitre IV : Résultats et discussions

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure.IV.1.</b> L'effet de l'environnement de conservation sur la masse volumique de BCR .....             | 56 |
| <b>Figure.IV.2.</b> L'effet de l'environnement de conservation sur la résistance à la compression de BCR ..... | 57 |
| <b>Figure.IV.3.</b> L'effet des méthodes de cure sur la masse volumique de BCR.....                            | 58 |
| <b>Figure.IV.4.</b> L'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression de BCR.....                | 59 |

# Liste des tableaux

---

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique sur le BCR

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| <b>Tableau I.1.</b> Les intérêts du BCR ..... | 13 |
|-----------------------------------------------|----|

### Chapitre II : Aperçu sur les conditions climatiques de la région de M'sila

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II.1.</b> Classifications compter Köppen-Geiger à climat de M'Sila..... | 21 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau. II.2.</b> Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de M'sila pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila» ..... | 23 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II.3.</b> Les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila » ..... | 25 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II.4.</b> Les précipitations moyennes saisonuelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila » ..... | 25 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### Chapitre III : Caractérisation des matériaux utilisés et la formulation d'un BCR

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.1.</b> Analyse granulométrique du sable de dune de BOUSAADA ..... | 30 |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.3.</b> Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable Esv et Esp.... | 33 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.4.</b> Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune ..... | 34 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.5.</b> Caractéristiques physiques du sable de dune (BOUSAADA) ..... | 35 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.6.</b> L'analyse granulométrique de gravier concassé (3/8) ..... | 36 |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.7.</b> L'analyse granulométrique de gravier concassé (8/15) ..... | 37 |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.8.</b> L'analyse granulométrique de gravier (15/20) ..... | 37 |
|--------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.9.</b> La masse volumique apparente des graviers..... | 38 |
|----------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.10.</b> Masse volumique absolue des graviers..... | 38 |
|------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.11.</b> Porosité, compacité et indice des vides du gravier concassé ..... | 39 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.12.</b> Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé..... | 41 |
|----------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.13.</b> Classification des roche en fonction du coefficient LA..... | 41 |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Liste des tableaux

---

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau III.14.</b> Caractéristiques physique du CPJ -CEM II/B 42,5 R.....                              | <b>42</b> |
| <b>Tableau III.15.</b> Les compositions chimiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R.....                             | <b>42</b> |
| <b>Tableau III.16.</b> Les compositions minéralogiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R .....                       | <b>43</b> |
| <b>Tableau III.17.</b> Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage.....                                 | <b>43</b> |
| <b>Tableau III.18.</b> Tamisât de différentes fractions d'agrégats..... ; .....                            | <b>44</b> |
| <b>Tableau III.19.</b> Pourcentage des granulats.....                                                      | <b>46</b> |
| <b>Tableau.III.20.</b> Les quantités des granulats, ciment et d'eau pour les mélanges de BCR...            | <b>47</b> |
| <b>Tableau.III.21.</b> Résultats de la formulation aux différents dosages en ciment et teneurs en eau..... | <b>47</b> |
| <b>Tableau III.22.</b> Pourcentage des constituants de BCR dans un (m3) .....                              | <b>49</b> |
| <b>Tableau III.23.</b> Les quantités des constituants de BCR dans un (m3).....                             | <b>49</b> |
| <b>Tableau III.24.</b> Classes de consistance Vébé en fonction du temps t .....                            | <b>52</b> |

## Chapitre IV : Résultats et discussions

|                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau.IV.1.</b> L'effet de l'environnement de conservation sur la masse volumique de BCR .....             | <b>55</b> |
| <b>Tableau.IV.2.</b> L'effet de l'environnement de conservation sur la résistance à la compression de BCR ..... | <b>56</b> |
| <b>Tableau.IV.3.</b> L'effet des méthodes de cure sur la masse volumique de BCR.....                            | <b>57</b> |
| <b>Tableau.IV.4.</b> L'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression de BCR .....               | <b>58</b> |

### RÉSUMÉ

Le béton compacté au rouleau mélangé et compacté, placé et mise à la cure peut avoir une résistance initiale à court terme très élevée, mais dans les climats chauds tels que celui de la région de M'sila est négativement influencé que ce soit à l'état frais qu'à l'état durci, ce qui provoque des déformations de retrait et des dilatations thermiques dans sa matrice.

Ce mémoire, résume un travail dans lequel le béton compacté au rouleau après avoir élaborer, a été conservé dans deux environnements différents simulant ainsi le climat de la région de M'sila à savoir environnement chaud et humide ( $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=100\%$ ) et environnement chaud et sec ( $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=0\%$ ).

Les résultats expérimentaux obtenus montrent bien l'importance de la cure dans les régions chaudes.

Ces résultats ont été aussi comparés à ceux d'un béton compacté de référence conservé à l'air sous aucune cure puis ils ont discuté d'après l'influence des conditions climatiques et celle des types de cure.

**Mots clés :** BCR, formulation, résistance à la compression, environnement chaud, méthodes de cure.

### ABSTRACT

Roller compacted concrete mixed and compacted, placed and cured may develop a high initial strength in a short term, But in hot climate as that of M'sila region, the rate gain in strength can be lower and the final strength could be negatively affected in fresh state as well as in hard state, which leads to shrinkage deformation and thermal dilatation in the matrix.

The projet summarises a work in which roller compacted concrete after being elaborated has been cured in two different environment conditions simulating the climate of M'sila region as hot and humid environment ( $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=100\%$ ) and hot and dry environment ( $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=0\%$ ).

The results obtouned show the importance of cure methods in hot region.

These results were also compared with those reference specimens preserved at ambient temperature without cure. Thus, the influence of the climate conditions and that of the cure type is discussed.

**Key words:** RCC, formulation, compressive strength, hot environment, curing methods.

## ملخص

يمكن للخرسانة المضغوطة عندما تكون مختلطة ومتراصة وموضوعة في وضعية العلاج أن تطور قوة أولية عالية على المدى القصير، ولكن في المناخ الحار كما هو الحال في منطقة المسيلة، يمكن أن يكون معدل الزيادة في القوة أقل، ويمكن أن تتأثر القوة النهائية سلبا في الحالة الطازجة وكذلك في الحالة الصلبة، الأمر الذي يؤدي إلى تشوهات في انكماشها وتمدد حراري في مصفوفتها.

توجز هاته المذكرة العمل الذي تم فيه بعد تصميم الخرسانة المضغوطة بحفظها في بيئتين مختلفتين تحاكي مناخ منطقة المسيلة كبيئة حارة ورطبة ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=100\%$ ) وبيئة ساخنة وجافة ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=0\%$ ).

أظهرت النتائج التجريبية أهمية طرق العلاج في المناطق الساخنة.

تمت مقارنة هذه النتائج أيضا مع تلك العينات المرجعية المحفوظة في الهواء الطلق دون علاج. وهكذا، نوقش تأثير الظروف المناخية ونوع العلاج.

**كلمات البحث:** الخرسانة المضغوطة. تشكيل. مقاومة الإنضغاط. بيئة حارة. طرق المعالجة.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# INTRODUCTION GÉNÉRALE :

## 1. PRÉAMBULE :

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

L'utilisation de ce type de matériau innovant ne cesse de croître. Mais le problème est que ce type de béton, comme les autres types des bétons, peut se fissurer aux effets des actions venant du milieu environnant ( $t^{\circ}\text{C}$ , hygrométrie). Ceci va influencer sur la résistance et la durabilité finale du béton élaborer même avec un compactage puissant.

L'influence des facteurs climatiques principaux sur le taux d'évaporation de l'eau de surface du béton est belle et bien démontrée, cependant on ne peut pas donner une conclusion précise sur leurs effets que par une étude détouillée propre à chaque facteur.

Un des facteurs le plus important des conditions climatiques, est la température ambiante qui atteint souvent  $40^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$  à l'ombre en présence d'une hygrométrie relativement faible.

De telles conditions provoquent l'évaporation rapide de l'humidité, tout d'abord des couches superficielles, ce qui entraîne un retrait irrégulier et par conséquent, la création des contraintes thermiques sévères dans le béton compacté au rouleau. Ces effets peuvent nuire à la qualité du béton, surtout pendant le durcissement ou le phénomène d'hydratation est considérablement touché et le béton étant relativement faible, ne peut en conséquence supporter les contraintes générées.

La wilaya de M'sila ou à vrai dire la région de HODNA est caractérisé par un climat aride avec un été chaud où la température dépasse les  $40^{\circ}\text{C}$  et un hiver rigoureux où la température diminue jusqu'à  $20^{\circ}\text{C}$ , avec des périodes de fortes gelées qui se prolongent de Décembre ou Mai. Les précipitations sont irrégulières avec un taux moyen de 16,53 mm/mois.

L'humidité relative passe de 31% en juillet à 84% en décembre. Le sirocco est le vent caractérisant la région, c'est un vent chaud et sec, très fréquent en été avec une température très élevées, et une humidité très faible favorise l'évaporation.

## 2. OBJECTIVE :

Cette étude, partie d'un travail de recherche visant à développer des méthodes de cure adapté au climat chaud. C'est-à-dire des méthodes simples efficaces et moins coûteuses

pour que le béton compacté au rouleau, élaboré dans ce type de climat, possédera des bonnes propriétés mécaniques à une température élevée.

La partie actuelle de ce travail a comme but d'étudier la résistance à la compression du béton compacté au rouleau confectionné à base des matériaux locaux et conserve durant son durcissement dans différents environnement simulés à la région de M'sila.

### **3. STRUCTURE DU MÉMOIRE :**

Ce mémoire est devisé en deux parties. Une partie théorique qui contient deux chapitres à savoir un chapitre comme synthèse bibliographique d'un béton compacté au rouleau (BCR) et un aperçu sur les conditions climatiques de la région de M'sila.

La deuxième partie qui contient la partie expérimentale est devisée en deux chapitres

Ce Chapitre III présente les caractérisations des matériaux utilisés et la formulation du béton compacté au rouleau, Alors que le quatrième chapitre présente les résultats obtenus ainsi que la discussion de ces résultats. Le mémoire est terminé par une conclusion générale et les références.

# **CHAPITRE I**

## **SYNTHÉSE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **SUR LE BCR**

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BCR (BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU).

### I.1. 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'épandeur, 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.2. 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.3. LES COMPOSANTS :**

#### **I.3.1. Le liant :**

Son utilisation répond à pas mal d'exigences parmi lesquelles la résistance mécanique, les critères de durabilité exigées 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.3.2. 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 inférieur à 0.2 %.

