

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULADJE-BOUIRA



Faculté des sciences et des sciences appliquées

Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

ZANOUN Boudjema

KHALDI Omar

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **GENIE CIVIL**

Spécialité : **Matériaux en génie civil**

Thème :

Le béton compacté au rouleau (BCR) à base de filler calcaire et ciment

Soutenu le ... / ... / 2018

Devant le jury composé de :

HAMI	Brahim	MCB	Président
ARIBI	Chouaib	MCB	Examineur
AIT AHMED	Fatiha	MAA	Examineur
SAOUDI	Nacira	MAA	Promoteur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu notre seigneur dieu qui nous a donné la force d'achever ce travail

Nous remercions vivement notre promoteur Madame SAOUDI Nacira pour l'aide précieuse qu'elle nous a offert dans l'élaboration de ce travail.

*Nous tenons à remercier sincèrement HAMADACHE
Lounas*

*Et tous les travailleurs au niveau du laboratoire CDL a
ROUIBA*

*Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants et
chef de
Département de génie civil M^r ABDELMALEK et de qui ont
contribué à notre formation.*

*Aussi remercie nos chers parents et nos amis pour leur
soutien moral.*

*Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous
ont aidés, conseillés et encouragés*

Merci

KHALDI Omar

ZANOUN Boudjema



Dédicace

Et ne voilà-t-il par une occasion pour dire quelques mots en guise de reconnaissance pour tous celles et ceux qui sans cesse veillaient jusqu'à l'aube pour qu'aujourd'hui nous soyons là, à toi maman Merci pour avoir veillé sur moi, et priés toujours pour moi, à toi mon père, rien qu'en regardant dans tes yeux je devine l'amour sans limite que tu me réserves merci aussi.

A Mes frères et mes sœurs

A mon promoteur saoudi nacira

Tout le département de génie civil

Et le groupe de matériaux

KHALDI Omar

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Et ne voilà-t-il par une occasion pour dire quelques mots en guise de reconnaissance pour tous celles et ceux qui sans cesse veillaient jusqu'à l'aube pour qu'aujourd'hui nous soyons là, à toi maman Merci pour avoir veillé sur moi, et priés toujours pour moi, à toi mon père, rien qu'en regardant dans tes yeux je devine l'amour sans limite que tu me réserves merci aussi.

Sans oublier aussi ma femme bien aimée

Mes frères hamza et Tahar

Ma sœur Yamina

A mon promoteur saoudi nacira

Tout le département de génie civil

Et le groupe de matérieaux

ZANOUN Boudjema

Liste des abréviations

Liste des abréviations :

C : Cohésion.

φ : l'angle de frottement interne.

ω : teneur en eau.

ω_{opt} : teneur en eau optimal.

OPN : Optimal Proctor Normal.

NF : Norme Française.

γ_d : densité sèche de l'échantillon.

m_s : Masse des grains solides.

V : volume de moule PROCTOR.

w : Teneur en eau de l'échantillon compacté.

Sr : Degré de saturation du sol.

γ_s : Densité des grains solides.

γ_w : Densité de l'eau.

CBR : California Bearing Ratio.

W_L : limite de liquidité.

C.E.C.E : Comite for Européen Construction Equipement

F.N.T.P : fédération national des travaux Public

C.E.M.A.G : Commission d'étude des matériels de Génie Civil.

CCTP : cahiers des clauses techniques particulières.

BCR: Béton Compacté au Rouleau

USA:united States of America.

BCFP: British Colomban Forest Company.

R.C.D: Rolled concrete in dam.

D.L.C: Dry lean concrete.

R.C.C: Roller compacted concrete.

BC : Béton Conventionnel.

E : eau.

L : liant.

FS : Fumé de Silice.

BB: Béton Bitumineux.

ASTM:American Society for Testing and Materials.

P_d : densité sèche.

P_h : densité humide maximale mesurée.

ω : teneur en eau réelle.

CEM : Ciment Portland.

CPJ-CEM II : Ciment Portland composé.

PU : prix unitaire.

CPJ 32 ,5 N : ciment portland aux ajouts a prise normale.

ret : retenue.

Esp : Equivalent de sable piston.

Esv : Equivalent de sable visuelle.

MB : Bleu Méthylène.

ρ_a : Masse volumique absolue :

Liste des abréviations

ρ_{rd} : Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve.

ρ_{ssd} : Masse volumique saturée à surface sèche.

WA₂₄ : Coefficient d'absorption d'eau.

FT : Fond de Tamis.

Coef LA : coefficient Los Angeles.

CPJ -CEM II : Ciment Portland Composé.

NA : Norme Algérienne.

NF : Norme Française.

CDL : Laboratoire de Développement de la Construction.

CBR : California Bearing Ratio.

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau. [1]	2
Figure I.2 : Equipement du compactage du BCR. [5]	5
Figure I.3 : Illustration de l'effet filler.....	8
Figure I.4 : Evolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%). [35]	10
Figure I.5 : Mise en place de BCR par bandes. [9]	13
Figure I.6 : Cure du béton par arrosages ciblés. [10]	14
Figure I.7 : Bâche de protection contre la pluie. [10]	14
Figure I.8 : Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie) [12].	15
Figure I.9 : Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie). [12]	16
Figure I.10 : Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada. [13].....	17
Figure I.11 : Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada. [13].....	17
Figure I.12 : Mise en place du BCR en pavage, Atlanta a USA. [14]	18
Figure I.13 : Schéma de la structure interne des BCR montrant les vides de compactage	20
Figure I.14 : Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand, 2001). [16]	23
Figure I.15 : Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al. 1997 ; Gauthier & Marchand, 2001). [16].....	24
Figure I.16 : Courbes de Proctor(Gauthier & Marchand, 2001). [16]	25
Figure I.17 : photo d'une centrale mobile. [19]	28
Figure I.18 : schéma type d'une centrale mobile. [19].....	29
Figure I.19 : finisseur à haut pouvoir de compactage. [19].....	30
Figure I.20 : rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisses.....	31
Chapitre II :	

Figure II.1 : Un rouleau compacteur et un Compactage dynamique. [49].....	34
Figure II.2 : Compactage par vitro-sonde. [49].....	34
Figure II.4 : Influence de l'énergie de compactage (J.LEREAU, 2006). [52].....	39
Figure II.5 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor. [41]	40
Figure II.6 : courbe de compactage (H.VARLET, 1966). [40]	41
Figure II.7 : Représentation schématique de l'état de saturation (Boutonnier, 2007). [41].....	42
Figure II.8 : Limite des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai Proctor pour des sols fins, (Boutonnier, 2007). [41]	43
Figure II.9 : Appareillage spécifique pour l'essai PROCTOR. [41]	46
Figure II.10 : Position des coups dans le moule Proctor normal et modifié (norme NF P94- 093). [41]	47
Figure II.11 : Diagramme de choix du moule de compactage (norme NF P 94-093). [41]	49
Figure II.12 : Résultats des essais Proctor Normal. Influence des normes appliquées.	53
Figure II.13 : Résultats des essais Proctor modifié. Influence des normes appliquées.....	54
Figure II.14 : Dispositif de compactage statique à double piston. Dennis, 1994. [55]	55

Figure II.15 : Efforts et déplacements du piston, enregistrés en haut et en bas de l'éprouvette pendant un essai de compactage statique. Denis, 1994. [55] 56

Chapitre III :

Figure III.1: Production et malaxage du BCR [58]..... 66
Figure III.2 : Transport et mise en place du BCR par finisseur à haut pouvoir de compactage [58] 66
Figure III.3 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB [62] 68
Figure III.4 : Structure des deux variantes en BB et en BCR. [62]..... 70

Liste des figures

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Une balance hydrostatique et une série des tamis.	73
Figure IV.2 : Etuve à 105° C et bac rempli de sable 0/4.	73
Figure IV.3 : L'analyse granulométrique du sable 0/4(Boussaâda).	74
Figure IV.4 : Essais d'équivalent de sable.	75
Figure IV.5 : Diviseur échantillonneur du sable et une Machine d'agitation.	76
Figure IV.6 : Balance de pesé et deux Cylindre gradué.	76
Figure IV.7 : Papier-filtre et un Agitateur à ailettes.	78
Figure IV.8 : Balance hydrostatique et un thermomètre.	80
Figure IV.9 : un pycnomètre remplie de sable 0/4 un étuve ventilée.	80
Figure IV.10 : étuve à 105°C et une Série des tamis.	82
Figure IV.11 : Bac remplie de gravier 3/8 de Kef Azrou et une Balance de pesé.	83
Figure VI.12 : L'analyse granulométrique du gravier 3/8.	84
Figure IV.13 : L'analyse granulométrique du gravier 8/15.	85
Figure IV.14 : Séries des grilles à fentes.	86
Figure IV.15 : Balance de pesés, bac et une grille a fente.	86
Figure IV.16 : Panier en treillis remplie de gravier 3/8 et une Balance hydrostatique.	89
Figure IV.17 : Chiffons absorbant, doux et secs et un Conteneur de 5 L et une Balance.	89
Figure IV.18 : Entonnoir sur trépied, un conteneur et un récipient.	90
Figure IV.19 : Appareille de los Angeles, un Tamis et un récipient.	92
Figure IV.20 : Boulets d'acier et une Balance de pesé.	93
Figure IV.21 : malaxeur normalisé et un Appareil de Vicat muni de sa Sonde de consistance.	95
Figure IV.22 : Bassin de conservation à 20°C.	95
Figure IV.23 : Malaxeur normalisé et un Appareil de Vicat manuel.	96
Figure IV.24 : Bassin de conservation à 20°C.	96
Figure IV.25 : Appareil de Blain et une balance sensible.	97
Figure IV.26 : Moules prismatique de (4x4x16cm ³) et une Table à choc.	98
Figure IV.27 : Appareil de compression et de flexion et un Malaxeur automatique de mortier.	98
Figure IV.28 : fuseau granulométrique de BCR.	102
Figure IV.29 : Les quantités des granulats utilisés.	103
Figure IV.30 : tableau de gâchage de BCR.	104
Figure IV.31 : Salle de conservation à 20°C, et une Salle de conservation à 30°C.	105
Figure IV.32 : Éprouvettes emballé par du plastique à l'aire libre.	105
Figure IV.33 : Machine de Proctor modifié.	106
Figure IV.34 : Marteau vibrant et Les tige de compactage.	107
Figure IV.35 : Rectifieuse a éprouvette modèle Duo-MATIC.	108
Figure IV.36 : Surfaçage des éprouvettes.	108
Figure IV.37 : Mesure de la masse volumique du BCR à l'état frais.	109
Figure III.38 : Mesure de la masse volumique du BCR à l'état durci.	110
Figure IV.39 : la presse hydraulique.	110

Liste des figures

Figure IV.40 : Extensomètre, presse hydraulique et un PC.	111
Figure IV.41 : Essai de traction par fendage.	112
Figure IV.42 : Une éprouvette soumise à l'essai de fendage et un Dispositif de Fendage.	112

Chapitre V :

Figure V.1 : Densité des BCR en fonction du ciment substitué par fillers calcaire.	115
Figure V.2 : Résistance à la compression des BCR à base des fillers calcaires et densité à 7 jours.	116
Figure V.3 : Résistance à la compression des BCR à base des fillers calcaires et densité à 28 jours.	117
Figure V.4 : Résistance à la compression des BCR à base des fillers calcaires en fonction de l'âge.	118
Figure V.5 : L'effet de l'environnement de conservation sur la densité de BCR à 7 jours. ...	119
Figure V.6 : L'effet de l'environnement de conservation sur la densité de BCR à 28 jours. ...	120
Figure V.7 : L'effet du moyen de compactage sur les BCR à base des fillers calcaire sur la résistance à la compression.	121
Figure V.8 : Effet du dosage en ciment sur la résistance à la compression.	122
Figure V.9 : Résistance à la compression de BCR à base des FC.	123
Figure V.10 : Module d'élasticité des BCR avec filler calcaire.	125
Figure V.11 : l'effet des filler calcaire dans le BCR sur la variation de module de Young. .	126
Figure 12 : Résistance à la traction par fendage des BCR en fonction de ciment substitué par des FC.	127

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Chapitre II :

Tableau II.1 : Caractéristiques de compactage pour l'énergie Proctor normal et modifié.....	49
Tableau II.2 : modalité d'exécution des essais Proctor normal et modifié norme (NF P	50
Tableau II.3 : Liste des normes de compactage appliquée dans certains pays. D'après Zadjaoui, 2007. [55]	51

Chapitre III :

Tableau III.1 : Caractéristiques des granulats utilisés, carrière Kef azrou.....	64
Tableau III.2 : Comparaison des performances de deux types de chaussées (rigide et souple) [62]	69
Tableau III.3 : Les prix estimatif des deux variantes étudié.	71

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Analyse granulométrique du sable 0/4 Kef Azrou.....	74
Tableau IV.2 : Classification des sables en fonction du module de finesse.....	74
Tableau IV.3 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable Esv et Esp.....	77
Tableau IV.4 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable 0/4 de Kef Azrou.....	77
Tableau IV.5 : Tableau des résultats de Bleu de Méthylène du sable 0/4 de Kafe Azrou.	79
Tableau IV.6 : Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et coefficient d'absorption d'eau du sable 0/4	81
Tableau IV.7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 de Kef Azrou.....	83
Tableau IV.8 : Analyse granulométrique du gravier 8/15 Kef Azrou.....	84
Tableau IV.9 : Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8.	87
Tableau IV.10 : Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.	88
Tableau IV.11 : masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 3/8.	90
Tableau IV.12 : masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 8/15.	91
Tableau IV.13 : classe granulaires et les nombres de boulets correspondant.	93
Tableau IV.14 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	93
Tableau IV.15 : Classification des roche en fonction du coefficient LA.	94
Tableau IV.16 : Caractéristiques physique du ciment matine (CPJ -CEM II/B 42,5 R).	99

Liste des tableaux

Tableau IV.17 : .Caractéristiques physico-mécanique du mortier normalisé avec substitution des fillers calcaires.	99
Tableau IV.18 : Les compositions minéralogiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R.	100
Tableau III.19 : Les compositions chimiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R (matine).	100
Tableau III.20 : Caractéristiques physique du CHMIL 32,5 N.....	100
Tableau IV.21 : Les compositions minéralogiques du Chamil 32,5 N.	101
Tableau IV.22 : Caractéristiques chimique du ciment utilisé (Chamil 32,5 N).	101
Tableau IV.23 : méthode de compacité.....	103

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Densité de BCR à base de fillers calcaire en fonction de jours.	114
Tableau V.2 : L'effet de l'environnement de conservation sur la densité de « BCR ».....	118

Sommaire

Sommaire :

Chapitre I :Synthèse bibliographique sur le BCR (béton compacté au rouleau).

Résumé :	1
I-1. Introduction :	1
I.2. Historique :	2
I.3. Définition du BCR :	4
I.4. Les composants :	5
I.4.1. Le liant :	5
I.4.2. Les granulats :	6
I.4.3. L'eau :	6
I.4.4. Les fillers :	7
I.4.4.1. Définition :	7
I.4.4.2. Effets	7
I.4.4.3. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes	8
I.4.4.4. Influence du filler sur l'état durci	9
I.5. Caractéristiques du BCR :	10
I.6. Propriétés mécaniques et physiques du BCR :	11
I.6.1. Résistance à la compression :	11
I.6.2. Résistance à la traction :	11
I.6.3. Résistance au cisaillement :	11
I.6.4. Résistance à la flexion :	12
I.7. Préparation et mise en place du BCR :	12
I.8. Cure du BCR :	14
I.9. Applications :	14
I.9.1. Le BCR en corps des barrages :	14
I.9.2. Le BCR en technique routière (Pavages) :	17
I.10. BCR et béton conventionnel :	19
I.11. Avantages et inconvénient du BCR :	20
I.11.1. Avantages du BCR :	20
I.11.2. Inconvénients du BCR :	21
I.12. Méthodes de formulation :	22
I.12.1. Méthode basée sur les limites de maniabilité	22
I.12.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique :	23
I.12.3. Autres méthodes :	25
I.13. Production :	26
I.13.1. Les Centrales fixes :	27
I.13.2. Les Centrales mobiles :	28
I.13.3. Transport :	29
I.13.4. Mise en place :	30
I.14. Compactage du BCR :	31
I.14.1. Matériels de compactage :	31
I.14.2. Opération :	31
I.16. Conclusion :	32

Sommaire

Chapitre II :Notions fondamentales sur le compactage

II. Notions fondamentales sur le compactage :	33
II.1.Introduction :	33
II.2. Définition de compactage :	33
II.3.Objectif du compactage	34
II.3.1. Suppression des tassements	35
II.3.2. Suppression des tassements différentiels.....	35
II.3.3.Elévation des caractéristiques mécaniques.....	35
II.3.4. Augmentation de la cohésion C et de l'angle de frottement interne.....	35
II.3.5. Constatation banale des tassements	36
II.3.6.Augmentation du module de déformation	36
II.4. Classification des sols en vue du compactage	36
II.5.Théorie de compactage	37
II.5.1. les facteurs qui influencent le compactage	38
a) Energie de compactage	38
b) Influence de la nature du sol	39
c) Teneur en eau	40
d) Teneur en eau des matériaux fins.....	41
e) Résistance à la pénétration des terres saturées	41
II.6. États de saturation d'un sol compacte	41
II.7. Les effets du compactage sur certaines propriétés des sols.....	43
a) La structure des sols.....	43
b) La perméabilité	43
c) Le gonflement et le retrait.....	43
d) La compressibilité.....	44
e) La résistance au cisaillement	44
II.8.Compactage dynamique	44
II.8.1. Essai Proctor	45
II.8.1.1.Appareillage spécifique	45
II.8.1.2. Appareillage d'usage courant d'usage courant.....	45
II.8.1.3. Procédure expérimentale	46
II.8.1.4. Expression des résultats.....	47
II.9.quantite de matériaux - choix du type de moule.....	48
II.10. Normes de compactage.....	49
II.11. Compactage statique.....	52
II.11.2. Techniques de compactage statiques	53
II.12.Quelque notion sur le compactage sur chantier.....	54
II.12.1. Les engins de compactage :	54
II.12.1.1.Généralités :	54
II.12.1.2.Définition Générale :	55
II.12.1.3.Classement des engins :	55
II.12.1.4.Rouleaux à bandage lisse :	56

Sommaire

a) Historique et généralité.....	56
b) Description générale et classements	56
c) Poids total en charge	56
II.12.1.5.rouleaux a pneu :.....	57
i. Généralité :.....	57
ii. Paramètres de compactage :.....	57
iii. Classification des compacteurs à pneus :.....	57
II.12.1.6.Rouleaux vibrants :.....	57
i. Généralité :.....	57
II.12.1.7.Rouleaux a pieds dameurs :	58
i. Définition :	58
II.12.1.8.Rouleaux à segments :	58
II.13. Mise en œuvre des remblais :	58
II.14. Contrôles de compactage :.....	59
II.15. Conclusion :	60
Chapitre III : Etude comparative et économique entre le BCR et le béton bitumineux	
III.1. Introduction	60
III.2. Le béton compacté au rouleau :.....	61
III.2.1. Constituants d'un mélange de BCR.....	61
III.2.2. Les procédés de mise en place du BCR en couche de roulement	62
III.3. Le béton bitumineux (BB).....	64
III.3.1. Caractéristiques et mise en œuvre principales du béton bitumineux	64
III.4. Différence entre chaussée en BCR et chaussée en béton bitumineux.....	64
III.5. étude économique.....	66
III.5.1. Evaluation économique	66
III.5.2. Interprétation	67
III.6. Conclusion.....	67
Chapitre IV :Caractérisation des matériaux utilisés et la formulation d'un BCR.	
IV.1. Introduction :	72
IV.2. Matériaux utilisés :.....	72
IV.2.1. Caractéristique du sable :	72
IV.2.1.1. Analyse granulométrique (NA 2607) lavage et tamisage :.....	72
IV.2.1.2. Module de finesse selon la norme (NA2607) :	74
IV.2.1.3. Propreté « équivalent de sable» selon la norme (NA 455) :	75
IV.2.1.4. Essai de bleu méthylène (NA 1984) :	78
IV.2.1.6. Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et Coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6) :	79
IV.2.2. Caractéristiques des graviers :.....	81
IV.2.2.1. Analyse granulométrique lavage et tamisage (NA2607)	81
IV.2.2.2. Coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3) :	85
IV.2.2.3. La masse volumique (NF EN 1097-6)	88

Sommaire

IV.2.2.6. La résistance à la fragmentation par chocs, essai Los Angeles selon la norme (P 18-573) :	91
IV.2.3. Caractéristiques du ciment utilisé (ciment matine CPJ -CEM II/B 42,5 R) :	94
IV.2.3.1. Caractéristiques physiques :	94
IV.2.3.1.1. la consistance normale (EN 196-3) :	94
IV.2.3.1.2. Le temps de prise (EN 196-3)	95
IV.2.3.1.3. La finesse (Blaine) (EN 196-6)	97
IV.2.3.1.4. Définition du mortier normal (EN 196-1)	97
IV.2.3.2. Définition du mortier normal (EN 196-1) avec substitution du ciment par des fillers calcaires	99
IV.2.3.3. Les caractéristiques minéralogiques du ciment matine (CPJ -CEM II/B 42,5 R) :	100
IV.2.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ -CEM II/B 42,5 R (matine) :	100
IV.2.3.4. Caractéristiques du ciment utilisé (ciment Chamil CPJ -CEM II/B 32,5 N) :	100
IV.2.3.4.1. Caractéristiques physiques :	100
IV.2.3.4.2. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ-CHAMIL 32,5 N :	101
IV.2.3.4.3. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ 32,5 N (Chamil) :	101
IV.2.3.5. Les caractéristiques des fillers calcaire :	101
IV.3. Formulation du BCR et procédures d'essais réalisés :	102
IV.3.1. Formulation du BCR :	102
IV.3.1.1. Fuseau granulométrique :	102
IV.3.1.2. La méthode de formulation de BCR	102
IV.3.1.7. Confection et conservation des éprouvettes :	104
IV.3.2. Méthode de confection par compactage utilisé :	106
IV.3.2.1. Méthode de confection par compactage au Proctor modifié (NF P 49 093) :	106
IV.3.2.2. Méthode de confection par compactage au marteau vibrant (NF EN 13286-51) :	106
IV.3.3. surfaçage des éprouvettes :	107
IV.3.3.1. surfaçage des éprouvettes avec la machine :	107
IV.3.3.2. surfaçage des éprouvettes à l'aide du ciment rouge :	108
IV.3.4. Procédures d'essais réalisés :	109
IV.3.4.1. Essais sur le béton frais :	109
IV.3.4.1.1. La masse volumique sur béton frais (NF EN 12350-6) :	109
IV.3.4.2. Essais sur le béton durci :	109
IV.3.4.2.1. La masse volumique sur béton durci (NF EN 12390-7) :	109
IV.3.4.2.2. Détermination de la résistance à la compression (NFP18-411)	110
IV.2.2.3. Le module d'élasticité du BCR (module de YOUNG) :	111
IV.2.2.4. La résistance à la traction par fendage (NF.P 18 408) :	111
IV.3. Conclusion :	113
Chapitre V : Résultats et discussions	
V.1. Introduction :	114
V.2. Formulation de BCR en substituant le ciment par les fillers calcaires (compactage Proctor modifié) :	114
A) L'environnement de conservation à 20°C :	114
B) L'environnement de conservation à 35°C :	118

Sommaire

V.3.Effet de l'énergie de compactage de BCR :	120
V.4.L'effet du dosage en ciment :	122
V.5.Les BCR à base des fillers calcaires compacté par marteau vibrant :	123
a) Résistance à la Compression :	123
b) Le module d'élasticité du BCR (module de YOUNG) :	124
c) La résistance à la traction par fendage (essai brésilien) (NF.P 18-408) :	126
V.6.Conclusion.....	128

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

1. Préambule :

Les infrastructures routières coûtent très chères. Les pays en développement les réalisent en s'endettant énormément. Un constat évident de nos jours par les usagers de la route, c'est la dégradation rapide de cette dernière du fait des sollicitations et de l'accroissement du trafic.

En Algérie, la politique veut toujours que les routes soient en chaussées souples or celles-ci présentent certes des avantages mais, nécessitent un entretien qui s'avère couteux durant la vie de la structure. De plus, le bitume est importé, ce qui constitue un grand inconvénient du point de vue économie. Il devient donc nécessaire voire impératif de trouver un mode de construction des chaussées qui puisse allier durabilité, dureté et économie. C'est ainsi que nous avons pensé à l'utilisation du Béton Compacté au Rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées.

Le béton compacté au rouleau est un matériau défini comme étant un mélange, raide à l'affaissement nul, composé de granulats, de ciment, et d'eau et d'adjuvants (éventuellement avec ajouts cimentaires), il 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.

Les premières chaussées réalisés en BCR présentent des inconvénients en terme de cout (prix du ciment) en plus du comportement en service des dégradations recensé dans des différents environnements par le laboratoire LAFARGE exemple les fissures en service. Cette thématique nous a été proposé par le laboratoire CDL (LAFARGE Algérie) afin de remédier en substituant le ciment par les fillers Calcaires et d'estimé un taux optimale convenable de point de vue économique et mécanique.

2. Objectif :

Ce travail a comme but d'étudier l'effet des fillers calcaire sur le comportement mécanique (compression, traction) et à développer des méthodes de compactage. C'est-à-dire des méthodes simple efficaces et moins couteuses pour que le béton compacté au rouleau (BCR), élaboré possédera des bonnes propriétés mécaniques. Ainsi de voir l'intérêt économique et écologique de béton compacté au rouleau (BCR).

3. Structure du mémoire :

Ce mémoire est scindé en deux parties. Une partie théorique qui contient trois chapitres à savoir primo une synthèse bibliographique d'un béton compacté au rouleau (BCR), en second, les notions fondamentales sur le compactage, et un chapitre comme étude comparative et économique entre le BCR et le béton bitumineux. La partie expérimentale est devisée en deux chapitres. Un chapitre qui présente la caractérisation des matériaux utilisés et la formulation de BCR, ensuite les résultats obtenus ainsi que la discussion de ces résultats. Ce manuscrit s'achève par une conclusion générale enfin les références bibliographiques.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR (béton compacté au rouleau).

Résumé :

Ce chapitre présente une revue de la documentation sur la technologie du Béton Compacté au Rouleau (BCR). Il parcourt en premier lieu la notion du BCR puis son historique. Par la suite, les techniques d'utilisation du BCR en corps de barrage et en routes sont couvertes. Les performances et les caractéristiques du BCR sont aussi traitées.

Une description est consacrée aux différents composants du BCR ainsi que ses différents procédés et techniques de mise en place. Enfin, les travaux de recherches sur le BCR, tel que les méthodes de formulations, de conception et de modélisations, sont présentés.

I-1. Introduction :

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR), en tant que matériau, est défini comme étant un mélange raide sans affaissement de granulats inertes, de ciment et d'eau avec éventuellement des additions et qui est mis en place par compactage à l'aide des engins de travaux publics (Finisseur, rouleau compresseur vibrant, plaques vibrantes...).

Le BCR est un matériau qui couvre une grande diversité d'application : Barrages, routes de transport, rues, aires de stationnement... Il est considéré comme économique, rentable et non polluant, à mise en place rapide et qui convient parfaitement aux chaussées et aires de stockage fortement sollicités.

Le BCR s'est développé selon deux axes différents : le BCR pour barrages et ouvrages massifs, et le BCR pour routes (pavages). La formulation, les méthodes de confection et les méthodes de mise en œuvre diffèrent en fonction du type de BCR (Figure 1). Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930. La première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord date depuis 1942. Alors que la première application du BCR publiée au Canada a été construite en 1976. Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Chine, Australie et d'autre pays. Des études expérimentales sont faites par Gauthier et al, au centre de recherche interuniversitaire sur le béton à l'université Laval au Canada pour caractériser et évaluer des mélanges de BCR avec des dosages en ciment variant de 225 à 300 kg par m³. Généralement, on cherche à employer que des matériaux résistants, peu sensibles à l'eau, et susceptibles d'être compacté. En Afrique, le BCR reste

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

jusqu'à maintenant une nouvelle technique et ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages de Rmil en Tunisie et Koudiat Acerdoune en Algérie, alors que l'utilisation de ce matériau en pavage n'est pas encore abordée.

D'autre part, la répartition et la surabondance des matériaux granulaires naturels roulés et concassés (sables et graviers), l'implantation presque uniforme des cimenteries sur les territoires, les difficultés d'approvisionnement en liants hydrocarbonés, le moindre coût et le délai de réalisation réduit du BCR sont des facteurs qui nous mènent à des réflexions sur la réalisation des études de caractérisation et de facilité en vue d'une utilisation de ce matériau en techniques routières. La Figure 1 présente disposition du BCR par rapport aux autres matériaux. [1]

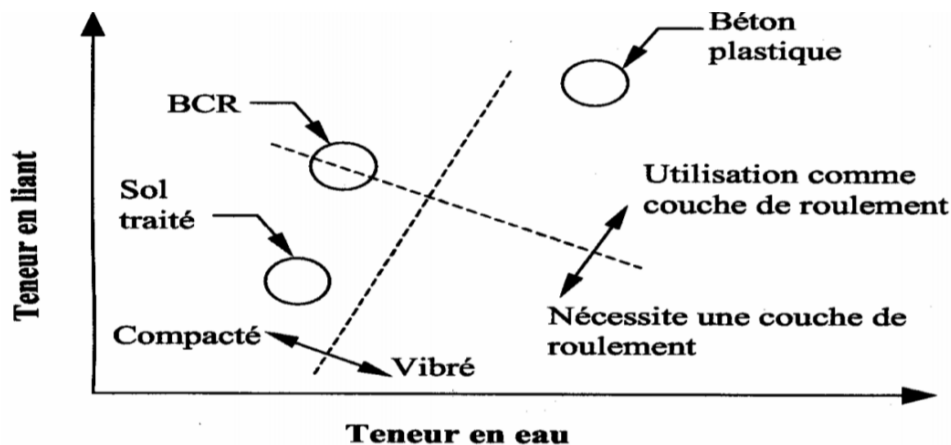


Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau. [1]

I.2. Historique :

Des chercheurs tel que Jeuffroy et Sauterey ont considéré que l'emploi des liants hydrauliques ou pouzzolaniques dans les structures de chaussées a commencé dès le 1^{er} siècle avant J-C par les Romains, puisqu'une proportion de liant (2 parties de pouzzolane naturelle + 1 partie de chaux) a été destinée et utilisée pour lier les pierres des chaussées romaines. Ces chaussées, assurant le roulage des chars, sont composés par de dalles et sont considérées comme les ancêtres des chaussées rigides en béton.

En France, les chaussées en béton ont été réalisées au début du 20^{ème} siècle sur quelques tronçons de routes d'approvisionnement dans la zone de Grenoble entre les cimenteries et les carrières. C'est en 1924 que la direction des Ponts et Chaussées du Pas-de-Calais, a lancé un

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

programme de transformation d'empierrements et d'anciens pavages en béton, notamment sur la route Nationale N° 43 entre Lillers et Chocques.