Il faut noter que le choix d'un délevé 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.3.3.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.4.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  $500 \text{ kg/m}^3$  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  $270 \text{ kg/m}^3$ ) 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.5. 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.6.APPLICATIONS :**

### **I.6.1.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.



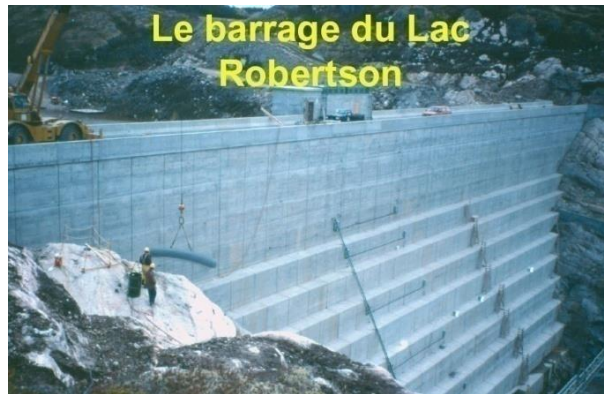
**Figure.I.4.Etat du BCR frais lors de son déversement  
(Barrage Errmil Tunisie) [12].**

Parmi les barrages en BCR réalisés en Tunisie on peut citer : Barrage Errmil (Figures 1.4 et 1.5) à Bouarada, Barrage Fom Elkhanga 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 Wadi Dayqah 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 Bíobío 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  $5.470.000 \text{ m}^3$ . 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.6.2.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 voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations 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.7.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 ;

| Atouts                                   | Conséquences                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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         | Élimine 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 goudrons         | 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.8. 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.9. 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 du

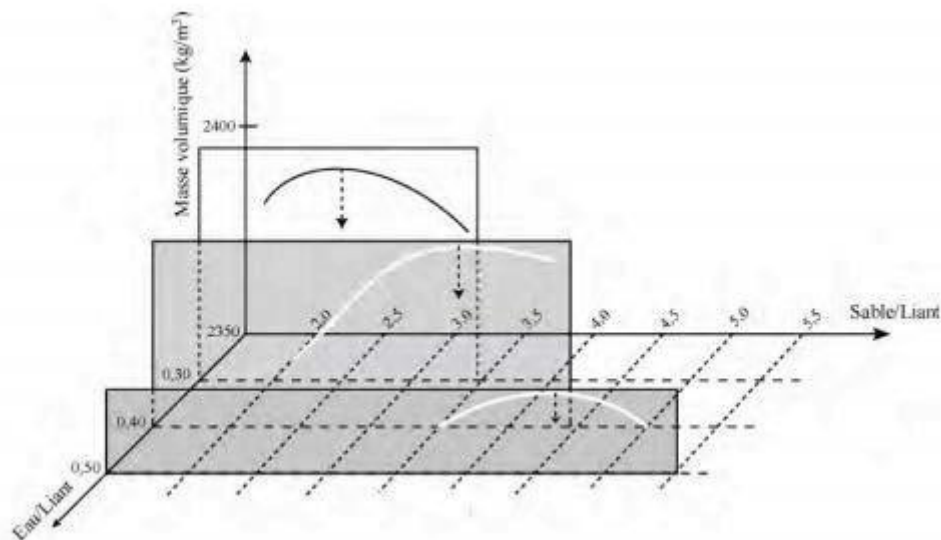
mélange utilisant les concepts de la Géotechnique. Les deux méthodes, peuvent être utilisées séparément pour les routes et pour les barrages [17].

### I.9.1.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.9.2. 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 :

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

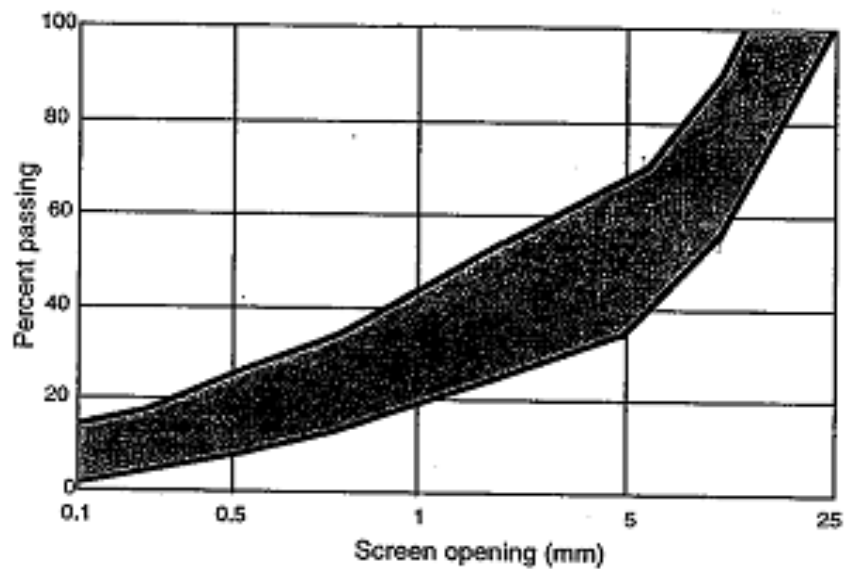
$\rho_d$  : densité sèche.

$\rho_h$  : 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].

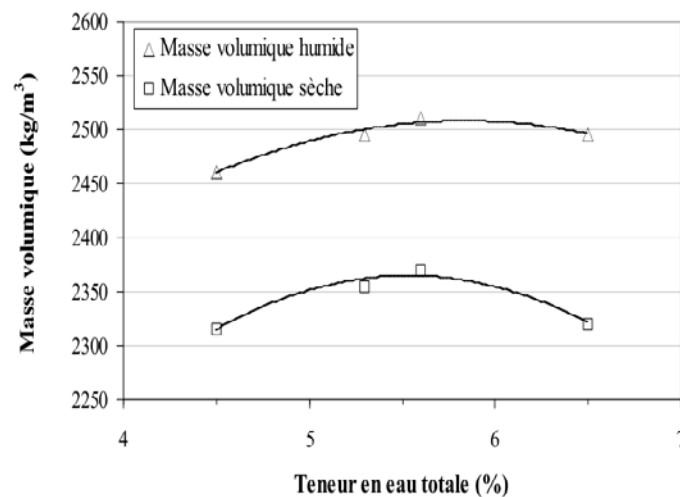
La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est tracée dans un graphique (**Figure.I.11**). La teneur en eau correspondant à la

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 différentes 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.9.3. 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.10. 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**  
**APERÇU SUR LES CONDITIONS**  
**CLIMATIQUES DE LA RÉGION**  
**DE M'sila**

## **CHAPITRE II : APERÇU SUR LES CONDITIONS CLIMATIQUES DE LA RÉGION DE M'SILA**

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

Le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans (défini par l'Organisation Météorologique Mondiale). Il est donc caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes. A l'échelle de la planète, le climat représente une machinerie complexe qui est le produit, dans l'espace et dans le temps, de toute une série d'interactions entre les éléments qui composent les différents compartiments :

- l'atmosphère ;
- la lithosphère (la croûte terrestre) ;
- l'hydrosphère (l'ensemble des mers, des océans, des lacs et des cours d'eau de la planète) ;
- la cryosphère (les glaces du monde entier) ;
- la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation) [20].

Le présent chapitre sera entièrement consacré à l'étude des conditions climatiques de la région de M'sila et en particulier l'université de M'sila ont été effectués les essais expérimentaux.

### **II.2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE :**

La wilaya de M'Sila a une superficie de 18 175 km<sup>2</sup>. Elle est limitée par les wilayas de Bouira et Bordj-Bou-Argeridj au nord, Batna et Sétif à l'est, Médéa et Djelfa à l'ouest et Biskra au sud.

Sa population est de 1 029 447 habitants. Sa morphologie et sa position géographique confèrent à cette région un aspect écologique unifié représenté par la prédominance de la steppe qui couvre 12 000 000 ha (soit 63 % de la superficie totale) de la wilaya. La superficie affectée à l'agriculture représente 20 % de la surface totale, consacrées essentiellement à la céréaliculture, à l'arboriculture et au maraîchage.

Sa position topographique : wilaya de M'Sila, Algérie, 35.71°N 4.54°E 477m s.n.m [20].

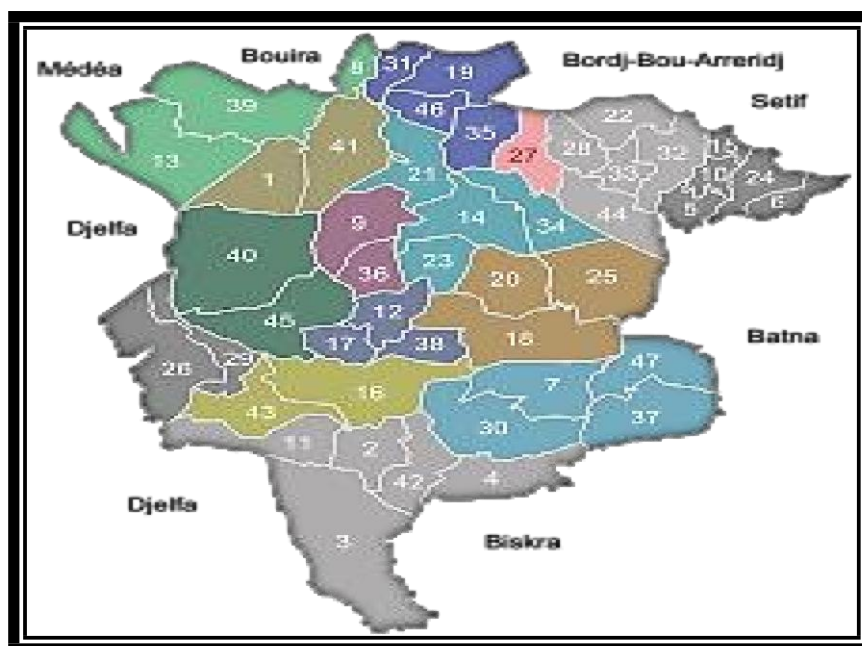


Figure.II.1.La carte géographique d'un M'sila [20].

### II.3.CLIMAT DE M'SILA :

Le climat de la wilaya de M'sila est de type continental avec des influences maritimes réduites, avec un gradient climatique Nord - Sud. Ce gradient est fortement influencé par la topographie, puisqu'on passe des zones montagneuses culminant à 1800 m d'altitude aux zones présahariennes avec une altitude inférieure à 300 m. Ainsi le climat de la wilaya de M'sila est contrasté avec une longue saison estivale sèche et chaude et une saison hivernale pluvieuse et froide. Les précipitations sont faibles et variables d'une année à l'autre. Les régimes thermiques sont relativement homogènes et traduisent un climat de type continental [20].