Après ce succès plusieurs autres projets ont été réalisés dans le département du Nord pour la construction des routes nationales et de voies départementales de longueur totale dépassant 100 km. Le procédé consiste à la récupération des pavés pour construire des bordures et des caniveaux afin de caler la chaussée en béton. On a utilisé aussi le sable de pavage de l'ancienne chaussée comme une couche de base. Cette couche a été d'abord étalé puis compacté, sur laquelle un béton relativement sec était mis en place et cylindré. Ce procédé peut être considéré comme l'ancêtre du Béton Compacté. La chaussée ainsi construite, est composée de deux couches, une couche inférieure réalisée avec des matériaux roulés et un faible dosage en ciment (250 kg/ m³), alors que la couche supérieure est plus mince et plus fortement dosée (400 kg/ m³) et elle est à base de granulats durs concassés. Les deux couches sont exécutées l'une après l'autre sans interruption afin d'assurer une forte adhérence. Plusieurs autres applications ont été réalisées en Europe en général. Jeuffroy et Sauterey, ont indiqué que la Belgique avait réalisé, à partir de 1912, des routes et des aires bétonnées sur les accès des mines. L'Allemagne a réalisé aussi, à partir de 1933, les premiers grands chantiers de construction d'autoroutes avec chaussées rigides. La France a réalisé également en 1938, le tronçon de l'autoroute de l'Ouest de Saint-Cloud à Orgeval en béton. Le procédé consiste à l'utilisation de bétons relativement secs et le serrage était particulièrement énergique. La finition de ces bétons serrés, était assurée par une finisseuse transversale.

Dans le continent Américain, Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930. Aux USA la première chaussée rigide, d'après Huang a été construite en 1893 à Bellefontaine (Ohio) et la deuxième en 1908 à Michigan. Les premières utilisations du BCR sous forme de Bétons très maigres et Compactés au Rouleau pour la construction de barrages reviennent à 1960. Les statistiques de 2001 montrent que près de 95 000 km aux USA ont été construits en béton hydraulique. Selon Gauthier et al, la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord date depuis 1942 par le corps des ingénieurs de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers) qui ont construit une voie à Yakima.

Gauthier et Marchand ont précisé que la première application du BCR au Canada date depuis 1976 et comporte la réalisation d'une aire de stockage de bois d'une surface de 52 000 m² sur l'Île de Vancouver par British Colomban Forest Company (BCFP). La même surface a été doublée en 1978. Ces premières applications ont été faites pour l'industrie forestière qui cherchait des pavages extrêmement résistants. Actuellement on construit des pavages en BCR

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

avec des épaisseurs variant de 20 cm à un mètre pour la construction de rues, d'aires industrielles et d'aires d'entreposages.

Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Australie et d'autres pays. On remarque aussi, d'après Gauthier et al, que la majorité des revêtements en BCR construits dans le monde (USA, Canada, Espagne...) ont été fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale compris entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs. On constate aussi une grande utilisation des ciments ternaires composés de ciment, de laitiers et de fumée de silice ou composés de ciment, de cendres volantes et de fumée de silice.

Au Canada, par exemple, le Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB), a réalisé une vaste étude sur la durabilité au gel et à l'écaillage de revêtements routiers en BCR. Cette étude a permis de développer des nouvelles méthodes de formulation et des nouvelles compositions pour des mélanges de BCR durables. Les bibliographies précisent qu'aucun projet de construction de revêtements en BCR n'a été réalisé jusqu'à maintenant au Québec en employant un mélange de BCR avec de faibles teneurs en ciment (teneur en ciment inférieure à 250 kg/m³).

En Tunisie et en Afrique, le BCR reste, jusqu'à maintenant, une nouvelle technique et il ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages d'Errmil en Tunisie, Koudiat Acerdoune en Algérie et Ain Al Koreima au Maroc, alors que l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée. [2].

I.3. Définition du BCR :

L'expression «Béton Compacté au Rouleau» et le sigle correspondant «B.C.R. » se sont imposés dans la langue française pour désigner un ensemble de produits ou de techniques désignés par des expressions variées dans la littérature anglaise : «Rolled concrete in dam» (R.C.D.) utilisé par les Japonais, «Dry lean concrete» (D.L.C.), «Roller compacted concrete» (R.C.C.), utilisés par les auteurs de langue anglaise avec des significations parfois divergentes. [3]

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) est un béton à faible teneur en eau et composé d'un mélange de ciment, d'agréments inertes et d'eau de gâchage. L'affaissement de ce mélange est nul. Ainsi, tel qu'indiqué par Gauthier et Marchand, il est mis en place et compacté en utilisant un matériel spécifique comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou un matériel couramment utilisé en travaux publics (tel que les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

bulldozers, plaques vibrantes...). D'après Gauthier et al, la teneur en liant dans le BCR est particulièrement plus faible comparée à celle d'un Béton Conventionnel (BC). Le dosage en liant varie de 60 à 300 kg/m³. L'amélioration de certaines caractéristiques des mélanges de BCR, à l'état frais ou durci, peut être faite par des ajouts minéraux, naturels ou artificiels, pré-mélangés ou non au ciment, tels que les fumées de silice, les laitiers et les cendres volantes. Les adjuvants du BC sont aussi employés pour l'optimisation de caractéristiques du BCR. Le BCR est distingué par sa consistance qui est identique à celle d'un sol humide alors que l'énergie de compactage est supérieure à celle de la vibration usuelle chez les BC (béton conventionnel). Le BCR s'est développé selon deux axes différents :

- BCR pour les structures de contrôle des eaux (barrages) et ouvrages massifs,
- BCR pour routes (appelés aussi pavages). [4]



Figure I.2 : Equipement du compactage du BCR. [5]

I.4. Les composants :

I.4.1. Le liant :

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

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

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

Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m³, soit une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

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

I.4.2. Les granulats :

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

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

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

• Ces granulats ont un indice de plasticité non mesurable et une teneur en matière organique inférieur à 0.2 %. Il faut noter que le choix d'un D élevé a comme avantages :

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

Quand max granulats fins, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc une bonne compacité à l'état durci. Toutefois, un pourcentage élevé de fines entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place. [6]

I.4.3. L'eau :

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

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

Il faut noter qu'un excès d'eau entraîne une instabilité rendant l'uni défectueux tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de prise localisés. [6]

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

I.4.4. Les fillers :

I.4.4.1. Définition :

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres Volantes...) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bombléd [20]. Il y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

I.4.4.2. Effets :

Les fines calcaires ont une double action dans le béton [21]. Au jeune âge, elles ont un effet accélérateur de l'hydratation. Les grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates. Farran et al. [22], avait aussi signalé la formation d'une liaison intime entre les granulats calcaires et la pâte du ciment qui résulterait de plusieurs mécanismes dont un fort accrochage mécanique dû à une surface de contact rugueuse et à une liaison physico-chimique entre les granulats calcaires et la pâte de ciment. Les fillers de même nature que les granulats contribuent à l'amélioration de l'adhérence pâte-granulats, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. On observe alors une amélioration des caractéristiques générales des bétons ordinaires [23]. Buil et Paillere [24], ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle actif exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment

Les fillers calcaires ont pour principales actions : voir la figure I.1

- **rôle de remplissage** : l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire. Sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides inters granulaires. [24]

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

- **rôle rhéologique** : par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci. [25]
- **rôle physico-chimique** : la présence des fillers calcaires dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés et une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [26] ;
- **rôle chimique** : par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates. [27]

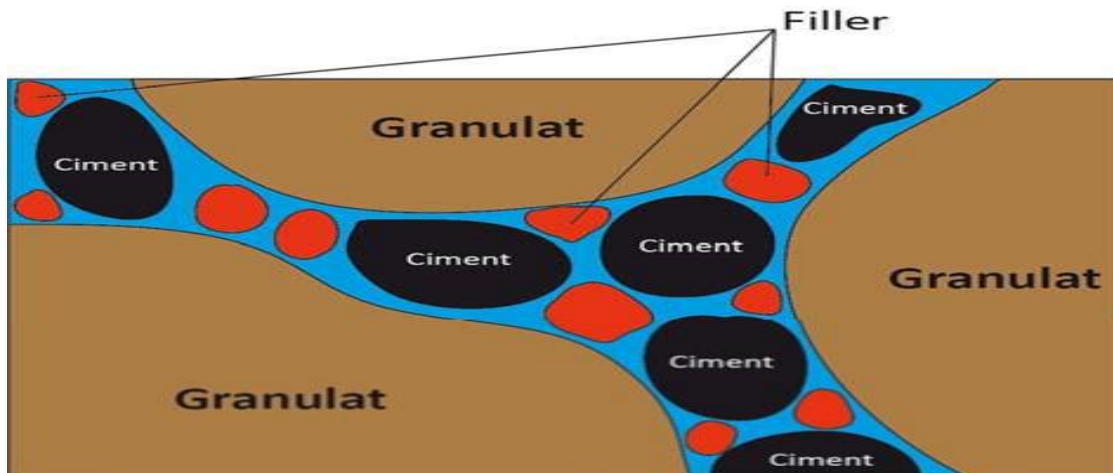


Figure I.3 : Illustration de l'effet filler.

I.4.4.3. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes :

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment :

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.
- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire pour compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

I.4.4.4. Influence du filler sur l'état durci :

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution de 10% [28-29].

Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier [30].

Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats [31].

D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation [32] mais également en modifiant les produits d'hydratation formés [33-34].

En effet Bonavetti et al [35] montrent que dans une pâte de ciment contenant du filler calcaire, les analyses DRX mettent en évidence trois phases :

- de 1 à 7 jours, formation de carboaluminate hydraté, d'ettringite et diminution de la quantité de CaCO_3 .
- de 7 à 28 jours, transformation de l'ettringite en aluminat hydraté ; stabilisation de la formation de carboaluminate hydraté.
- après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté (plus stable [36] ; l'augmentation des sulfates en solution entraîne la reconversion de sulfoaluminate hydraté en ettringite.

La formation de carboaluminate est également détectée lors de la formulation de mortier contenant des granulats calcaires. En effet, on peut observer à la surface des granulats des figures d'attaque.

L'intensité de l'attaque des granulats calcaires par le sulfoaluminate hydraté dépend de la nature du granulat, de l'orientation cristallographique des grains de calcite et de la quantité de sulfoaluminate hydraté présent (c'est-à-dire de la température de cure et du rapport Eau/Ciment) [37- 38].

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment (Figure 4) et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) [39] et a tendance à être négligeable au long terme. [40]

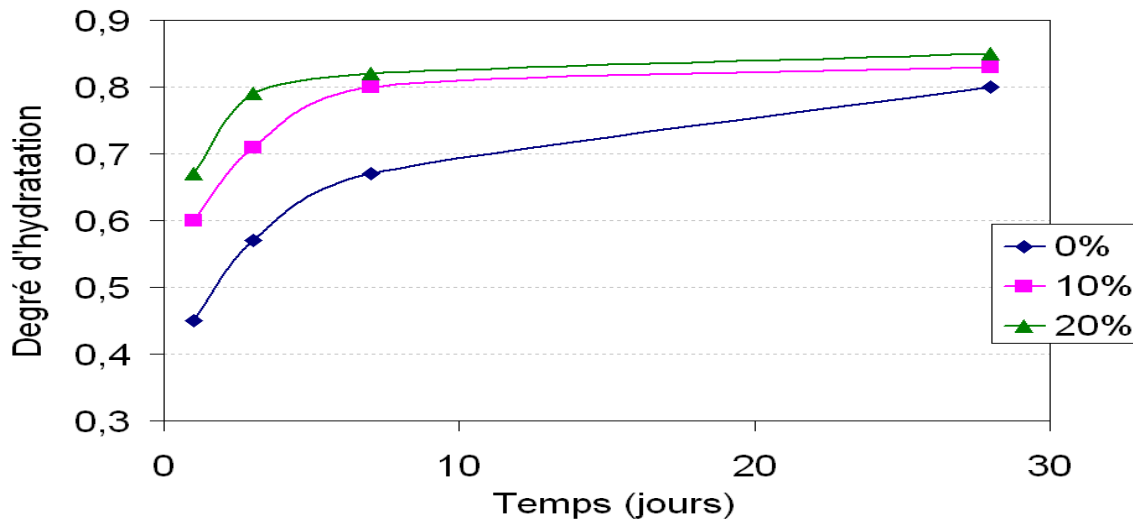


Figure I.4 : Evolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%). [35]

I.5. Caractéristiques du BCR :

- Un BCR optimal devrait comporter à peu près la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides du squelette granulaire et pour obtenir la maniabilité désirée
- **Pas assez de pâte** : Faibles propriétés mécaniques, maniabilité trop faible, durabilité plus faible
- **Trop de pâte** : Meilleures propriétés mécaniques, maniabilité trop élevée, coût de production plus élevé
- Toutes les propriétés des BCR sont étroitement liées au degré de compactage

Un BCR parfaitement compacté devrait avoir une résistance à la compression comparable à celle d'un béton conventionnel de même rapport E/L. [7]

I.6. Propriétés mécaniques et physiques du BCR :

Les propriétés du B.C.R dépendent directement de la qualité des matériaux utilisés, des proportions du mélange et du degré de compaction ou de consolidation, les propriétés élastiques et thermique du B.C.R sont similaires à celle d'un béton conventionnel fabriqué à partir des même constituants. [7]

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

I.6.1. Résistance à la compression :

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

La résistance à la compression à 28 jours et 91 jours varie très peu d'un mélange à un autre et augmente de 12% à 30%, selon le cas, cette faible augmentation de résistance montre que le comportement des B.C.R étudié, ressemble plus au comportement d'un béton conventionnel, qui à celui d'un sol s'applique par le volume de pâte élevé incorporé dans les B.C.R (mélange riche en liant),

De plus on sait que le B.C.R est un béton de masse dont la résistance à la compression dépend surtout de sa teneur en matière cimentaire et de son rapport eau /liant (M. BARKOUNE, 2011). [7]

I.6.2. Résistance à la traction :

La résistance à la traction du B.C.R mesure avec l'essai brésilien représente approximativement de 12% à 14 % de sa résistance à la compression. La résistance à la traction du B.C.R peut donc varier considérablement d'un mélange à un autre, la variabilité de l'essai est plus grande dans le cas du B.C.R que dans le cas de béton conventionnel. [7]

I.6.3. Résistance au cisaillement :

La construction des barrages en B.C.R consiste à appliquer plusieurs couches horizontales successives, dont l'épaisseur varie de 30 cm à 60 cm. Pour le concepteur la résistance au cisaillement à l'interface entre deux couches est plus importante que la résistance au cisaillement propre des matériaux, dans ce sens les concepteurs choisissent généralement d'augmenter le plus possible le rapport pâte /mortier afin d'assurer une meilleur adhérence inter couches et de diminuer les infiltrations à travers le barrage au service. La résistance au cisaillement du B.C.R dépend de sa cohésion et de son angle de frottement interne .La résistance minimale est généralement mesurée au niveau des joints de constructions et le long d'interface entre les couches successives de B.C.R. [7]

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

I.6.4. Résistance à la flexion :

L'un des premiers paramètres à prendre en considération lors de la conception d'un revêtement en BCR est la résistance à la flexion (module de rupture) du béton.

Typiquement un mélange de BCR correctement formulé, fabriqué avec 250kg/m^3 de ciment type 10E-FS et d'un rapport eau/liant de 0.40 développe généralement une résistance moyenne à la flexion d'environ 4.0 à 4.5 MPa après 3 jours de durcissement, d'environ 5.0 MPa à 7 jours et entre 5.5 et 6.0 MPa à 28 jours. De même, un mélange de BCR fabriqué avec une teneur en ciment d'environ 300kg/m^3 et possède un rapport eau/liant d'environ 0.35 développe généralement une résistance moyenne à la flexion d'environ 4 à 4.5 MPa après 3 jours de durcissement d'environ 5.5 à 6.5 MPa à 7 jours et d'environ 7 MPa à 28 jours. (Z. BENDIMERAD, 2011). [7]

I.7. 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 $< 0,25\text{ mm}$ (farines et sable fin) devrait atteindre environ 500 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

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 déverglage». 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 déverglage pourrait poser un problème. Mais dans ces cas, on a constaté que la résistance élevée (B 35), la teneur en ciment (au minimum 270 kg/m^3) et le compactage conduisant à une densité Proctor supérieure à 95% assuraient une résistance suffisante au gel et au sel de déverglage.

Les cendres volantes peuvent se révéler contre-productives [8]



Figure I.5 : Mise en place de BCR par bandes. [9]

I.8. 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,

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

au début, que finement vaporisée. La cure par aspersion d'eau doit durer au moins trois jours. [10]



Figure I.6 : Cure du béton par arrosages ciblés. [10]



Figure I.7 : Bâche de protection contre la pluie. [10]

I.9. Applications :

I.9.1. 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

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 8, 9, et 10.



Figure I.8 : 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 8 et 9) à Bouarada, Barrage Fom Elana à Tozeur, Barrage El Far 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR



Figure I.9 : Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie). [12]

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

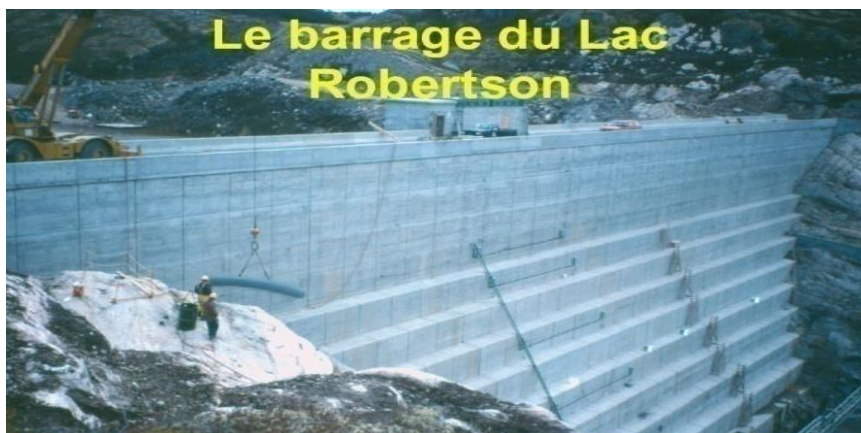


Figure I.10 : Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada. [13]



Figure I.11 : Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada. [13]

I.9.2. 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 12). Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulat est limitée à 20mm.

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



Figure I.12 : Mise en place du BCR en pavage, Atlanta 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.10. BCR et béton conventionnel :

Il existe plusieurs différences structurales importantes entre le béton compacté au rouleau et le béton conventionnel. Ce sont justement ces différences, dont l'influence sur certaines propriétés est encore mal connue, qui limitent encore de nos jours son utilisation. Dans un béton normal, la quantité de pâte de ciment, les hydrates et les capillaires qui contiennent l'eau gelable sont bien répartis dans la pâte. Ces bétons. Même s'ils ne contiennent pas d'air entraîné, comportent toujours un peu d'air occlus qui se retrouve sous forme de bulles sphériques bien dispersées dans la matrice.

La structure d'un béton compacté au rouleau est partiellement différente. Pour les BCR, qui contiennent moins de pâte que les bétons conventionnels, les caractéristiques rhéologiques et la consistance globale du mélange font en sorte que la consolidation du matériau nécessite un apport d'énergie de serrage externe, généralement à l'aide de rouleaux vibrateurs. Il est impossible d'évaluer correctement les caractéristiques rhéologiques des BCR avec les techniques usuelles, et l'on emploie normalement un appareil de type Vébé. Cet appareil permet

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

la mesure du temps requis pour consolider par vibration le béton frais dans un moule cylindrique (une surcharge étant appliquée sur le béton frais).

Le faible volume de pâte des BCR a deux conséquences principales sur la structure interne du matériau durci. D'abord, la pâte risque d'être moins homogène que dans les bétons conventionnels. En effet, la consistance du matériau rend difficile la distribution uniforme de l'eau lors du gâchage. De plus, les BCR contiennent toujours un certain nombre des vides de compactage (Figure 13). Ces vides d'air, qui sont généralement dus à une consolidation incomplète du matériau, ont des formes et volumes variables. Ils se distinguent des bulles d'air (sphériques) par leur forme irrégulière. Si la formulation du mélange est inadéquate, ou la consolidation insuffisante, il se peut que La quantité de vides de compactage dans le béton durci soit très élevée et, à la limite, que ces vides soient interconnectés.

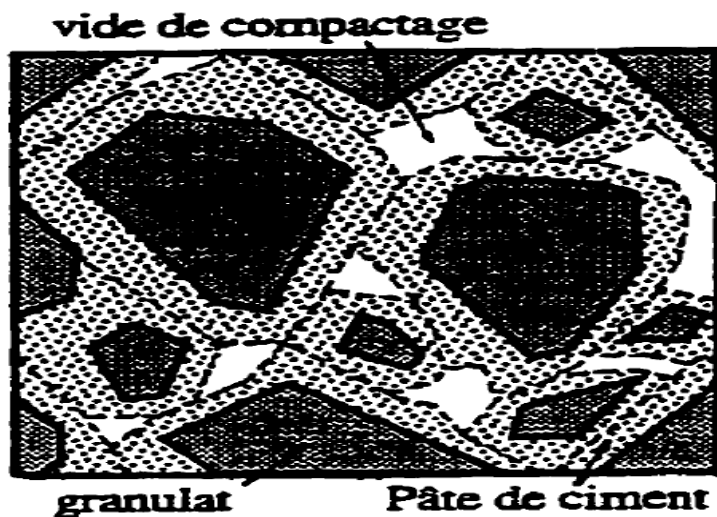


Figure I.13 : Schéma de la structure interne des BCR montrant les vides de compactage
[Pigeon et Marchand, 1995].

On considère souvent le BCR comme étant un empilement granulaire, avec juste assez de pâte pour assurer un enrobage complet des granulats. Il est par conséquent facile de concevoir que plus l'empilement des particules solides sera compact, moins le volume de pâte nécessaire pour bien les enrober sera important. Une bonne formulation des KR, particulièrement en ce qui a trait à la granulométrie des granulats, est donc très importante.

Par suite de la moindre homogénéité de la pâte, les BCR sont généralement plus perméables que les bétons conventionnels. D'une part, ceci a pour effet, lors du gel, de faciliter le mouvement de l'eau dans la pâte vers les vides d'air. Mais, d'autre part, la présence de zones de

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

plus forte porosité peut rendre le matériau plus susceptible de se détériorer s'il est soumis à des cycles de gel-dégel.

I.11. Avantages et inconvénient du BCR :

I.11.1. Avantages du BCR :

Le BCR, Comme un nouveau procédé de construction, possède des avantages incontestables liés aux gains de temps et d'argent.

On estime que le coût approximatif du BCR est 20% à 30% plus faible que celui du béton de masse conventionnel. Cette différence dans les coûts s'explique par le faible volume des matériaux cimentaires par rapport à celui des granulats, qui constituent environ 85% du volume du BCR et les autres avantages sont :

- Les faibles coûts de production, de mise en place et de compactage (pas ou peu de coffrage).
- Le rythme de construction rapide.
- Le taux de mise en place élevé du BCR permet, comme dans le cas de certains grands projets, de réduire le temps de construction d'une à deux années comparativement la solution en remblai. D'autres avantages liés à une construction rapide incluent aussi les coûts administratifs réduits ainsi que les bénéfices découlant d'une mise en service plus rapide de l'ouvrage. En somme l'utilisation du BCR pour la construction d'un ouvrage offre des avantages économiques sur tous les aspects liés au temps.
- Bonne résistance à compression et à la flexion : pour supporter les charges concentrées lourdes sans déformation.
- Une bonne adhérence : Les études ont démontré que le BCR permet en général une bonne adhérence qui réduit la distance d'arrêt pour être plus courte comparée à celle du béton bitumineux, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.
- Durabilité de la chaussée pour plusieurs années.
- Confort des ouvriers.
- Performance excellente à l'analyse du cycle de vie.
- Très bonne résistance à l'abrasion.
- Technologie peu complexe comparée au dallage en béton armé.
- Ne nécessite pas d'armature de résistance.
- Entretien simple.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

- Ne se ramollit pas lorsqu'il fait chaud.

I.11.2. Inconvénients du BCR :

Le BCR présente plusieurs avantages mais comme tous les matériaux il a des inconvénients :

- La texture rugueuse.
- Qualité des parements.
- Difficulté d'entraîner de l'air.

Coût de transport des matières cimentaires en régions éloignées. Dans les grands projets de construction en BCR. On utilise de plus en plus des installations de production en continu (similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux) qui ont des taux de production beaucoup plus importants. [15]

I.12. 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 permet 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 destinés 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. [16]

I.12.1. 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

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 14).

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. [16]

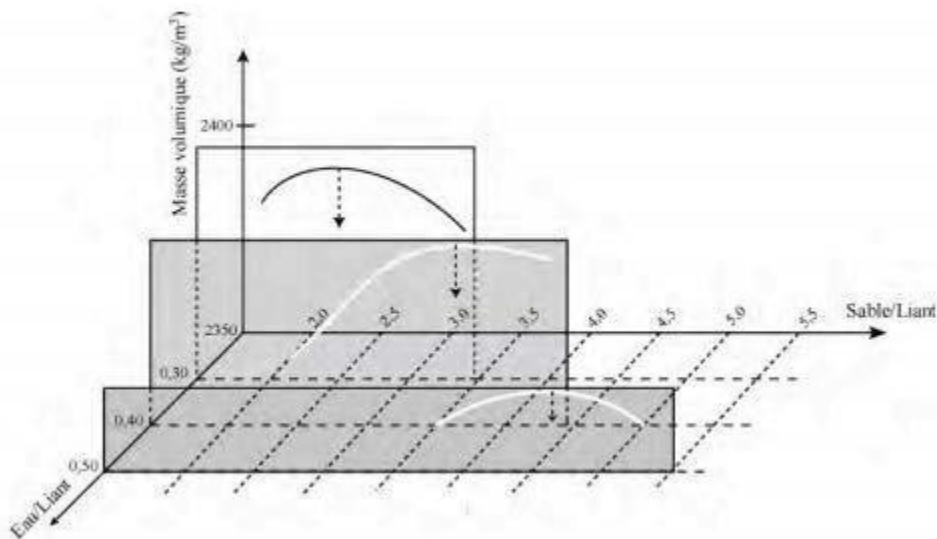


Figure I.14 : Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand, 2001). [16]

I.12.2. 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/m³. Tandis que, la teneur en eau optimale est estimée sur la base des essais de compactage du béton frais.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

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 (Figure13). 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 :

$$P_d = 100 * \omega * P_h / (100 + \omega)$$

P_d : densité sèche.

P_h : densité humide maximale mesurée.

ω : teneur en eau réelle (la teneur en moyenne calculée à partir des pesées de prélèvement de béton frais, avant et après étuvage). [16]

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est tracée dans un graphique (Figure14). 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).

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

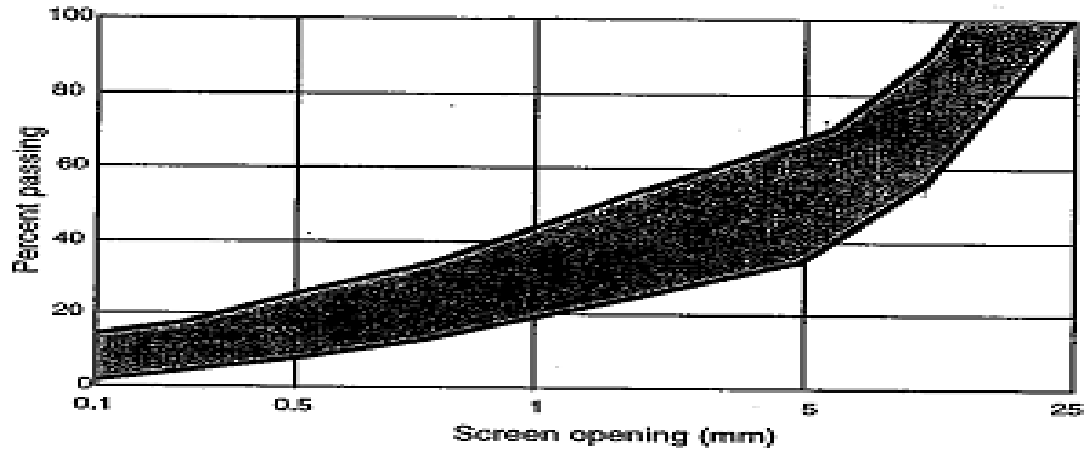


Figure I.15 : Fuseau granulométrique recommandé pour le BCR (Marchand et al. 1997 ; Gauthier & Marchand, 2001). [16]

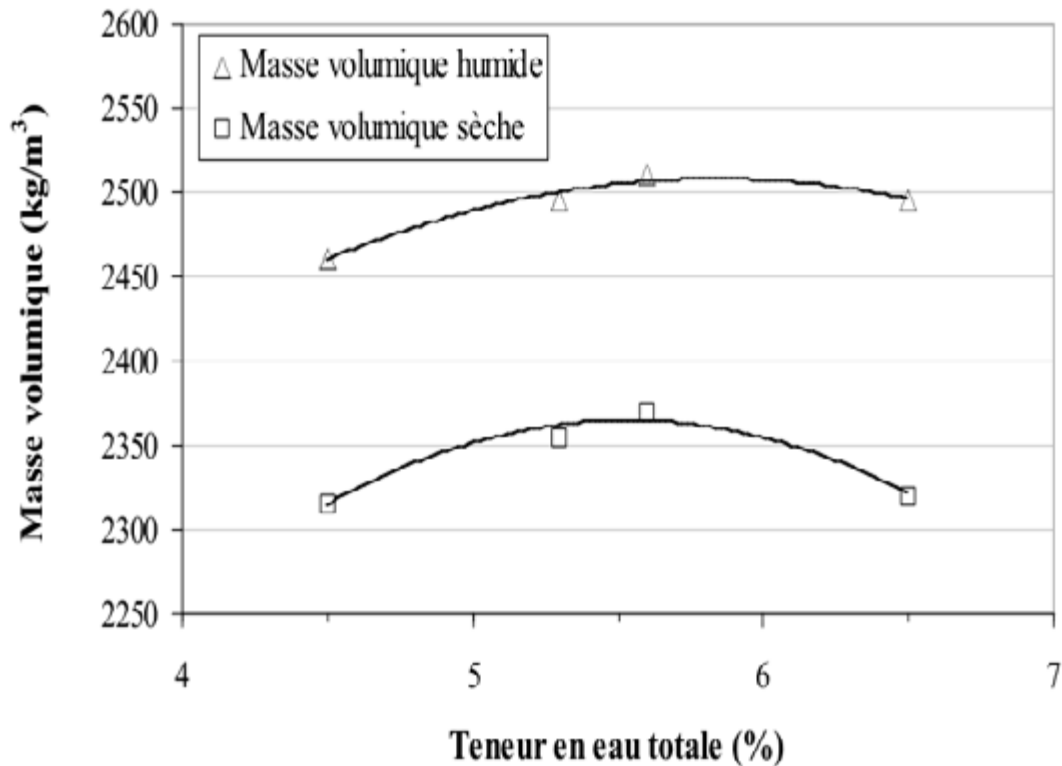


Figure I.16 : Courbes de Proctor (Gauthier & Marchand, 2001). [16]

I.12.3. 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. [17]

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. [17]

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

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). [18]

I.13. Production :

Fabriquer du béton consiste à reprendre sur stock, doser et malaxer les divers composants, granulats, ciments, eau, adjuvants, approvisionnés sur le chantier.

Le malaxage du BCR nécessite une énergie suffisante pour assurer une dispersion efficace de la faible quantité d'eau de gâchage et du ciment dans le mélange. Tout d'abord, on doit s'assurer que le malaxage est adéquat. En effet, le BCR doit être homogène ce qui permet d'avoir des propriétés mécaniques constants dans l'ouvrage et ainsi ne pas se retrouver avec des zones un peu plus faibles. De plus, le taux de production doit être suffisant. L'usine à béton ne doit pas avoir une sous-production ou une surproduction mais plutôt elle doit produire au rythme de la mise en place. Ceci évite les délais d'attente du béton les camions lors de surproduction de l'usine, ce qui provoque le séchage du béton dans les camions, ou la faiblesse des liens entre les couches s'il y a sous-production. La production du BCR n'est pas très différente de celle d'un béton ordinaire. Seul le taux de production différé.