#### II.3.1.Classifications :

M'Sila a trois climats différents et les plus répandus sont BSk, BWk.

| Classification                 | Compter | Köppen-Geiger | Exemples                                              |
|--------------------------------|---------|---------------|-------------------------------------------------------|
| Climats froids semi-arides     | 52      | BSk           | M'Sila, Magra, Medjedel, Dehahna, Magoura             |
| Climats froids du desert       | 44      | BWk           | BouSaâda, Belaiba, M'Tarfa, Ouled Mansour, Aïn Khadra |
| Climat méditerranéen chaud-été | 2       | Csa           | Zitout, Melouza                                       |

Tableau II.1.Classifications compter Köppen-Geiger à climat de M'Sila [20].

## **II.4.CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES DE M'SILA :**

Les diagrammes météorologiques de meteoblue sont basés sur 30 ans de simulations de chaque heure des modèles météorologiques et sont disponibles pour chaque lieu sur la Terre. Ils donnent une bonne indication des tendances météorologiques typiques et conditions prévues (température, précipitations, rayonnement solaire et vent). Les données météo simulées ont une résolution spatiale d'environ 30 km et ne peut pas jouer tous les effets météorologiques locaux tels que les tempêtes, les vents locaux ou les tornades [21].

### **II.4.1.Informations générales :**

Depuis 2007 meteoblue a déposé les données du modèle météo de meteoblue. En 2014, nous avons commencé à calculer les modèles météorologiques avec les données historiques de 1985 et nous avons généré une histoire de 30 ans continue et globale, avec des données météorologiques de chaque heure. Les diagrammes climatiques sont le premier ensemble de données climatiques simulées rendues publiques sur l'Internet. Notre histoire météo couvre partout dans le monde, à tout moment, indépendamment de la disponibilité des stations météorologiques.

Les données sont tirées de notre modèle météorologique globale NEMS à environ 30 km de résolution et ne peuvent pas reproduire les effets météorologiques locaux dans le détail, tels que les îlots de chaleur, les courants d'air froid, les tempêtes ou les ouragans. Pour les lieux et les événements qui nécessitent une grande précision (tels que la production d'électricité, assurances, etc.), nous offrirons des simulations à haute résolution avec des données de chaque heure [21].

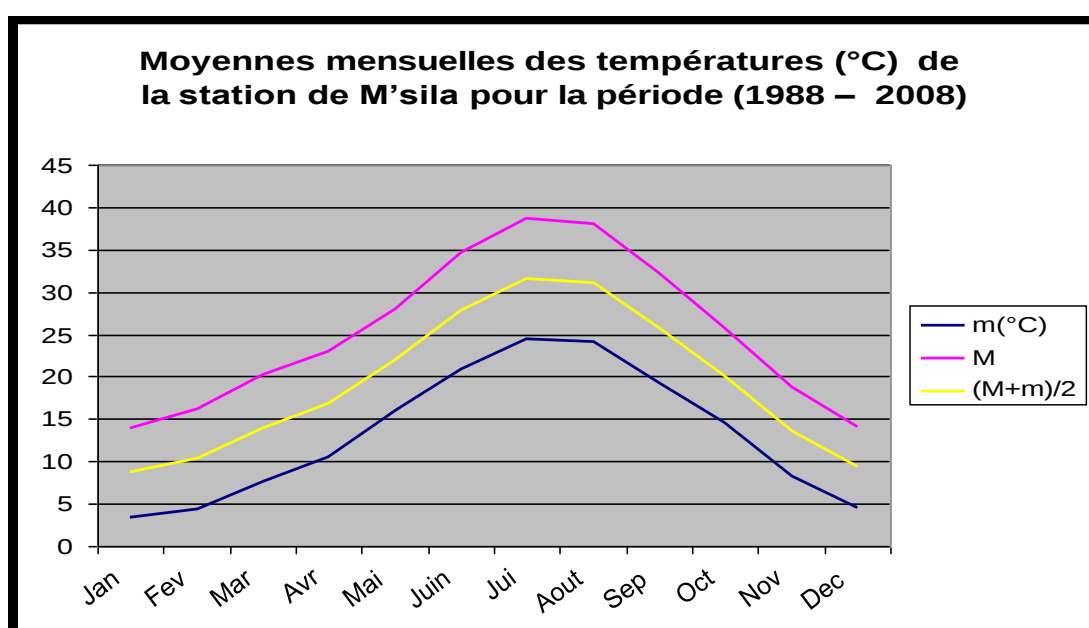
### **II.4.2.Températures et précipitations moyennes :**

#### **II.4.2.1.La température :**

La température est un facteur climatique important, elle possède un effet direct sur la végétation et c'est grâce aux degrés jours que la végétation manifeste son rythme biologique. La région de M'sila est caractérisée par des températures très variables. Elles sont basses en hiver et élevées en été. Le tableau ci-dessous montre que la température la plus basse est de 3.48° au mois de Janvier, le maximum est de 38.62 °C au mois de juillet. La température moyenne annuelle ( $M+m/2$ ) de la région d'étude est de 19.24°C. Cette grande différence entre les températures moyennes de l'été et celle de l'hiver, montre l'importance de la chaleur estivale qui traduit bien la continentalité du climat [22].

|         |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Min     | 84.3  | .484  | 1447  | 75411 | 7445. | 55401 | 5.4.5 | 5.475 | 70458 | 7.414 | 3488  | .44   | 78470 |
| Max     | 78403 | 74457 | 55458 | 58454 | 51408 | 8.44. | 83445 | 83455 | 85471 | 51443 | 7343  | 7.471 | 51450 |
| (M+m)/2 | 3418  | 75453 | 78405 | 7443  | 57403 | 51410 | 87415 | 87451 | 5141  | 55475 | 78414 | 0481  | 7045. |

**Tableau. II.2. Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de M'sila pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila» [22].**



**Figure. II.2. Moyennes mensuelles des températures (°C) de la station de M'sila pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila» [22].**

## II.4.2.1.1. Températures maximales :

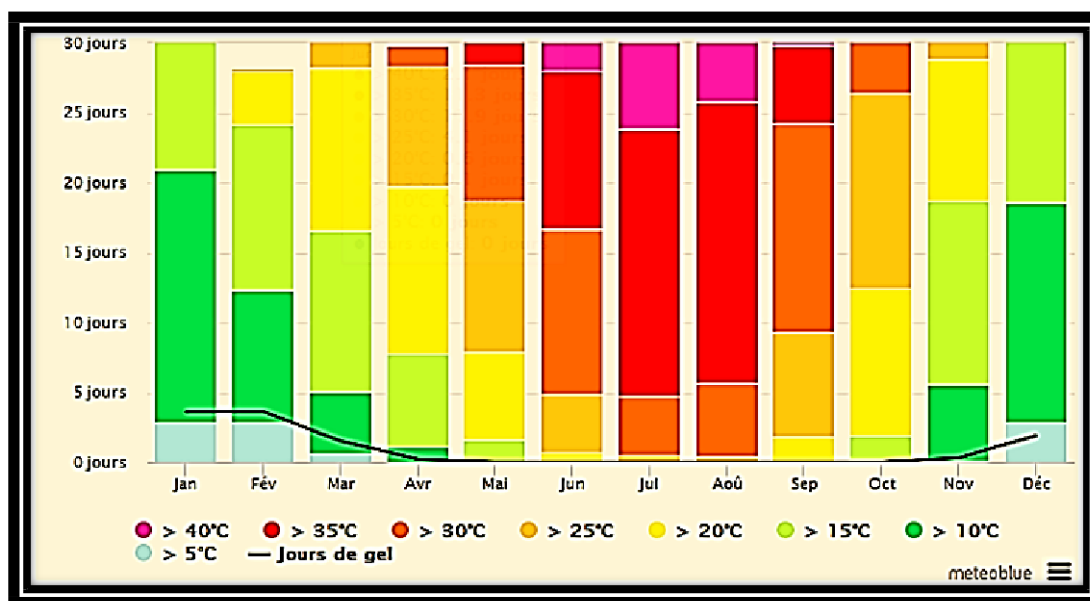


Figure.II.3.la température maximale à M'Sila montre  
le nombre de jours par mois [21].

Le diagramme de la température maximale à M'Sila montre le nombre de jours par mois qui atteignent certaines températures. Dubaï, l'une des villes les plus chaudes de la terre, a très peu de jours en dessous de 40°C en Juillet. Vous pouvez également voir hivers froids à Moscou avec un couple de jours qui se sont même pas atteint -10°C, le maximum quotidien.

## II.4.2.2. Les précipitations :

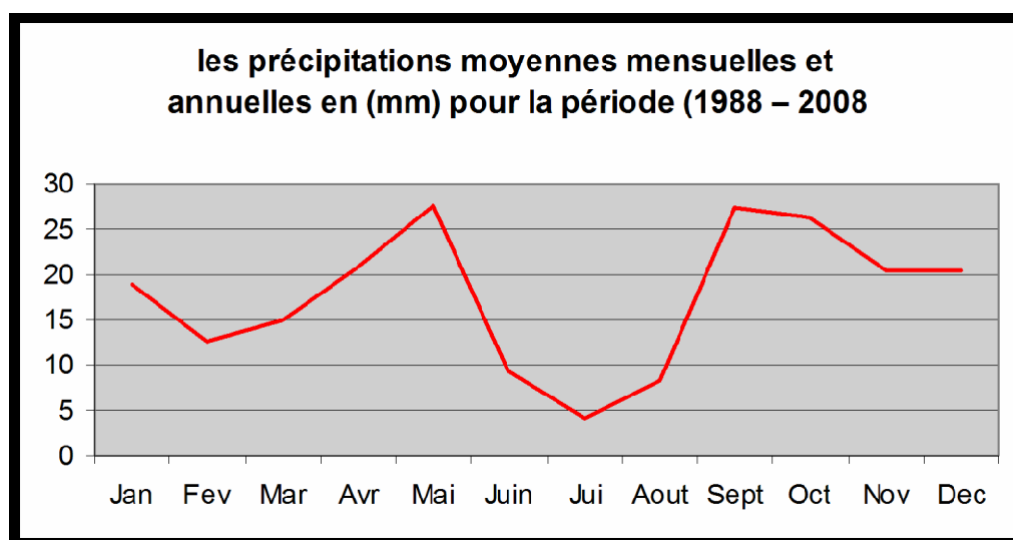
Les précipitations sont l'élément fondamental en milieu steppique D'après ce tableau nous remarquons que le mois le plus pluvieux à M'sila est le mois de mai avec 27.52 mm, alors que le mois le moins pluvieux est le mois de juillet avec 4.19 mm. La région d'étude reçoit en moyenne 211.16 mm de pluie par ans, qui se répartissent ainsi (voir tableau ci-après).

| Mois                                   | Jan           | Fev   | Mar   | Avr   | Mai   | Juin | Jui  | Aout | Sep   | Oct   | Nov   | Dec   |
|----------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| La quantité des précipitations en (mm) | 18,86         | 12,71 | 14,95 | 20,81 | 27,52 | 9,28 | 4,19 | 8,19 | 27,47 | 26,28 | 20,43 | 20,48 |
| <b>Total</b>                           | <b>211,16</b> |       |       |       |       |      |      |      |       |       |       |       |