Le BCR est produit en centrale fixe ou par une centrale mobile. Le choix du type de centrale de production dépend des caractéristiques du projet, c'est-à-dire de la proximité et de la disponibilité des unités de production, de la quantité de béton à mettre en place et du budget à investir. Pour des petits travaux, un malaxeur conventionnel peut être utilisé. Dans ce cas, le taux de production est significativement plus faible que le béton ordinaire puisque le BCR contient peu d'eau et qu'il faut donc le malaxeur plus longtemps. [19]

I.13.1. Les Centrales fixes :

Ce type de centrale présente deux bascules : une pour les granulats et l'autre pour le ciment. Les bascules servent essentiellement à peser les quantités élémentaires de matériaux. Le malaxeur apporte l'eau nécessaire à la fabrication du béton. Il y a d'abord W1 pré-malaxage à sec ; on ajoute l'eau au dernier moment. Pendant cette phase, on prépare déjà la gâchée suivante.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

La fabrication marche en discontinu.

Pour assurer l'homogénéité et l'uniformité du mélange de BCR en centrale fixe et éviter toute ségrégation, une attention particulière doit être portée à certains aspects de la production.

Tout d'abord, en raison des fortes sollicitations mécaniques subies par le système de malaxage, il est recommandé de réduire le volume des gâchées à environ 50 % de la capacité maximale du malaxeur pour une meilleure homogénéité du mélange. Les risques de bris mécaniques ou hydrauliques seront ainsi réduits, ce qui évitera les arrêts de production. De plus, le temps de malaxage normalement requis pour un béton plastique est prolongé dans le cas des BCR, soit de 91 l'ordre de 3 minutes par gâchée. Généralement, le taux de production du BCR de ce type de centrale se situe entre 35 et 60 m³/heure. Il est d'ailleurs fortement recommandé de procéder au nettoyage du malaxeur à tous les 100 m³ durant la production et à la fin de chaque journée de production. Finalement, la hauteur de chute du béton frais doit être réduite au minimum pour éviter la ségrégation lors du chargement des camions à bennes basculantes. [19]

I.13.2. Les Centrales mobiles :

La production en continue est assurée par un approvisionnement constant en matières premières. Les matériaux granulaires sont mis en piles, directement sur le site, en prenant soin d'éviter la ségrégation. Les trémies les contenant sont constamment alimentées à l'aide de chargeurs sur roues en évitant leur contamination. Ils sont ensuite acheminés au malaxeur par un convoyeur. Le ciment est dosé à partir de sa trémie et incorporé directement dans le malaxeur sur le convoyeur à granulats juste avant l'entrée du malaxeur. L'eau de gâchage et les adjuvants sont introduits par un système de gicleurs sur les matériaux secs à l'entrée du malaxeur. Le malaxage est à son tour assuré par deux arbres d'agitation en parallèle.

Ce type de centrale présente plusieurs avantages parmi lesquels la rapidité de mobilisation et démobilitation, la réduction du temps de transport du béton, la productivité élevée et l'efficacité de son système de malaxage. [19]



Figure I.17 : photo d'une centrale mobile. [19]

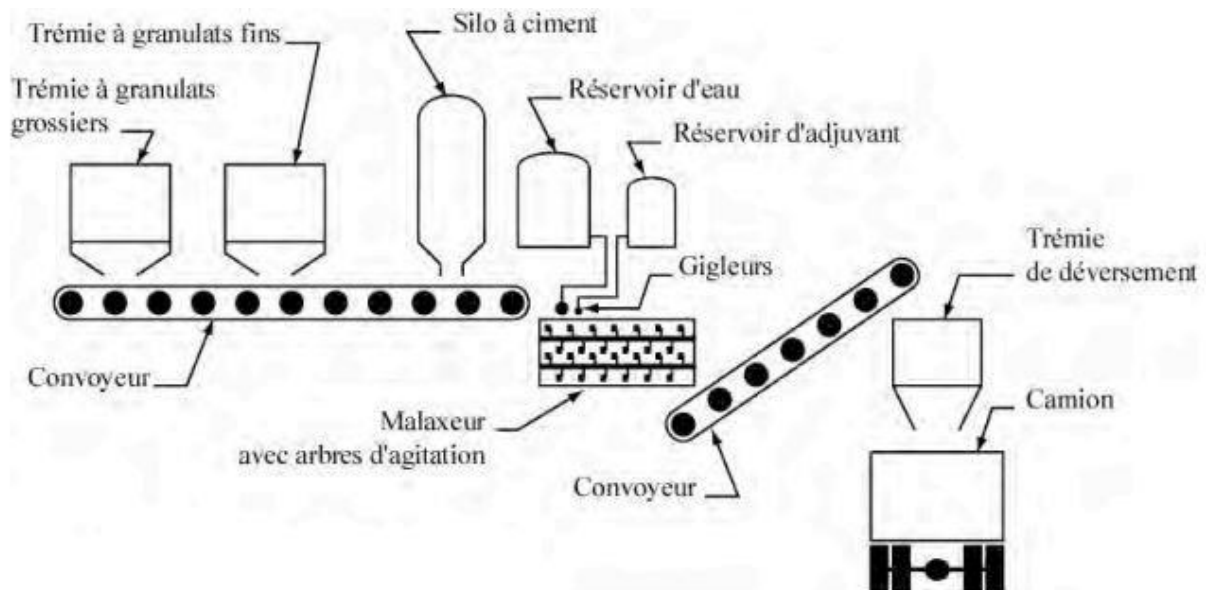


Figure I.18 : schéma type d'une centrale mobile. [19]

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

I.13.3. Transport :

Le BCR est transporté de la centrale (fixe ou mobile) au chantier à l'aide de camions à bennes basculantes. Les camions doivent être munis de toiles de protection pour réduire l'évaporation de l'eau causée par l'action du soleil et du vent. Un retardateur d'évaporation peut également être appliqué directement sur le BCR dans la benne du camion. Les camions doivent être en nombre suffisant pour assurer une mise en place continue.

Le temps de transport du BCR de la centrale au déchargement dans la trémie du finisseur doit être limité pour assurer une mise en place adéquate. La maniabilité du BCR frais, diminue en fonction du temps (le temps VEBE augmente).

À cet effet, la durée du transport du BCR est généralement limitée à 45 minutes depuis le contact initial eau-liant jusqu'au moment du déversement du BCR au finisseur. Le temps de transport devra être réduit si la température ambiante est supérieure ou égale à 27 °C. Il faudra répandre sur la benne, juste après le chargement, un produit réducteur d'évaporation elle que les émulsions résineuses.

D'autre part, il faudra prendre toutes la précaution adéquate, aussi bien au chargement qu'au déchargement, pour éviter la ségrégation du béton.

I.13.4. Mise en place :

Le BCR est mis en place à l'aide d'un finisseur conventionnel à enrobé bitumineux ou d'un finisseur à haut pouvoir de compactage. Les finisseurs doivent être équipés de barres de compactage afin de pré-compacter le BCR mis en place. Les barres de compactage du finisseur doivent être en mesure de consolider le BCR à au moins 80 % de la masse volumique humide de référence sur toute la largeur de la table du finisseur.

L'expérience en chantier a montré que, généralement, la différence d'épaisseur entre la couche de BCR à la sortie du finisseur et la couche de BCR compactée par un rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses est de l'ordre de 10 à 25 %, selon le type de finisseur. [19]



Figure I.19 : finisseur à haut pouvoir de compactage. [19]

Les finisseurs doivent être en nombre suffisant pour mettre en place le BCR à un taux minimum de 1,5 fois la capacité nominale de production du malaxeur. Tout équipement faisant défaut doit être remplacé de manière à ne pas ralentir les opérations de mise en place.

D'autre part, il est recommandé de corriger les irrégularités ou inégalités de répartition à l'aide de raclettes. Le délai entre le répartition et début du compactage ne doit pas excéder 10 min. compléter le compactage en dedans d'un délai de 6 minute depuis le gâchage. [19]

I.14. Compactage du BCR :

I.14.1. Matériels de compactage :

Pour le compactage, utiliser des rouleaux compacteur tandems à cylindre d'acier lisses pouvant être utilisé en mode statique et vibratoire.

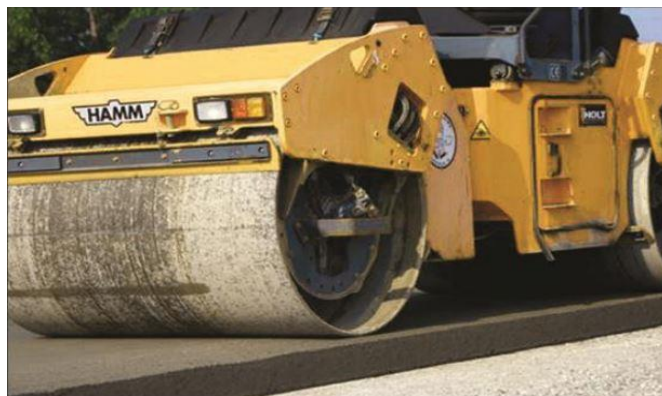


Figure I.20 : rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisses.

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

Pour le finissage des surfaces sans couche de roulement, utiliser un rouleau compacteur polyvalent (rouleau vibrant d'acier en avant en arrière).

I.14.2. Opération :

Le degré de compactage du BCR à l'état frais influence ses propriétés à l'état durci et notamment sa résistance à la flexion.

Le compactage consiste en deux passes (on entend par une passe, un cycle complet en avant et en arrière) du compacteur à rouleau sans vibration pour consolider les matériaux, suivis de quelques passes avec vibration, généralement 4 ou plus, jusqu'à l'obtention de la compacité spécifiée. Le processus de compactage est complété par quelques passes de l'engin à pneus pour fermer les éventuels vides ou les petites fissures superficielles. A défaut d'un compacteur à pneus, on peut donner quelques passes finales du compacteur à rouleau sans vibration pour fermer la surface.

Le compactage des bords est aussi une question délicate. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les épauler avec des matériaux stables placés à l'avance, comme par exemple les bordures en zone urbaine ; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produisent.

Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale.

En tout temps lors des opérations de compactage, la surface du BCR doit être maintenue constamment humide par la vaporisation d'eau en bruite. [19]

I.16. 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 : Notions fondamentales sur le compactage

II. Notions fondamentales sur le compactage :

II.1.Introduction :

Dans le génie civil on peut distinguer deux principaux domaines d'application du compactage :

- Le domaine des chaussées.
- Le domaine des grands terrassements, remblai, barrages etc....

Ces domaines se distinguent par le degré d'élaboration du choix et de traitement du matériau et plus particulièrement par l'énergie de compactage mise en œuvre par unité de volume de matériau.

Dans tous les cas, il s'agit, à partir d'un matériau donné d'obtenir un autre produit répondant à certaines caractéristiques ou exigences techniques et technologiques des constructions.

Des nombreuses méthodes ont été développées, pour stabiliser ou traiter les sols faibles. Ce travail s'intéresse tout particulièrement à la méthode de stabilisation par compactage.

(D.IALY RADIO et M. TERKI HASSAINE, 1990). [42]

II.2. Définition de compactage :

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol. En faisant, la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante.

Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodromes. [49]

La densification mécanique du sol peut entraîner :

- Modification de la granulométrie.
- Modification de la teneur en eau.
- Réduction ou élimination des risques de tassement.
- Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus.
- Amélioration de la capacité portante.
- Limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait. [49]

Il y a trois types de compactage :

- une pression exercée par un rouleau compacteur. (Figure. II.1).
- une masse qui chute sur une hauteur donnée. (Figure. II.2).
- une vibration transmise par un moteur à pulsation hydraulique monté sur un compacteur (ou grue) (vibrocompactage). (Figure. 1). [49]



Figure II.1 : Un rouleau compacteur et un Compactage dynamique. [49]



Figure II.2 : Compactage par vitro-sonde. [49]

- **Vibrocompactage** : Inventé en 1934 en Allemagne par Steurmann et Degen, c'est le procédé qui permet d'exécuter le compactage en profondeur du sol en place, à l'aide d'une aiguille vibrante par ajout ou non d'un matériau pulvérulent. [49]

II.3.Objectif du compactage :

L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation.

Dans ce qui suit, nous aborderons l'ensemble des aspects liés aux objectifs assignés au compactage des sols. [50]

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

II.3.1. Suppression des tassements :

Le premier objectif que va donc poursuivre l'ingénieur, c'est de substituer à ce compactage lent, qui conduit dans le temps à des désordres, une opération volontaire effectuée avant mise en service de l'ouvrage, et qui met le matériau dans un état suffisamment serré pour qu'un resserrement ultérieur soit impossible ou peu probable. A la limite, si cette opération volontaire réduisait le volume des interstices à 0, tout tassement serait évidemment rigoureusement impossible. Mais pour éviter, en pratique, que le matériau tasse, il n'est pas nécessaire, d'atteindre un tel état, du reste totalement utopique ; nous verrons qu'une densification modérée est suffisante. [50]

II.3.2. Suppression des tassements différentiels :

Très souvent l'ingénieur cherche moins à supprimer tout tassement, qu'à éviter que ce tassement s'accompagne de déformations.

En effet, lorsqu'il se produit, un tassement est rarement constant d'un bout à l'autre du profil en long et du profil en travers de l'ouvrage ; ne serait-ce que parce que le remblai n'est pas de hauteur égale. Ce sont donc les tassements différentiels qui sont les plus dommageables.

Or, il est évident que si l'on diminue fortement, par le compactage, les tassements absolus, on réduira beaucoup plus les tassements différentiels qui ne sont, en général, que de l'ordre de grandeur du 10^e des premiers. Cette dernière affirmation est évidemment inexacte si le tassement différentiel est égal au tassement absolu, car une partie tasse et que l'autre est indéformable. Le cas le plus frappant est celui de remblai adjacent. [50]

II.3.3.Élévation des caractéristiques mécaniques :

Le resserrement des grains du matériau a un effet très important : les caractéristiques mécaniques sont fortement améliorées et les conditions de résistance au cisaillement deviendront plus importantes. [50]

I.3.4. Augmentation de la cohésion C et de l'angle de frottement interne :

La courbe intrinsèque des sols est caractérisée par deux paramètres, l'ordonnée à l'origine ou cohésion c et l'angle φ que fait la droite intrinsèque avec l'axe des contraintes normales.

Grace au compactage, les grains sont plus serrés, les ménisques d'eau vont avoir plus d'efficacité et autre part, les phénomènes de surface jouent davantage.

Quelle que soit la valeur de ce raisonnement la cohésion est constatée bien augmenter par le compactage. [50]

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

II.3.5. Constatation banale des tassements :

C'est un fait d'expérience courante qu'un remblai constitué sans précautions, tasse sous l'effet de son propre poids, soit des charges permanentes qu'il supporte, soit des surcharges qui roulent sur lui. Or ce tassement n'est que la traduction d'une diminution de volumes des matériaux, diminution qui est le résultat d'un compactage spontané et lent qui réduit le volume des interstices du sol constituant le remblai de la tranchée. [50]

I.3.6. Augmentation du module de déformation :

L'intuition montre clairement que lorsque le volume des interstices d'un sol est important, le sol sera plus déformable que lorsque la réussite à refermer ces interstices. C'est bien ce qui est constaté : le compactage augmente considérablement les modules de déformation.

Selon (G. ARQUIE et G. MOREL, 1988), cette augmentation est utilisée pour contrôler le compactage par cet effet. Elle se traduit aussi par une augmentation de la portance. [50]

II.4. Classification des sols en vue du compactage :

➤ Groupe I : Enrochements

Des essais de force portante sur des enrochements non compactés, comparés à des essais sur des enrochements vibrés ont indiqué que la capacité portante est multipliée par dix, dans certains cas par un compactage efficace. Le module d'élasticité d'enrochements peut atteindre 800 – 1600 kg/cm² au premier cycle de chargement et 1600 – 3200 kg/cm² aux cycles suivants de chargement.

Les tassements mesurés dans des enrochements de bonne qualité bien compactés se sont révélés très faibles. (G. ARQUIE, MOREL, 1988) [43]

➤ Groupe II : sables et graviers

Il est important de comparer les courbes Proctor des sables et graviers à drainage libre avec celles d'autres types de sols. Les sables et graviers atteignent leur densité maximale, soit complètement secs, soit complètement saturés. Entre ces deux extrêmes, à la teneur en eau naturelle normale, on obtient des densités plus faibles. Les courbes Proctor des sables et des graviers sont, cependant, souvent relativement plates, ce qui signifie qu'un compactage par vibrations efficace à la teneur en eau naturelle donne une densité assez élevée qui est acceptable dans de nombreux cas.

Des essais récents, au laboratoire et en vraie grandeur, ont montré clairement qu'un sable ou un gravier complètement sec pouvait également être vibré jusqu'à une très haute densité. Lorsque le sable est complètement sec ou complètement saturé, la cohésion apparente due à la capillarité de l'eau interstitielle ne gêne plus le réarrangement des particules du sol. [43]

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

➤ Groupe III : limons, sols siliceux

Des rouleaux vibrants lourds ont aussi été utilisés sur des sables siliceux, ainsi que sur des silts purs. De tels sols ont été compactés avec succès jusqu'à des épaisseurs ses couches de 75 à 100 cm par des rouleaux vibrants lourds.

Il ressort de ce qui vient d'être dit que, sur des couches épaisses de remblais, les rouleaux vibrants tractés représentent, dans des nombreux cas, une solution bien adaptée et économique. [43]

➤ Groupe IV : Argiles

Une argile, à sa teneur en eau optimale, réclame un effort de compactage important. Les machines qui sont utilisées doivent exercer des forces de compression et de cisaillement relativement importantes sur le matériau. Avec tous les types de compacteurs, le compactage doit être réalisé en couches d'une épaisseur plus faible que dans le cas des sols non cohérents. Deux solutions, principalement, sont envisageables pour le compactage par vibrations de tels matériaux cohérents. Dans certains cas, des rouleaux vibrants lourds à bille lisse ont donné de bons résultats. L'autre possibilité est d'utiliser des rouleaux à pieds de moutons ou à pieds dameurs. (G. ARQUIE et G. MOREL, 1988). [43]

II.5.Théorie de compactage :

D'après (H.VARLET, 1966), on conçoit théoriquement, tout au moins, qu'il puisse exister deux structures limites entre lesquelles se situent toutes les autres :

- L'une où, l'imbrication étant poussée au maximum, les vides entre les particules sont réduits au minimum ; corrélativement la densité apparente passe par sa plus grande valeur ; on dit alors que le sol atteint sa compacité maximale.
- L'autre où le squelette prend la disposition la plus relâchée que les grains puissent former en gardant contact entre eux avec une certaine stabilité ; la terre atteint, dans ce cas le foisonnement maximal. La densité apparente est, par contre, minimale.

Entre ces deux structures limites, la terre possède un squelette plus ou moins foisonné.

En pratique, la terre sortant de fouille ou de carrière, meuble et légère, présente son foisonnement le plus élevé. Par roulage, pilonnage et arrosage, on augmente sa compacité : c'est le compactage.

Pour l'édification d'une digue ou d'un barrage les terres naturelles, telles qu'on les trouve dans le sol, ne peuvent être utilisées sans préparation préalable c'est à dire les terre du remblai, il est bien évident que les terrains d'assise ne peuvent être remaniés, quoique des injections puissent en modifier les propriétés. Tous d'abords l'extraction (en carrière ou dans un terrain d'emprunt) les ameublît : elles foisonnent.

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

A leurs mises en place dans l'ouvrage en construction, elles se tassent, progressivement, sous l'effet du poids croissant des terres qu'on leur superpose : c'est le phénomène de la consolidation naturelle ; mais il peut durer plusieurs mois, et même plusieurs années ; le barrage ne sera donc pas immédiatement en état de résister aux efforts pour lesquels il est conçu. De plus, les tassements peuvent se produire inégalement et amener, dans la digue, des fissures par lesquelles l'eau du réservoir se fraierait un passage et risquerait d'emporter l'ouvrage. Le compactage a pour objet de prévenir ces désordres, en provoquant artificiellement un tassement immédiat des terres, au cours de même de l'édification des remblais. On voit ainsi que le tassement des terres peut être accéléré :

- En mettant en jeu des forces capables de vaincre les frottements entre particules : ce sont les forces de compactage.
- En sélectionnant les terres de manière à obtenir, au besoin par des mélanges, une granulométrie qui favorise le logement des petites particules entre les grosses et assure ainsi une meilleure compacité.
- En lubrifiant les terres, par une addition d'eau appropriée ; ainsi est facilité le glissement des particules les unes sur les autres. [50]

II.5.1. les facteurs qui influencent le compactage :

A partir de 1930, il est devenu nécessaire de mieux comprendre le phénomène de compactage et son influence sur les propriétés du sol afin de mieux contrôler le compactage et de développer les engins de compactage. C'est à l'ingénieur américain R.PROCTOR (1933) que l'on doit les premières études. [50]

a) Energie de compactage :

Plus l'énergie de compactage est grande, plus la densité sèche maximale est grande : on obtient une meilleure imbrication des particules de terre, d'où une meilleure résistance au cisaillement et une étanchéité accrue. Pour des énergies de compactage de plus en plus grandes en prenant les terres avec leur teneur en eau optimale, qui donne un éventail de droite qui montre que la cohésion c et l'angle de frottement interne ϕ augmentent avec l'énergie de compactage.

La Figure 4 illustre, pour un sol constitué de limon argileux, l'influence de l'énergie de compactage sur les densités atteintes en relation avec la variation de la teneur en eau.

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

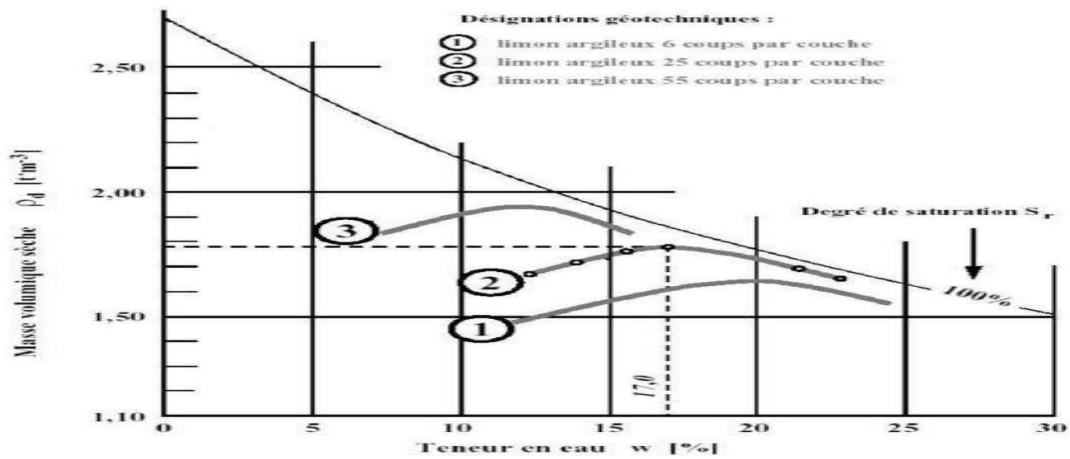


Figure II.3 : Influence de l'énergie de compactage (J.LEREAU, 2006). [52]

L'analyse de la figure offre des informations complémentaires à savoir :

- Une augmentation de l'énergie de compactage à gauche de l'optimum Proctor de teneur en eau conduit à une augmentation de la résistance.
- Une augmentation de l'énergie de compactage à droite de l'optimum Proctor de teneur en eau peut entraîner un gain ou une perte de résistance.
- Pour une même énergie de compactage et une même densité, le compactage du côté sec donne une résistance plus élevée que le côté humide. [52]

b) Influence de la nature du sol :

Un sol dont le compactage sera fortement influencé par la teneur en eau présentera une courbe de compactage avec un maximum très marqué. A l'inverse, un sol dont la teneur en eau influence peu le compactage sera caractérisé par une courbe de compactage très plate. Les sols de ce type font généralement les meilleurs remblais. La figure suivante donne quelques exemples des allures que peuvent présenter les courbes de compactage des sols courants.

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

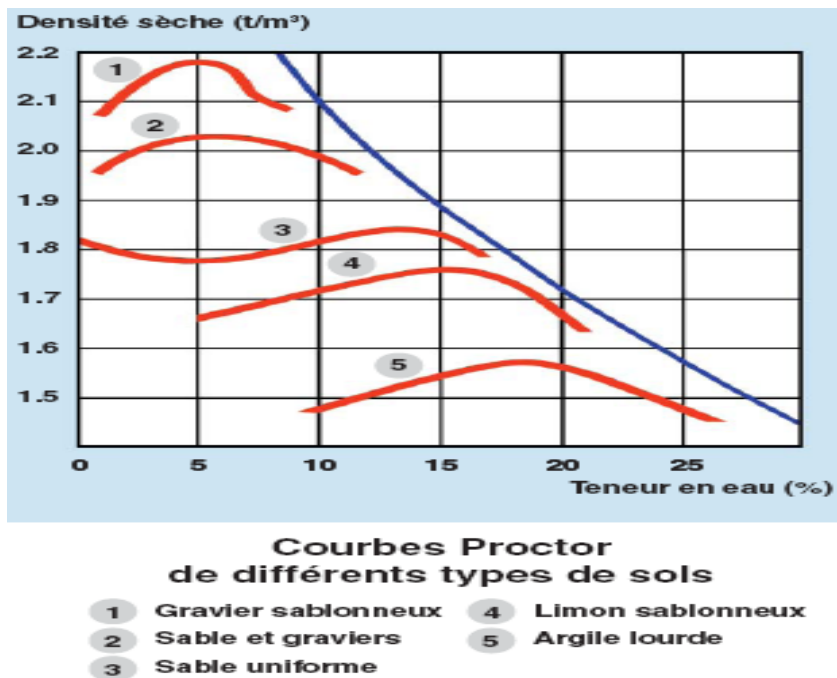


Figure II.4 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor. [41]

On voit que les sables sont très peu sensibles à l'eau en ce qui concerne le compactage, tandis que s'ils contiennent une fraction argileuse, leur courbe s'infléchit de manière importante. On voit en effet, la courbe du compactage se déplacer vers le haut et la gauche du diagramme à mesure que le nombre de coups augmente. [41]

c) Teneur en eau :

La teneur en eau joue un rôle important dans la conduite du compactage et suivant sa valeur, on obtient des résultats plus ou moins satisfaisants pour une même dépense d'énergie. Lors d'un essai de compactage, si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation du poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau ω , on obtient une courbe en cloche. Cette influence peut être expliquée par l'effet d'attraction des forces capillaires qui constitue une résistance au réarrangement des grains.

Pour étudier comment la teneur en eau influe sur le compactage d'une terre, Proctor a imaginé de procéder au tassement mécanique d'un échantillon, toujours de même façon, en modifiant seulement le degré d'humidité. Ayant tamisé, puis disposé la terre par couches égales dans un cylindre de dimensions bien définies, il tasse chaque couche à l'aide d'un pilon, toujours de même poids, tombant toujours de la même hauteur, un même nombre de fois n . En faisant varier la teneur en eau.

En particulier si, sur un graphique (Figure 6), on porte en ordonnées les valeurs de la densité apparente d et en abscisses les valeurs de la teneur en eau ω on obtient, pour un nombre

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

déterminé n de corps de pilon, une courbe de compactage passant par un maximum, dont l'abscisse est ω_{opt} . [40]

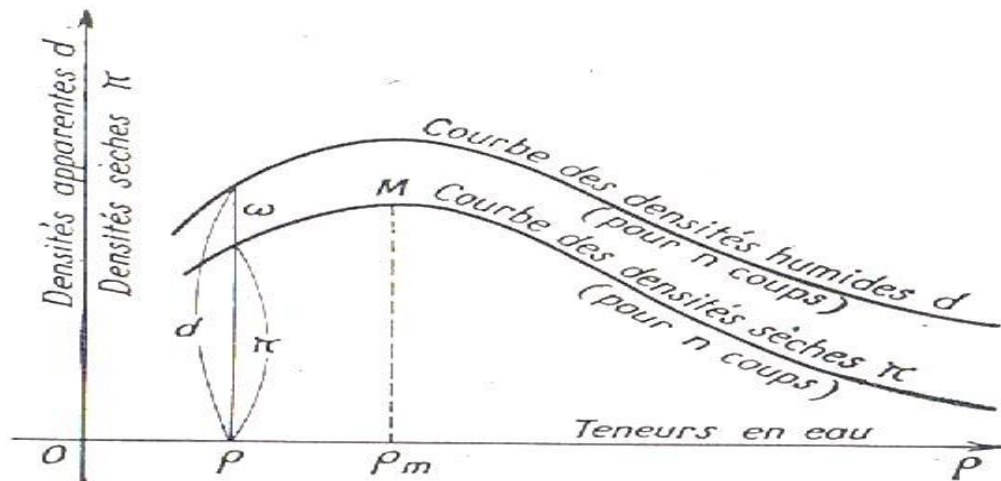


Figure II.5 : courbe de compactage (H.VARLET, 1966). [40]

d) Teneur en eau des matériaux fins :

Il convient que les matériaux d'emprunt aient une teneur en eau proche de celle de l'optimum Proctor normal. Mais, avant même de connaître cette valeur, on peut indiquer que lorsque les teneurs en eau sont inférieures à 10 ou supérieures à 40, les matériaux ont des caractéristiques médiocres et il peut être délicat de les utiliser comme emprunts. (DEGOUTTE, 2002). [53]

e) Résistance à la pénétration des terres saturées :

Pour le compactage des terres sur un chantier de barrage, il faut pouvoir à chaque instant, vérifier que la teneur en eau (donnée ou complétée par arrosage) est bien celle que les essais de laboratoire ont indiqué d'adopter. Or, la détermination de la teneur en eau ne se fait pas directement qu'en prenant un échantillon de terre, de poids connu, qui soumet à dessiccation complète et qu'on pèse ensuite. C'est une mesure délicate et longue qui relève du laboratoire. Proctor a trouvé un moyen plus pratique, et très expéditif, basé sur une propriété remarquable de la résistance à la pénétration des terres saturées. [52]

II.6. États de saturation d'un sol compacte :

Pour les sols compactés, Boutonnier, 2007 considère quatre domaines de saturation notés de 1 à 4. C'est quatre domaines sont schématisés dans la Figure 7, et ils sont définis comme suite

1. Le domaine D1 : le sol est non saturé. Dans ce domaine la phase d'air est continue.

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

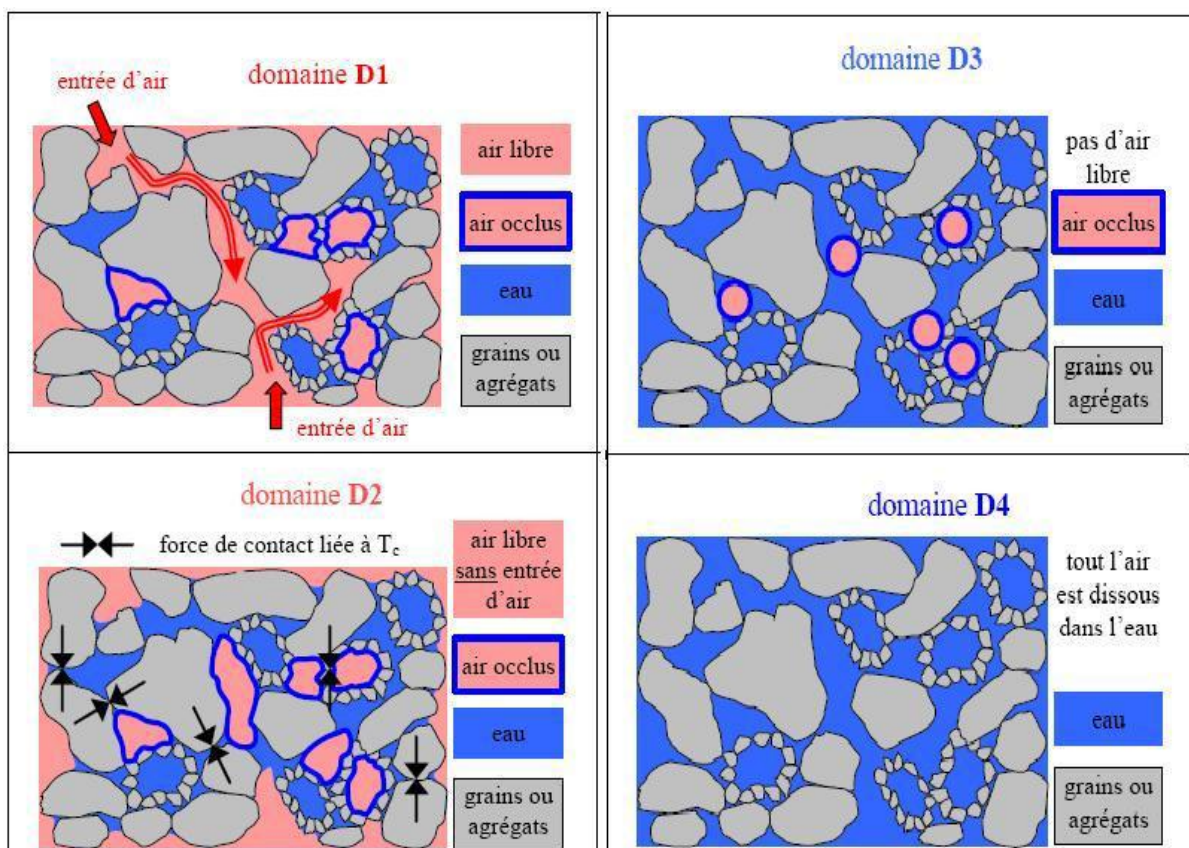
2. **Le domaine D2** : le sol est non saturé avec une phase d'air occlus et en contact avec le squelette solide.