**Tableau II.3.les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila » [22].**

| Saison    | La quantité des précipitations moyennes en (mm) |
|-----------|-------------------------------------------------|
| Hiver     | 1545.                                           |
| Printemps | 48453                                           |
| Eté       | 57444                                           |
| Automne   | 1.473                                           |

**Tableau II.4.les précipitations moyennes saisonnelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila » [22].**



**Figure. II.4.les précipitations moyennes mensuelles et annuelles en (mm) pour la période (1988 – 2008) « Station météorologique de M'sila » [22].**

## II.4.2.2.1. Quantité de précipitations :

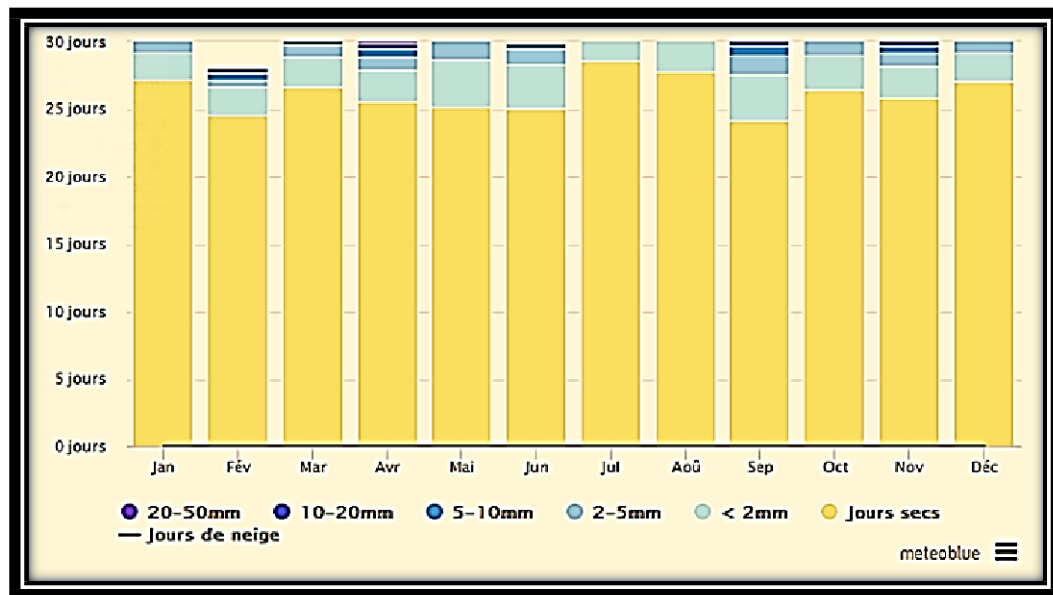


Figure. II.5. La quantité de précipitation dans la région de M'sila, montre combien de jours par mois [21].

Le diagramme de la précipitation pour M'sila indique depuis combien de jours par mois, une certaine quantité de précipitations est atteinte. Dans les pluies tropicales et la mousson peut être sous-estimée.

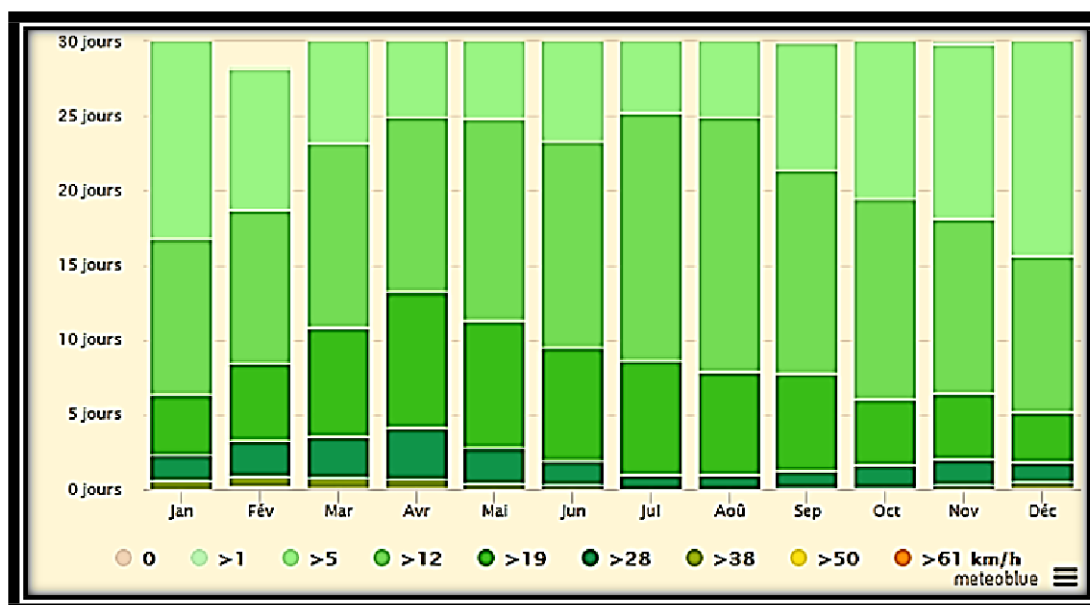
**Note :**

Le graphique des précipitations est utile pour la planification des effets saisonniers. Précipitations mensuelles supérieures à 150mm sont pour la plupart humides, en dessous de 30mm généralement séchés, les quantités de précipitation simulée dans les régions tropicales et terrains complexes tendent à être plus petites que les mesures locales.

### II.4.3. Le vent :

#### II.4.3.1. La vitesse du vent :

C'est le principal agent climatique qui concourt au façonnement des paysages arides et désertiques. Par son action ; il agit en tant qu'agent d'érosion, de transport et d'accumulation. Les roses des vents globales des stations de Boussaâda et M'sila montrent que les vents dominants sont présents en l'hiver et au printemps avec une direction nord-ouest, on remarque aussi qu'il y a une légère dominance du vent faible au secteur Est. A M'sila les vents avec des vitesses supérieures ou égal à 11 m/s sont plus fréquentes [21].

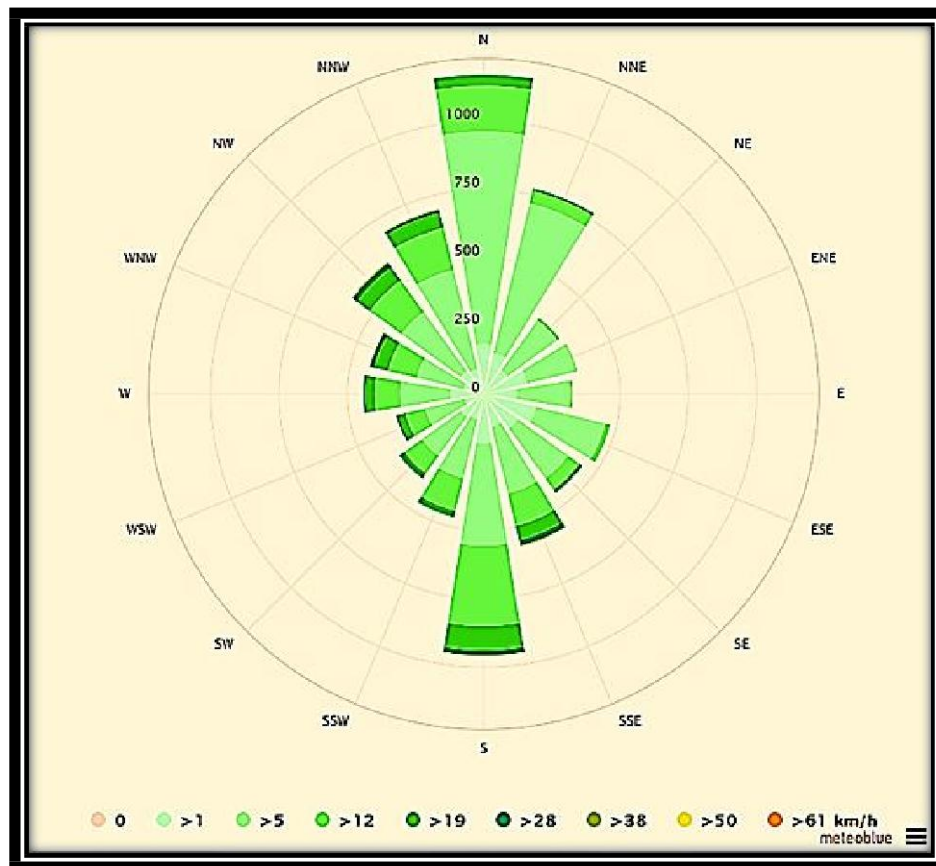


**Figure. II.6. La Vitesse du vent dans la région de M'Sila, montre combien de jours dans un mois [21].**

Le diagramme pour M'Sila montre combien de jours dans un mois peuvent être attendus pour atteindre certaines vitesses de vent. Moussons créent de forts vents stables sur le plateau tibétain de Décembre à Avril, mais les vents calmes de Juin à Octobre.

Les unités de mesure de la vitesse de vent peuvent être modifiées dans les préférences (en haut à droite).

## II.4.3.1. La rose des vents :



**Figure. II.7. La Rose des Vents dans la région de M'Sila, montre combien d'heures par an [21].**

La Rose des Vents pour M'Sila montre combien d'heures par an le vent souffle dans la direction indiquée. Exemple SO : Le vent souffle du sud-ouest (SO) au nord-est (NE).

## II.5. CONCLUSION :

Un climat de steppe est présent à M'Sila. Tout au long de l'année, il y a peu de précipitations à M'Sila. La carte climatique de Köppen-Geiger y classe le climat comme étant de type BSk. M'Sila affiche une température annuelle moyenne de 15.8°C. Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 229 mm.