3. **Le domaine D3** : le sol est partiellement saturé. Ce domaine diffère du domaine D2 par le fait que l'air occlus n'est pas en contact avec le squelette solide.

4. **Le domaine D4** : le sol est saturé par le fluide interstitiel.

L'auteur considère que la limite entre le domaine D2 et D3 correspond à une succion égale à zéro, et que le domaine D1 et D2 correspond au domaine à pression interstitielle négative.

En se basant sur quelques résultats de la littérature, Boutonnier, 2007 considère que le domaine D2 couvre l'optimum Proctor et une partie du côté humide de l'OPN, et peut être généralisé sur la ligne optimale de compactage comme illustré dans la Figure 8. [41]



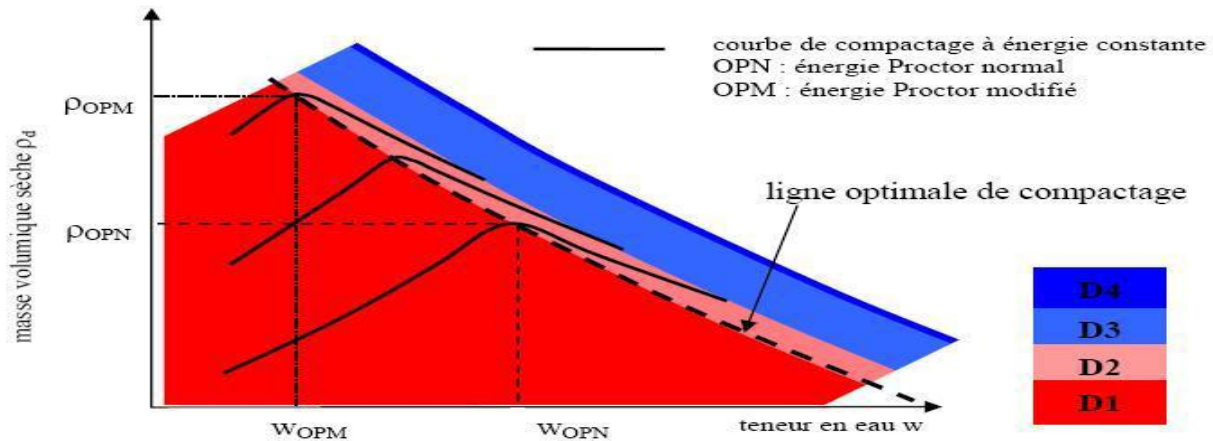


Figure II.7 : Limite des domaines D1, D2, D3 et D4 sur le diagramme de l'essai Proctor pour des sols fins, (Boutonnier, 2007). [41]

II.7. Les effets du compactage sur certaines propriétés des sols :

Le compactage augmente la stabilité des sols et leur capacité à porter des charges, mais modifie en même temps certaines de leurs propriétés. Les plus touchées sont la structure des sols, la perméabilité, le gonflement et le retrait, la compressibilité, ainsi que la résistance au cisaillement. [45]

a) La structure des sols :

On le sait, le compactage réduit l'indice des vides. Il densifie donc, par le fait même, la structure à grains uniques des sols pulvérulents. Dans les sols cohérents, il entraîne plutôt une réorganisation des particules d'argile, qui tendent à devenir parallèles et à adopter une structure dispersée. [45]

b) La perméabilité :

Le compactage diminue la quantité des vides dans le sol, une moins grande quantité d'eau peut y circuler. Si on augmente l'énergie de compactage, la quantité des vides diminue davantage, de même que la perméabilité. Dans les sols argileux, la perméabilité la plus faible s'obtient lorsque la teneur en eau est égale ou supérieure à la teneur en eau optimale pendant le compactage. La diminution de la perméabilité constitue un inconvénient dans le cas des sols pulvérulents utilisés comme matériaux de fondation dont on doit éliminer l'eau rapidement. [45]

c) Le gonflement et le retrait :

En réduisant ainsi l'indice des vides et la perméabilité des sols, on diminue à la fois la quantité d'eau qu'ils peuvent contenir et celle qu'ils sont susceptibles de recevoir. Ce faisant, on limite les variations de volumes causées, entre autres, par le gonflement et le retrait. À noter, cependant

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

: l'argile compactée alors que sa teneur en eau est supérieure à la teneur en eau optimale sera davantage sujette au retrait, tandis que celle qui est compactée alors que sa teneur en eau est inférieure à la teneur en eau optimale sera plus sujette au gonflement. [45]

d) La compressibilité :

Plus le volume occupé par les vides dans un sol est élevé, plus la compressibilité de ce sol est grande et plus les tassements peuvent y être importants. Ainsi, en réduisant les vides d'un sol par compactage, on le rend moins compressible, et les risques de tassement s'atténuent. [45]

e) La résistance au cisaillement :

Dans les sols pulvérulents, plus les particules sont resserrées les unes contre les autres par le compactage, plus le frottement et l'enchevêtrement deviennent importants et plus la résistance au cisaillement n'augmente. Dans les sols cohérents, les forces de cohésion constituent le facteur principal de la résistance au cisaillement. Or, plus la distance entre les particules est faible, plus les forces de cohésion sont élevées. En réduisant la distance qui sépare les particules, le compactage augmente donc la résistance au cisaillement.

De façon générale, la résistance au cisaillement des sols argileux est plus importante quand la teneur en eau est inférieure à la teneur en eau optimale pendant le compactage.

Puisqu'on augmente la résistance au cisaillement d'un sol en le compactant, on y augmente également l'angle de frottement interne. Or, la capacité portante des sols est directement proportionnelle à l'angle de frottement interne. [45]

II.8. Compactage dynamique :

Lors de la construction de routes ou de voies de chemin de fer, de terrassements de sols, assises de chaussées, remblais et barrages, il est important d'assurer un bon compactage mécanique pour la stabilité de l'ouvrage. Pour simuler la procédure de compactage à adopter pour obtenir un certain niveau de compacité sur site, des essais de laboratoire ont été développés depuis de nombreuses années, ils diffèrent seulement par le niveau d'énergie appliqué à l'échantillon de sol.

Le principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques. Les principes du compactage ont été exposés dans les années 1930 par Proctor. Celui-ci a mis au point un essai de compactage normalisé, l'essai Proctor, et a démontré que le compactage dépend de trois facteurs : la teneur en eau, l'énergie de compactage, et le type de sol à compacter. L'essai Proctor, pour un sol donné, pour un mode de compactage et une énergie

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

de compactage donnés, permet de déterminer l'évolution de la masse volumique finale du sol sec en fonction de la teneur en eau. [41]

II.8.1. Essai Proctor :

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé, avec une énergie d compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes de teneur en eau pour en déduire la teneur en eau optimale et la densité sèche maximum correspondante γ_d . On distingue :

- L'essai Proctor Normal avec une énergie de compactage modérée pour remblais en terre (barrages en terre, digues par exemples)
- L'essai Proctor Modifié avec une énergie de compactage intense pour couche de chaussées, pistes d'aérodromes,...). Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants. [54]

II.8.1.1.Appareillage spécifique :

L'appareillage spécifique comporte :

Socle de compactage : Il est constitué d'un bloc de plastique présentant une surface plane horizontale de 40 cm \times 60 cm et une épaisseur de 2 cm.

Moule PROCTOR : Le moule est constitué d'un corps, d'une embase et d'une rehausse.

Le corps du moule à 102 mm de diamètre et 116 mm de hauteur.

Dame PROCTOR normal : La dame PROCTOR normal est constituée d'un mouton cylindrique de 51 mm de diamètre, dont la masse est 2490 g ; le mouton coulis dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de 305mm.

Règle à araser : elle est constituée par une lame acier dont les formes et les dimensions doivent être conformes aux indications portées sur la Figure II.9 [41]

II.8.1.2. Appareillage d'usage courant d'usage courant :

Pour l'appareillage courant, un tamis à mailles carrées de dimension nominale 2 mm, une balance dont la portée maximale est 10 kg et la précision est 1 gramme, des récipients hermétiques, etc., sont préparés.

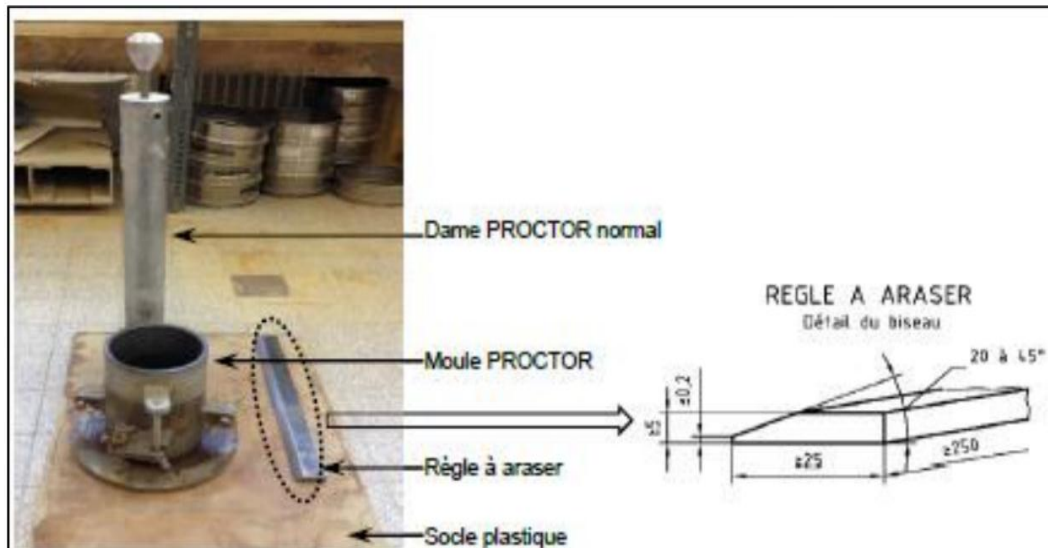


Figure II.8 : Appareillage spécifique pour l'essai PROCTOR. [41]

II.8.1.3. Procédure expérimentale :

➤ Préparation :

Avant le compactage du sol, il faut d'abord :

- 1) préparer le mélange du sol ;
- 2) solidariser le moule, l'embase et la rehausse ;
- 3) lubrifier les parois du moule avec de la graisse ; selon les étapes suivantes :

Préparer le mélange du sol : le matériau doit être mis dans l'étuve jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai. Une certaine quantité d'eau est malaxé avec le matériau ; on mélange doucement avec une pelle ; après le mélange, le matériau est conservé dans une boîte ou un sac hermétique au moins de 24 heures pour être homogénéifié ; le mélange du matériau constitue la phase la plus délicate de cet essai. Solidariser le moule, l'embase et la rehausse : cette étape est principalement pour protéger qu'il n'y a pas de décalage entre le corps, l'embase et la rehausse du moule pendant le compactage.

- **Lubrifier la paroi du moule** : la paroi du moule doit être lubrifié par de la graisse pour que l'on puisse retirer l'échantillon compacté plus facilement.
- **Compactage** : Introduire alors la quantité de matériau pour que la première couche après compactage soit légèrement plus haute que le tiers de la hauteur du moule ; compacter cette couche avec la dame PROCTOR normal en appliquant respectivement 25 coups ou 55 coups par couche suivant le schéma représenté sur la Figure 10. Répéter l'opération autant de fois pour la deuxième et la troisième couche.

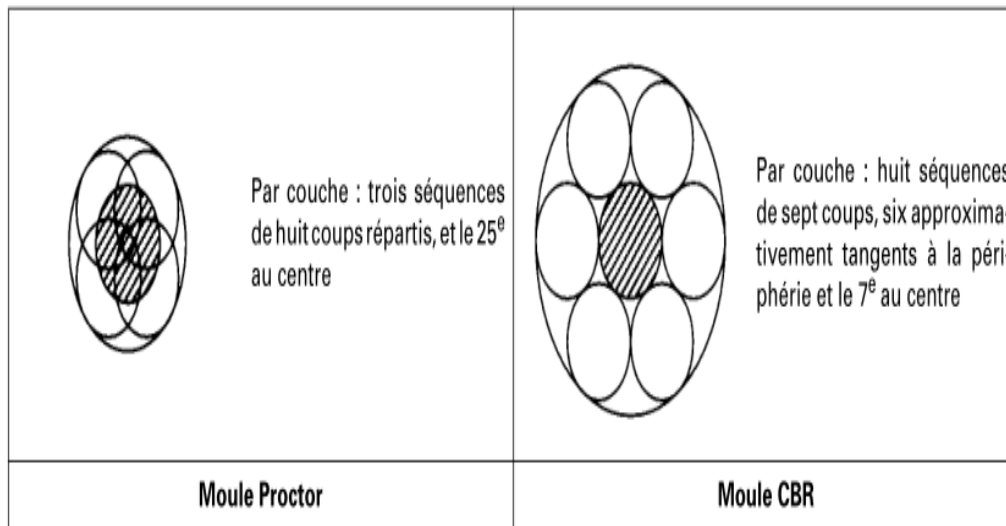


Figure II.9 : Position des coups dans le moule Proctor normal et modifié (norme NF P94-093). [41]

- **Araser et retirer l'échantillon** : Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur de 1 ou 2 centimètres en pratique ; cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radicalement du centre vers la périphérie du moule, ensuite, on retire l'échantillon.
- **Peser** : on pèse immédiatement la masse de l'échantillon compacté, et on prend une quantité de l'échantillon qui a été arasée pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon. [41]

II.8.1.4. Expression des résultats :

La densité sèche est obtenue par la formule :

$$\gamma_d = \frac{m_s}{V} = \frac{m}{(1+w) \cdot V}$$

Avec :

γ_d : densité sèche de l'échantillon.

m_s : Masse des grains solides.