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

## **CHAPITRE III : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET LA FORMULATION D'UN BCR**

### **III.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.

### **III.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.

#### **III.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

##### **III.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 III.1.une balance et une tamiseuse vibrante.**

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

| Poids initial = 1000 g |             |                   |                 |                  |             |
|------------------------|-------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------|
| Module AFNOR           | Tamis en mm | Refus Partiel (g) | Refus Cumulé(g) | Refus cumulé (%) | 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 III.1. Analyse granulométrique du sable de dune de BOUSAADA.**

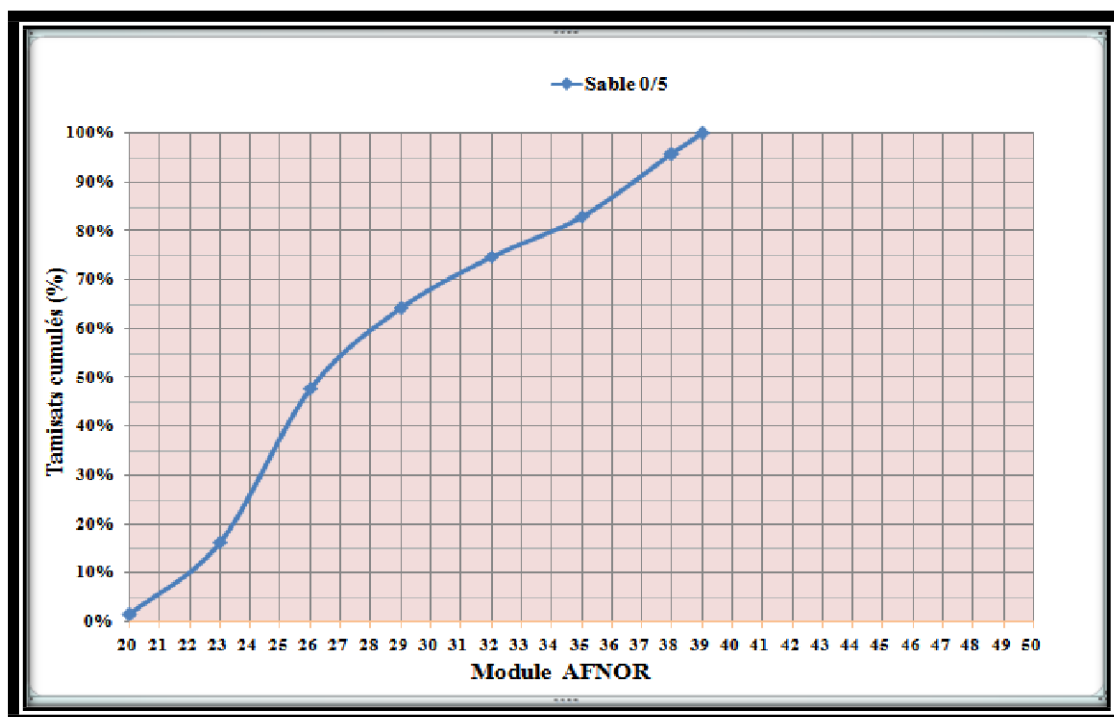


Figure III.3. L'Analyse granulométrique du sable de dune (BOUSAADA).

#### III.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 III.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

### III.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-I8-598 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai [23].

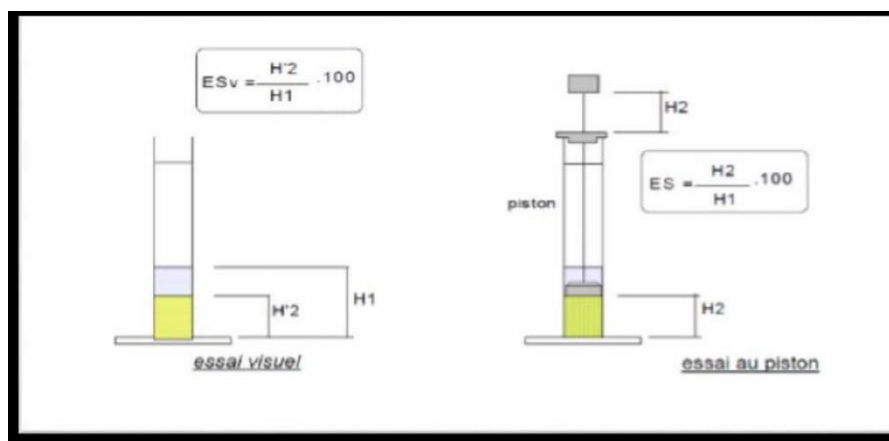


Figure III.4. Essais d'équivalent de sable

- **Mode opératoire :**

- ✓ Remplir les éprouvettes avec la solution lavante, 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 10min.
- ✓ 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 30secondes).
- ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution lavante 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 ESV.

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

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 Esp.

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

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 III.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 III.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.

#### III.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 :  $\rho_{abs} =$

$M/V_1$  III.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 (III.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 III.5. Caractéristique physiques du sable de dune (BOUSAADA).**

**III.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).

### III.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<sub>max</sub>** : 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 (III.6 ; III.7 ; III.8). Les courbes granulométriques de différentes fractions similaires utilisées sont tracés dans la figure(III.2).

| 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 III.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 III.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 III.8. L'analyse granulométrique de gravier (15/20).

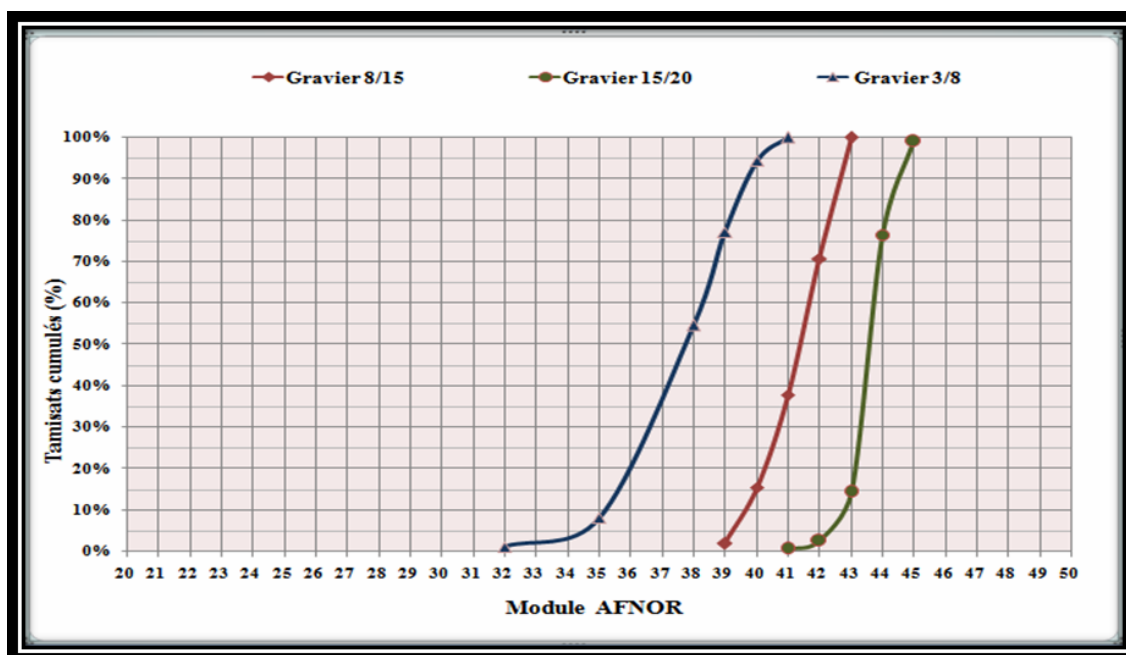


Figure III. 5. Courbe granulométrique des granulats concassés (3/8), (8/15), (15/20).

## III.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) | $\rho_{app}$<br>(kg/L) | $\rho_{app}$<br>(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 III.9. La masse volumique apparente à l'état lâche des graviers.

| Gravier | M (g) | $V_1$ (ml) | $V_2$ (ml) | $\rho_{abs}$<br>(kg/L) | $\rho_{abs}$<br>(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 III.10. Masse volumique absolue des graviers.

**III.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 :

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

**III.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 :

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

**III.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 :

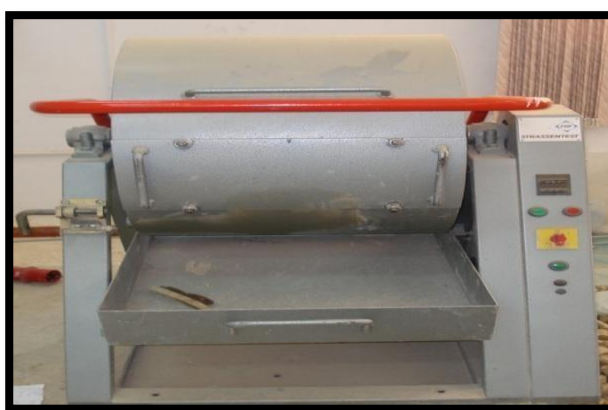
| Fraction de gravier | Porosité (%) | Compacité (%) | l'indice de vide |
|---------------------|--------------|---------------|------------------|
| 3/8                 | 48.41        | 51.58         | 0.938            |
| 8/15                | 48.20        | 51.79         | 0.930            |
| 15/20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

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

**III.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 III.6. 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 III.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 III.13. Classification des roche en fonction du coefficient  $L_A$

- ❖ **Commentaire :**

- Le gravier (3/8) :c'est un gravier dure ( $L_A=21$  %) / ( $L_A$  entre 20 à25),
- 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 à25)

### III.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.

#### III.2.3.1.Caractéristiques physiques :

|                             |          | Unité              | Valeur       |
|-----------------------------|----------|--------------------|--------------|
| Masse volumique absolue     |          | g/cm <sup>3</sup>  | 3.1          |
| Consistance normale         |          | %                  | 25%          |
| La finesse (blaine)         |          | Cm <sup>3</sup> /g | 3000-3200    |
| Le chatelier                | A froid  | Mm                 | 00           |
|                             | A chaud  |                    | 2            |
| Temps de prise              | Début    | Min                | 2:30         |
|                             | Fin      |                    | 3:30         |
| Résistance a la compression | 2 jours  | MPa                | 18           |
|                             | 7 jours  |                    | 32           |
|                             | 28 jours |                    | Plus de 42.5 |

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

#### III.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 % | 20.7             | 4.75                           | 62.92 | 3.75                           | 1.90 | 1.98            | 0.09              |

**Tableau III.15.Les compositions chimiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R**

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

**III.2.3.3. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ -CEM II/B 42,5 R :**

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

| Elements | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|----------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Teneur % | 59               | 14               | 6                | 100               |

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

**III.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.

**III.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 III.17. Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage.**

### III.3.FORMULATION DU BCR ET PROCÉDURES DES ESSAIS RÉALISÉS :

#### III.3.1. Formulation du BCR :

##### III.3.1.1.Fuseau granulométrique :

Pour choisir les pourcentages de différentes fractions d'agrégats il faut que la courbe combiné soit à l'intérieur du fuseau, les résultats sont représentés dans le tableau III.18 et la figure III.7.

| 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 III.18.Tamisât de différentes fractions d'agrégats

## III.3.1.2. La courbe combinée :

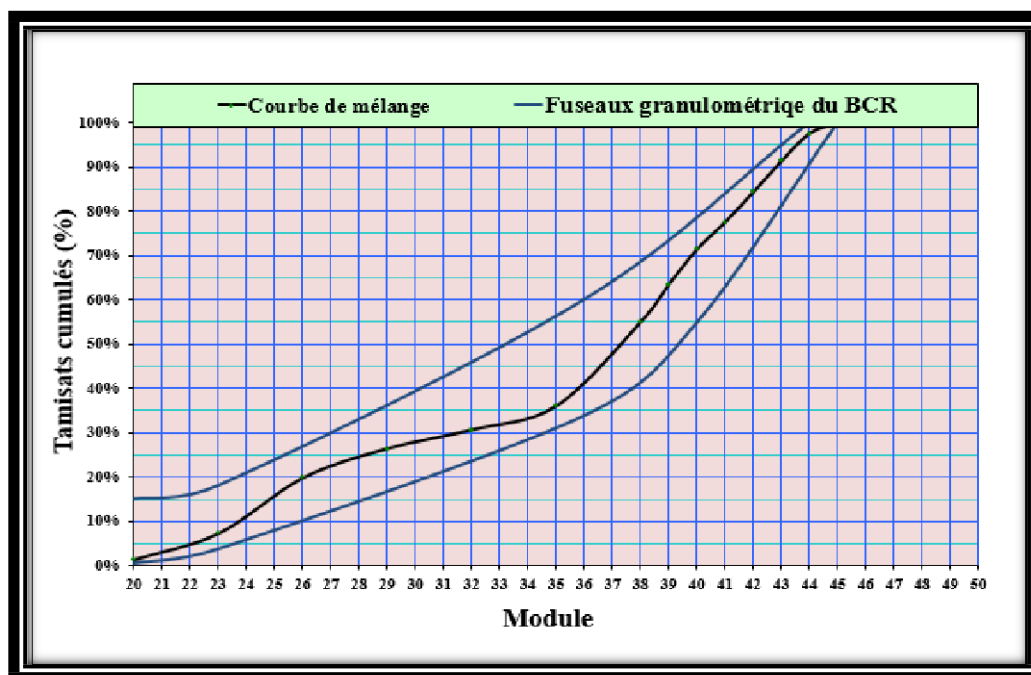


Figure III.7. Fuseau granulaire.

## III.3.1.3. Pourcentage des granulats :

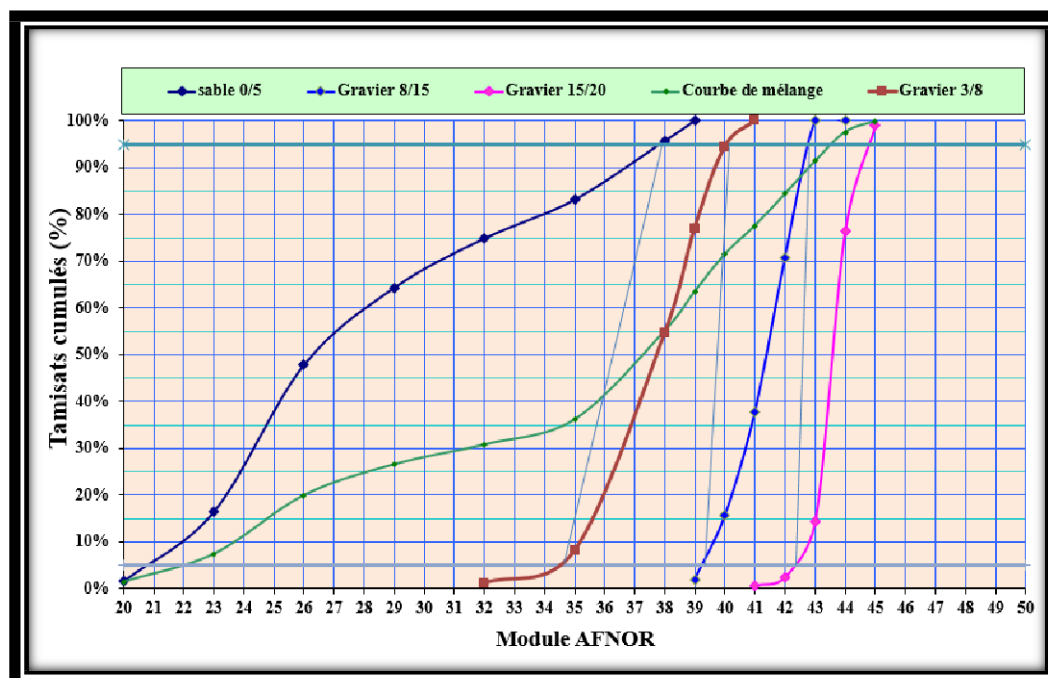


Figure III.8. détermination les pourcentages des différentes fractions des granulats.

D'après le fuseau granulaire correspondant au mélange, nous avons obtenu  
 Les pourcentages des différentes fractions des granulats tels que montrés dans la figure.III.8

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

Tableau III.19. Poucentage des granulats.

#### III.3.1.4. 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 III.9. 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 III.7.
- ✓ 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 III.19.
- ✓ Le moule à 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.III.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 III.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 III.10, 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.

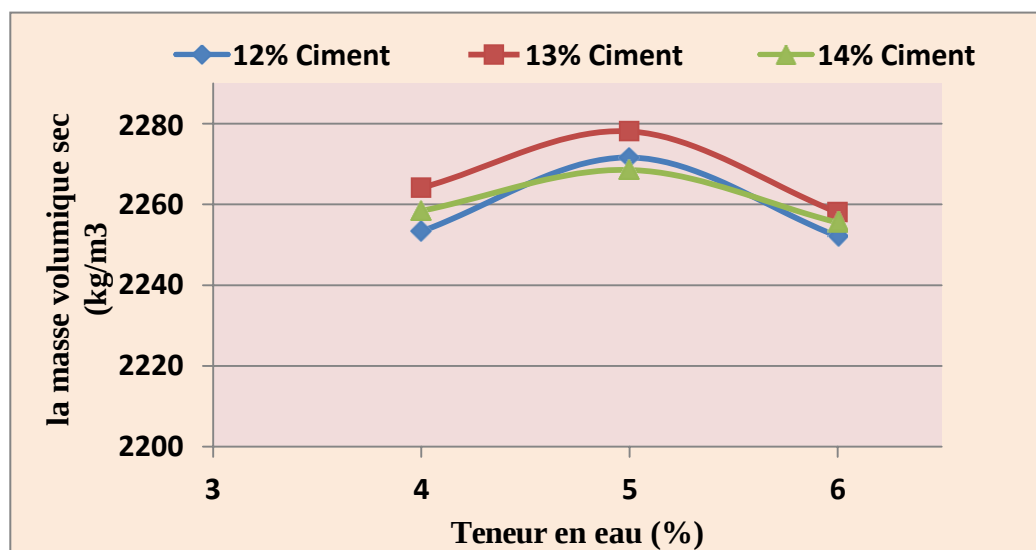


Figure III.10. la densité sèche en fonction de la teneur en eau et le dosage de ciment.

- **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 optimale égale à 5 % de la masse totale des agrégats secs.
- Un dosage en ciment égal à 13% de la masse totale des agrégats secs.

### III.3.1.6. 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 :

|            |       |
|------------|-------|
| Sable de   | 33.9% |
| Gravier3/8 | 27%   |
| Gravier8/1 | 14.8% |
| Gravier15/ | 11.3% |
| Ciment     | 13%   |
| Eau        | 5%    |

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

| Matériaux        | Sable | Gravier3/8 | Gravier8/15 | Gravier15/20 | Ciment | Eau |
|------------------|-------|------------|-------------|--------------|--------|-----|
| Quantité en<br>3 | 732   | 586        | 322         | 246          | 291    | 109 |

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

### III.3.1.7. Confection et conservation des éprouvettes :

Soixante-trois éprouvettes (36 éprouvettes cylindriques 10 x 20 cm<sup>2</sup> et 27 éprouvettes de forme cubique de 10 cm de côté) ont été confectionnées pour déterminer la résistance à la compression. Après finition, les moules sont recouverts par de la membrane plastique, ensuite après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et placées dans leurs environnements respectifs Jusqu'à l'âge d'écrasement qui est de 0, 7, 14 et 28j.

Les environnements de conservation à la membrane sont choisis de telle sorte que le but de cette recherche représente d'une façon un peu près la réalité. Pour cela on a choisi :

**Environnement I** (Climat chaud et sec) : Cure à température T=40°C et humidité relative h= 0%.

**Environnement II** (Climat chaud et humide) : Cure à température T=40°C et humidité relative h= 100%.

**Environnement III** (Climat chaud et sec) : Cure à température T=60°C et humidité relative h= 0%.

**Environnement IV** (climat chaud et humide) : Cure à température T=60°C et humidité relative h= 100%.



Figure III.11. conservation des éprouvettes du BCR dans le four.



**Figure III.12. conservation des éprouvettes du BCR dans la chambre de l'humidité.**

Pour étudier l'influence des méthodes de cure sur la résistance à la compression du béton, un plan expérimental d'essais a été méthodes de cure sur le comportement du béton à la compression.

Vingt-sept (27) éprouvettes cubiques  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  ont été confectionnées et conservées dans les conditions suivantes :

**Environnement (a)** (Cure à l'air libre) : à l'intérieur du laboratoire sa température  $T=20$  à  $25^\circ\text{C}$  et son humidité relative  $h= 25$  à  $45\%$ , (09) éprouvettes conservées à l'air libre (béton compacté de référence).

**Environnement (b)** (Cure dans l'eau) : à l'intérieur du laboratoire sa température  $T=20$  à  $25^\circ\text{C}$  et son humidité relative  $h= 25$  à  $45\%$ , (09) éprouvettes immergées dans l'eau.

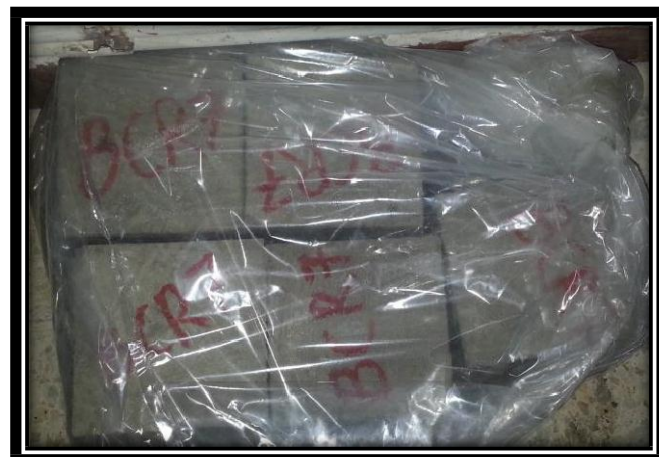
**Environnement (c)** (Cure par film plastique) : à l'intérieur du laboratoire sa température  $T=20$  à  $25^\circ\text{C}$  et son humidité relative  $h= 25$  à  $45\%$ , (09) éprouvettes protégées par un film plastique.



**Figure III.13. Conservation des éprouvettes du BCR dans l'air libre.**



**Figure III.14. conservation des éprouvettes  
du BCR dans un réservoir d'eau.**



**Figure III.15. cure des éprouvettes du BCR  
par film de plastique.**

### **III.3.2. Procédures d'essais réalisés :**

#### **III.3.2.1. Essais sur le béton frais :**

##### **III.3.2.1.1. Maniabilité (ouvrabilité) du béton :**

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].

##### **Essai de Vébé :**

La maniabilité du BCR est mesurée, généralement, à l'aide de l'appareil VEBE l'essai consiste à mesurer le temps requis pour consolider le matériau de manière à former un cordon de mortier, sous l'effet d'une vibration, au pourtour d'une plaque de plexiglas sur laquelle repose une surcharge de 22,7 kg. Cette valeur correspond au temps VEBE soit le temps nécessaire pour que les vides dans le squelette granulaire soient tous remplis par la pâte de ciment(1).

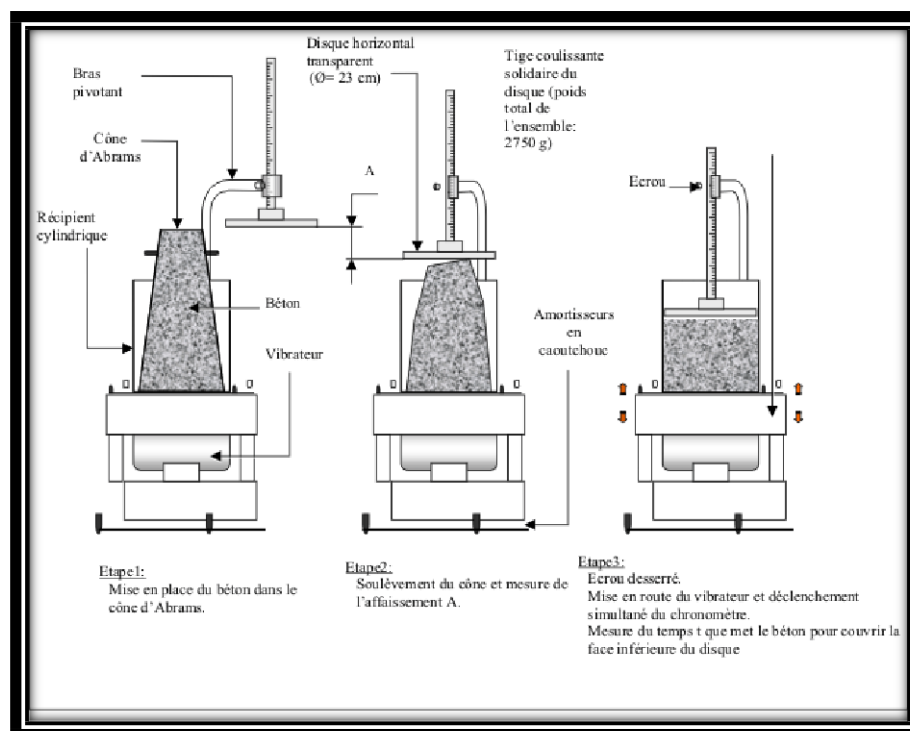


Figure III.16. Mesure de la consistance (Essai Vébé).

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.

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

Tableau III.24. Classes de consistance Vébé en fonction du temps  $t$ .

#### III.3.2.1.2. 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.



**Figure III.17. Mesure de la masse volumique du BCR à l'état frais.**

### **III.3.2.2. Essais sur le béton durci :**

Notre étude comporte la réalisation des essais expérimentaux sur des éprouvettes cylindriques et cubiques pour mesure la résistance à la compression à (07 et 14 et 28) jours.

#### **III.3.2.2.1. La masse volumique sur béton durci (NF en 12390-7) :**

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

C'est-à-dire :  $\rho = M/V$ .

La masse volumique exprimée en **kg/dm<sup>3</sup>** car la densité.



**Figure III.18. Mesure de la masse volumique du BCR à l'état durci.**

**III.3.2.2. 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.



**Figure III.19. la presse hydraulique.**

**III.4. CONCLUSION :**

Dans ce chapitre on a présentés et analysé les résultats de caractérisation des matériaux employés pour la préparation des mélanges de BCR. Les résultats nous ont montré les principales caractéristiques physicochimiques et mécaniques nécessaire pour entamer le programme expérimental.

## CHAPITRE IV

# RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

## CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

### IV.1.INTRODUCTION :

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

Tous les essais ont été réalisés avec trois (03) éprouvettes pour évaluer la résistance à la compression.

### IV.2.L'EFFET DE L'ENVIRONNEMENT DE CONSERVATION SUR LA MASSE VOLUMIQUE DE BCR :

Les résultats obtenus après avoir mesurer la masse volumique juste après la mise en place, puis à 24 heures (après démoulage), à 3j, 7j, 14 et 28j, sont résumés dans le tableau IV.1 et la figure IV.1.

|                                             | Environnement I<br>T=40°C, H=0% |       |       |       |       |       | Environnement II<br>T=40°C, H=100% |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Age<br>(Jours)                              | 0                               | 1     | 3     | 7     | 14    | 28    | 0                                  | 1     | 3     | 7     | 14    | 28    |
| Masse<br>Volumique<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,357                           | 2,331 | 2,313 | 2,292 | 2,264 | 2,255 | 2,357                              | 2,331 | 2,327 | 2,322 | 2,322 | 2,322 |

|                                             | Environnement III<br>T=60°C, H=0% |       |       |       |       |       | Environnement IV<br>T=60°C, H=100% |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Age<br>(Jours)                              | 0                                 | 1     | 3     | 7     | 14    | 28    | 0                                  | 1     | 3     | 7     | 14    | 28    |
| Masse<br>Volumique<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,354                             | 2,328 | 2,280 | 2,252 | 2,238 | 2,235 | 2,354                              | 2,324 | 2,321 | 2,315 | 2,314 | 2,314 |

**Tableau.IV.1.L'effet de l'environnement de conservation sur la masse volumique de BCR.**

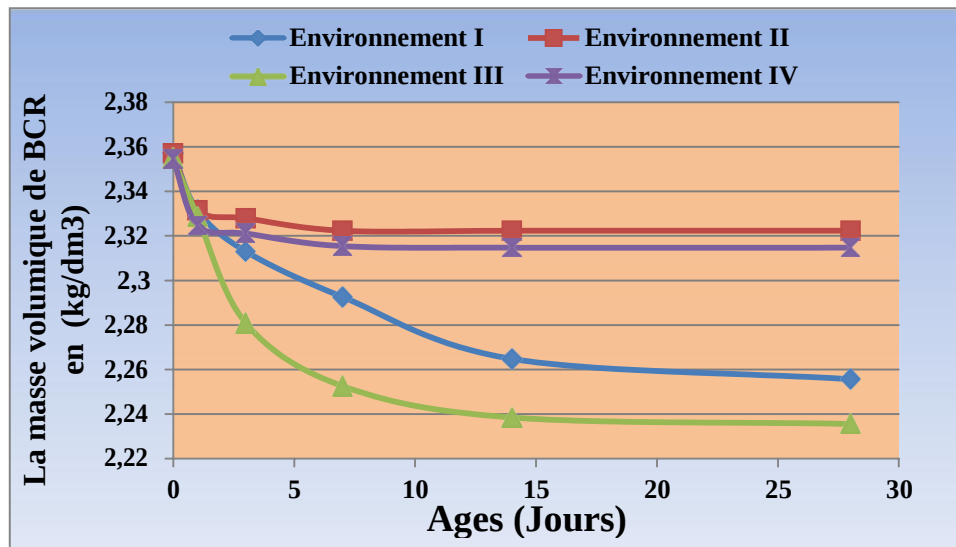


Figure.IV.1. L'effet de l'environnement de conservation sur la masse volumique de BCR.

#### Discussion des résultats :

D'après ces résultats, Une légère diminution est constatée dans les différents types d'environnement de conservation avec l'augmentation de température de conservation, la diminution remarquable est observée avec l'environnement de conservation III ou  $T=60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=0\%$ .

Ceci peut être expliqué par le taux d'évaporation dans le béton dans un climat qui favorise le dégagement d'une quantité d'eau contenue dans la masse de béton et implicitement diminue la masse même cette diminution peut être négligée de point de vue pratique.

#### IV.3. L'EFFET DE L'ENVIRONNEMENT DE CONSERVATION SUR LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DE BCR :

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

| Age (Jours)                          | Environnement I<br>$T=40^{\circ}\text{C}$ , $H=0\%$ |       |       | Environnement II<br>$T=40^{\circ}\text{C}$ , $H=100\%$ |       |       |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|-------|--------------------------------------------------------|-------|-------|
|                                      | 7                                                   | 14    | 28    | 7                                                      | 14    | 28    |
| La résistance à la compression (Mpa) | 18,87                                               | 23,26 | 27,18 | 20,24                                                  | 23,58 | 27,75 |

|                                         | Environnement III<br>T=60°C, H=0% |       |       | Environnement IV<br>T=60°C, H=100% |       |       |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| Age<br>(Jours)                          | 7                                 | 14    | 28    | 7                                  | 14    | 28    |
| La résistance à la<br>compression (Mpa) | 17,57                             | 22,04 | 26,05 | 18,04                              | 22,49 | 26,28 |

Tableau.IV.2. L'effet de l'environnement de conservation sur la résistance à la compression de BCR.

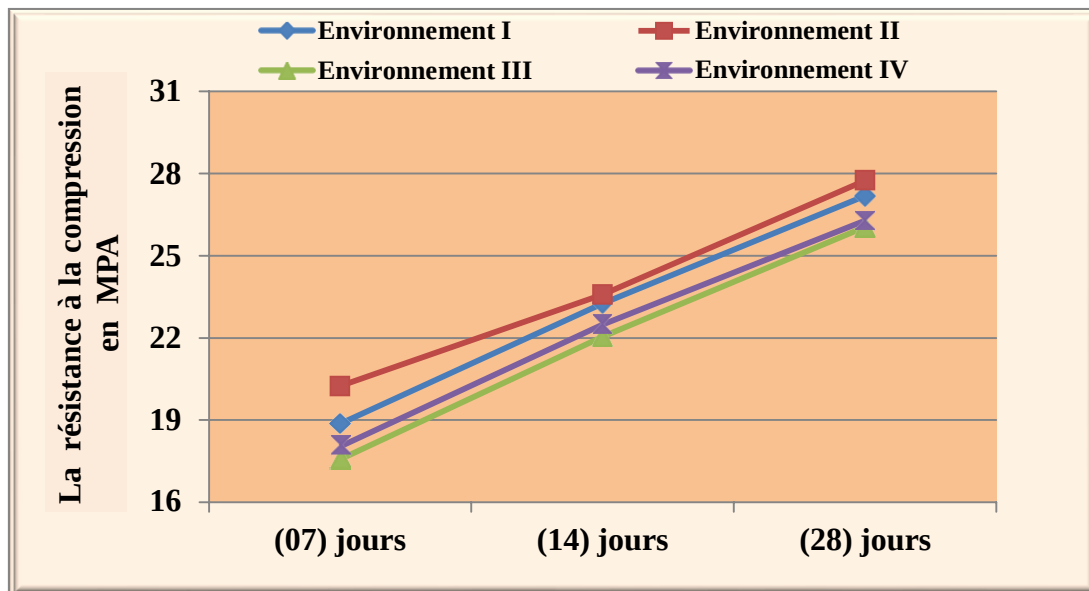


Figure.IV.2. L'effet de l'environnement de conservation sur la résistance à la compression de BCR.

- **Discussion des résultats :**

D'après ces résultats on remarque que la résistance à la compression  $R_c$  diminue avec l'augmentation la température et l'humidité relative nul surtout le degré de la température élevée. Cela est dû à la température la plus élevée, plus l'évaporation accrue de grignotage par l'apparition de microfissures sur la surface des éprouvettes de BCR et de diminuer ainsi un peu en compacité ce qui conduit à une diminution de la résistance à la compression.

#### IV.4. L'EFFET DES MÉTHODES DE CURE SUR LA MASSE

##### VOLUMIQUE DE BCR :

Les résultats obtenus après avoir mesurer la masse volumique juste après la mise en place, puis à 24 heures (après démoulage), à 3j, 7j, 14 et 28j, sont résumés dans le tableauIV.3 et la figureIV.3.

| Age (Jours) | Environnement(a)<br>(cure à l'aire libre) | Environnement(b)<br>(cure par immersion dans l'eau) | Environnement(c)<br>(cure par film de plastique) |
|-------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 0           | 2,338                                     | 2,338                                               | 2,374                                            |
| 1           | 2,310                                     | 2,320                                               | 2,326                                            |
| 3           | 2,282                                     | 2,324                                               | 2,319                                            |
| 7           | 2,261                                     | 2,323                                               | 2,319                                            |
| 14          | 2,256                                     | 2,323                                               | 2,307                                            |
| 28          | 2,256                                     | 2,323                                               | 2,307                                            |

Tableau.IV.3.L'effet des méthodes de cure sur la masse volumique de BCR.

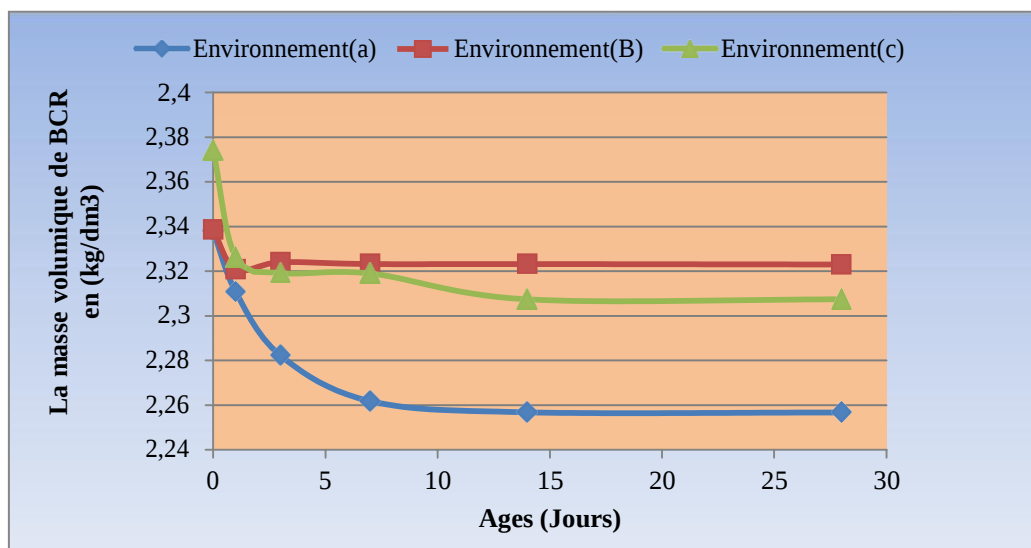


Figure.IV.3.L'effet des méthodes de cure sur la masse volumique de BCR.

- Discussion des résultats :**

D'après ces résultats on remarque que la masse volumique des éprouvettes de BCR immergées dans l'eau constante après sept(07) jours ; et la masse volumique des éprouvettes de BCR protégées par un film plastique constante après quatorze(14) jours. Mais la masse volumique des éprouvettes de BCR conservées à l'air libre diminue au fil du temps ; cela signifie que les méthodes de cure sur la masse volumique de BCR est très important pour minimiser l'évaporation au début de sa prise et protéger le béton compacté au rouleau de toute perte d'humidité jusqu'à la dernière étape de finition de mise en place ; La cure du béton débute lorsque la finition est complétée.

### IV.5.L'EFFET DES MÉTHODES DE CURE SUR LA RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DE BCR :

Il s'agit dans cette section de voir l'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression de BCR. Les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau IV.4 et illustrés dans la figure IV.4.

| Age (Jours) | Environnement(a)<br>(cure à l'aire libre) | Environnement(b)<br>(cure par immersion dans l'eau) | Environnement(c)<br>(cure par film de plastique) |
|-------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 7           | 18,84                                     | 20,74                                               | 20,67                                            |
| 14          | 23,84                                     | 25,54                                               | 24,92                                            |
| 28          | 28,45                                     | 31,44                                               | 30,62                                            |

Tableau.IV.4.L'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression de BCR.

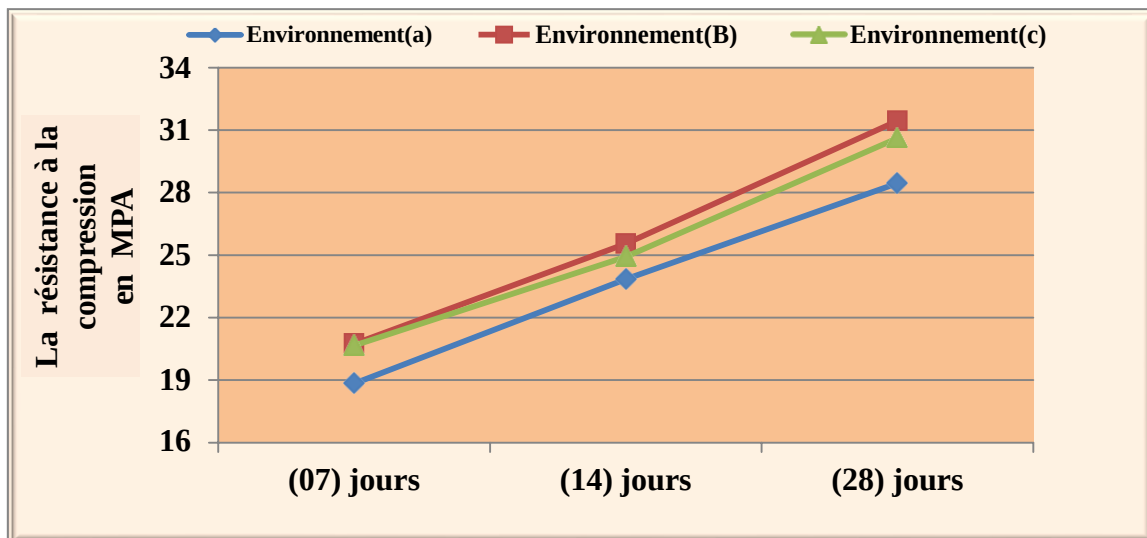


Figure.IV.4.L'effet des méthodes de cure sur la résistance à la compression de BCR.

#### Discussion des résultats

D'après ces résultats on remarque que la résistance à la compression  $R_c$  augmente avec l'utilisation des méthodes de cure (immersion d'eau ou film de plastique). Ceci explique que les méthodes de cure d'aide en béton compacté au rouleau (BCR) à protéger d'un traitement de séchage pour le climat chaud et maintenir ainsi la quantité de l'eau de gâchage afin de compléter la réaction chimique est produit par la résistance à la compression élevée par rapport des éprouvettes de BCR conservées à l'air libre (béton compacté de référence).

# 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 présente une grande résistance et une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges des équipements lourds.

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de ce mémoire consiste à étudier l'effet des conditions climatiques et des méthodes de cure sur les caractéristiques mécaniques du béton compacté au rouleau (BCR). A cet effet, le béton compacté au rouleau a été conservé dans quatre environnements différents simulant ainsi le climat de la région de M'sila à savoir environnement chaud et humide ( $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=100\%$ ) et environnement chaud et sec ( $t^{\circ}=40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $h=0\%$ ).

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

- Le climat a une grande influence sur la résistance du béton à la compression. Leurs facteurs influent positivement ou négativement sur le comportement du béton exposé aux différents types de climat.
- Les propriétés mécaniques du béton compacté au rouleau sont affectées négativement lorsqu'ils sont placés dans un climat chaud et sec (température  $t=60^{\circ}\text{C}$  et humidité relative  $h=0\%$ ).
- Perte de masse volumique du béton compacté au rouleau dans les climats chauds et secs en raison de l'accélération du phénomène de l'évaporation, ce qui provoque des déformations de retrait et des dilatations thermiques dans sa matrice.
- La performance du béton compacté au rouleau dans les climats chauds en fonction de l'étendue de l'utilisation du type de cure.
- Le béton compacté au rouleau (BCR) montre bien une bonne compacité dans un climat chaud en utilisant une cure efficace.
- L'utilisation de différentes méthodes de cure, nous a montré que la cure humide est la plus importante. Ceci est expliqué par le fait que la cure humide consiste à limiter l'évaporation d'eau et accélérer l'hydratation et minimiser l'apparition des microfissures ce qui donne un bon comportement du béton à la compression, Mais l'utilisation des films plastique simple meilleur de point de vue économique. Cette méthode donne des résultats proches de celle de la cure par immersion dans l'eau (cure humide) ;

## **Conclusion générale**

---

- Un travail sur le même thème est recommandé pour confirmer ces résultats.
- Une étude microstructurale de ce type de béton exposé à les mêmes conditions de climat est fortement recommandé pour bien expliquer son comportement.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GAGNE, Richard : Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR. CRIB 2004.
- [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 BCR 2001.
- [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'Ecole 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 Entraîneurs 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.
- [20] Site Web CLIMATE-DATA, <https://www.CLIMATE-DATA.org>
- [21] Site Web meteoblue, <https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate.html>
- [22] O.N.M, " Données météorologiques ", Office National de la Météorologie, (Station météorologique de M'sila) 2008.
- [23] 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.