V : volume de moule PROCTOR.

w : Teneur en eau de l'échantillon compacté.

De plus, il convient de faire figurer également sur la courbe PROCTOR les courbes d'équation :

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

$$\gamma_d = \frac{S_r \cdot \gamma_s}{S_r + w \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}}$$

Avec :

S_r : Degré de saturation du sol.

γ_s : Densité des grains solides.

γ_w : Densité de l'eau. [41]

II.9. quantité de matériaux - choix du type de moule :

La masse de prélèvement varie entre 15 kg et 100 kg suivant la granularité du matériau et suivant que l'on cherche une détermination concomitante de ses caractéristiques de compactage, de son Indice CBR après immersion et/ou de son Indice Portant Immédiat.

Le choix du moule est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur la Figure 11.

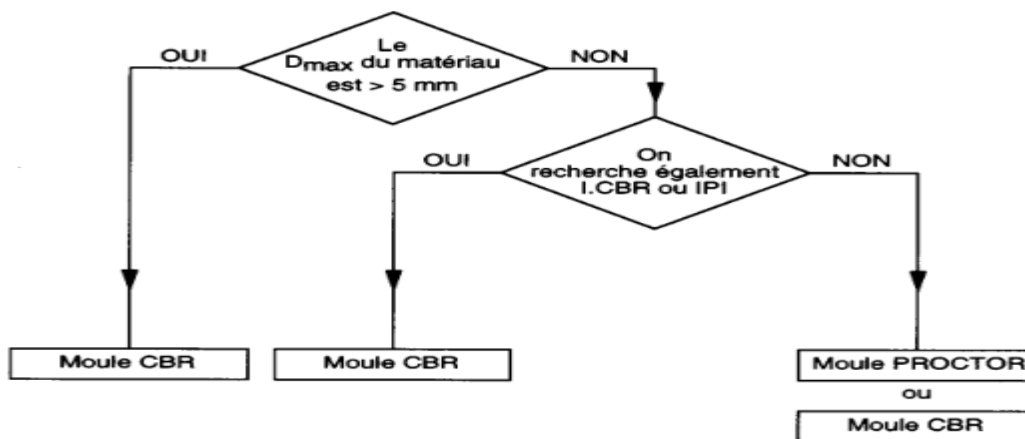


Figure II.10 : Diagramme de choix du moule de compactage (norme NF P 94-093). [41]

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir d'essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée (Tableau et figure)

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage



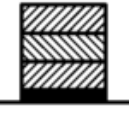



Tableau II.1 : Caractéristiques de compactage pour l'énergie Proctor normal et modifié
(Norme NF P 94-093). [41]

<i>Type</i>	<i>Nb total de coups</i>	<i>Hauteur de chute (cm)</i>	<i>Masse Dame (kg)</i>	<i>Diamètre du moule (cm)</i>	<i>Hauteur du moule (cm)</i>	<i>Energie kN.m/m³</i>
Normal	75	30,5	2,490	10,15	11,65	593
Modifié	280	45,7	4,535	15,20	11,60	2700

II.10. Normes de compactage :

Les modalités d'exécution de compactage à l'énergie Proctor normale ou modifié selon la norme française est donnée dans le tableau suivant.

Tableau II.2 : modalité d'exécution des essais Proctor normal et modifié norme (NF P 94-093). [55]

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>25 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Dame Proctor normal</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>56 coups par couche</p>  <p>Moule CBR</p> </div> </div>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>25 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Dame Proctor modifié</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>56 coups par couche</p>  <p>Moule CBR</p> </div> </div>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

Dans la littérature plusieurs normes sont utilisées.

Un exemple de ces normes est donné dans le tableau.2-3.

Tableau II.3 : Liste des normes de compactage appliquée dans certains pays. D'après
Zadjaoui, 2007. [55]

Référence	Source	spécificité
NF P 94-093	AFNOR (France)	Moule Proctor (100 mm) 24 coups en 6 tours tangents au bord et 1 coup final au successives de 6 coups au bord et 1 coup au centre, puis un dernier tour de 6 coups au bord du moule.
DIN 18 127 50.25	DIN (Allemagne)	Moule Proctor (100 mm) 25 coups au bord du moule en 3 tours (dame de 50 mm)
DIN 18 127 75.22	DIN (Allemagne)	Moule CBR (150 mm) 22 coups au bord du moule en 3 tours (dame de 75 mm)
DIN 18 127 75.59	DIN (Allemagne)	Moule CBR (150 mm) 59 coups au bord du moule en 3 tours (dame de 75 mm)
UNE 26	AENOR (Espagne)	Moule Proctor (100 mm) 26 coups en 6 tours en bord de moule en 3 tours Moule CBR (150 mm)
UNE 60	AENOR (Espagne)	Moule Proctor (100 mm) 60 coups en bord de moule en 8 tours Moule CBR (150 mm)
UNI 10009/56	UNI (Italie)	Moule CBR (150 mm) 2 séquences de 18 coups en bord et 9 coups tangents à un cercle de 100 mm de diamètre et 1 coup au centre
UNI 10009/26	UNI (Italie)	Moule CBR (150 mm)
UNI 10009/12	UNI (Italie)	Moule CBR (150 mm)
CNR 29	CNR (Italie)	Moule CBR (150 mm)
AASHTO T99 T180 25	(Etats Unis)	Moule CBR (150 mm)
UNE 103 501 94	AENOR (Espagne)	Moule CBR (150 mm)

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

BS 27 d105	BSI (Royaume Unie)	Moule Proctor (105 mm) 27 coups en bord de moule en 3 tours
BS 16 d152	BSI (Royaume Unie)	Moule CBR (152 mm) 2 séquences de 20 coups en bord de moule, 10 coups tangents à un cercle de 105 mm de diamètre et 1 coup au centre
BS 30 d152	BSI (Royaume Unie)	Moule CBR (152 mm) 20 coups en bord de moule et 10 coups tangents à un cercle de 105 mm de diamètre
NF P94-066	AFNOR (France)	Moule CBR (152 mm) 100 coups (dame 50 mm)
Dutch Raw	NEN (Pays Bas)	Moule Proctor (100 mm) 25 coups en bord de moule en 3 tours Moule CBR (150 mm)
Dutch EPP16/4	NEN (Pays Bas)	Moule CBR (150 mm)
Dutch EPP 20	NEN (Pays Bas)	Moule CBR (150 mm) 20 coups en bord de moule en 4 tours
CNR 69	CNR (Italie)	Moule Proctor (100 mm) 25 coups en bord de moule en 3 tours Moule CBR (150 mm)
ASTM D 698	ASTM (Etats Unis)	Moule Proctor (100 mm) 25 coups en bord de moule en 3 tours Moule CBR (150 mm)

Zadjaoui, 2007 en étudiant un tuf calcaire de la région de Beni-Saf ($w_L=23\%$) à mis en évidence l'influence de la norme utilisée sur les valeurs à l'optimum.

L'auteur à constater que le mode de compactage ainsi que la norme utilisée ont une influence directe sur la densité d'un sol étudié. [55]

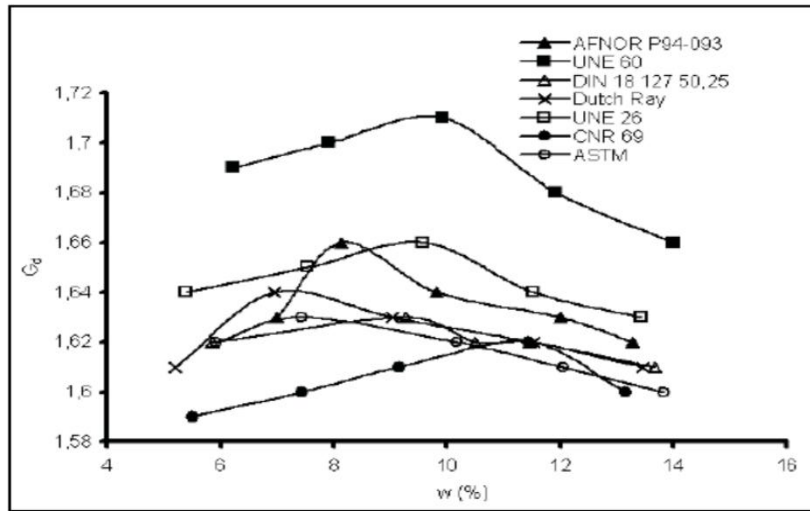


Figure II.11 : Résultats des essais Proctor Normal. Influence des normes appliquées.

Zadjaoui, 2007. [55]

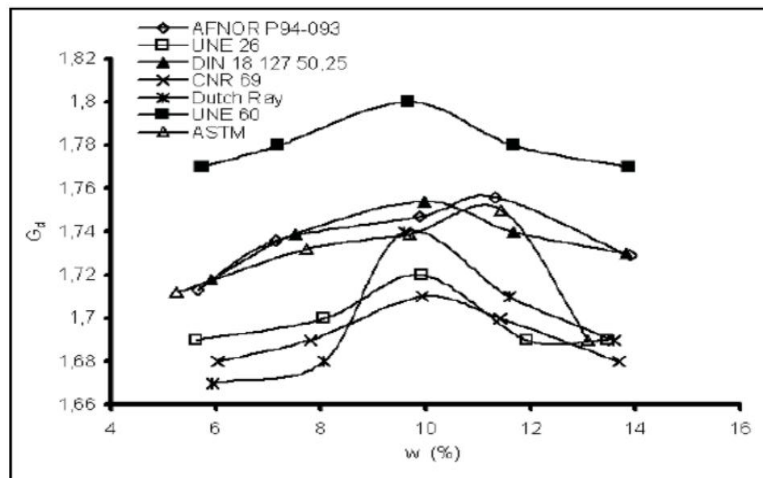


Figure II.12 : Résultats des essais Proctor modifié. Influence des normes appliquées.

Zadjaoui, 2007. [55]

II.11. Compactage statique :

Le compactage, (opération préalable à l'utilisation des sols argileux en géotechnique) a été étudié depuis longtemps (Proctor, 1933). Cependant, l'hétérogénéité de l'échantillon obtenu par cet essai ne permet pas de l'utiliser pour des études de laboratoire complètes. D'autres essais ont donc été développés (Olivier, M. et Mesbah A., 1986, Venkatarama Reddy, B. V. and Jagadish,

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

K. S.), où le compactage est quasi statique ou appelé aussi compactage statique avec contrainte de compression axiale ou vitesse de déplacement imposée, par opposition au compactage dynamique de l'essai Proctor.

Ce type du compactage présenté sur la Figure 14, est effectué par introduire le matériau, préalablement mélangé avec une teneur en eau donnée, dans un moule œdométrique, puis placé dans entre deux pistons mobiles ou l'un fixe et l'autre mobile. A l'aide d'une contrainte appliquée, ou un déplacement imposée (compactage à vitesse constante), le compactage se fait en haut en bas pour avoir une meilleure compacité. L'intérêt majeur de ce procédé est d'obtenir des éprouvettes représentatives et homogènes. [55]

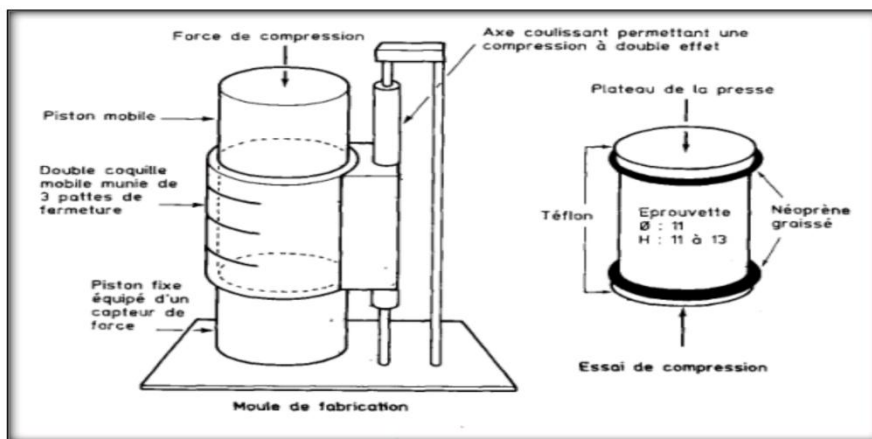


Figure II.13 : Dispositif de compactage statique à double piston. Dennis, 1994. [55]

II.11.2. Techniques de compactage statiques :

Le problème de la reconstitution d'éprouvettes a souvent été soulevé dans la littérature en Génie Civil, surtout lorsque des essais spéciaux devaient être réalisés sur des sols compacts. Camapum de Carvalho et Mieussens 1985, et Camapum de Carvalho, 1985, ont proposé une méthode de compactage de sols un peu différente de celle présentée ci-dessus, dans le but essentiellement de diminuer les efforts de frottement entre le sol et le moule, et ainsi de minimiser le gradient de densité dans l'éprouvette. Le principe consiste à placer une membrane de néoprène à l'intérieur des parois du moule, et fixée à l'extérieur et aux extrémités des deux pistons. Cette membrane est tendue en début de compactage de façon à éviter la formation de plis dans l'éprouvette. Ce dispositif impose donc un jeu de l'épaisseur de la membrane, entre le piston et le moule. C'est pourquoi, s'il est parfaitement adapté aux sols fins (0/1 mm), il est plus difficile d'utilisation avec les sols grenus étudiés, dont les grains ont un diamètre compris entre

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

10 à 15mm, risquent de crever la membrane et surtout de s'insérer entre le moule et le piston, bloquant alors le compactage. Par ailleurs, ce système utilise également le principe du double compactage. Des mesures de frottement ont été réalisées sur le dispositif de Camapum de Carvallo et Mieussens 1985. Ils montrent qu'en l'absence de membrane, les frottements sont proportionnels à la contrainte de compactage et atteignent 25% de cette valeur. Avec différents types de membranes, ils ne représentent plus que 3 à 5% de cette contrainte.

Des mesures de frottements, similaires à celles réalisées par Camapum de Carvallo et Mieussens, 1985, ont montré que la contrainte totale créée par la presse et mesurée par un capteur de force positionné au-dessus de l'éprouvette, se transmettait à 96% au sol.

C'est ce qui est montré sur Figure 15 qui donne l'effort en haut et en bas de l'éprouvette, ainsi que le déplacement total, enregistrés en fonction du temps. [55]

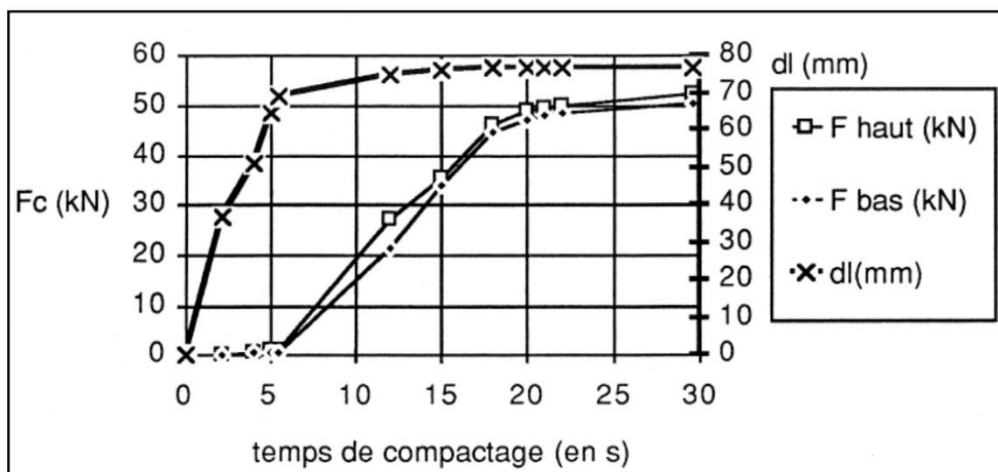


Figure II.14 : Efforts et déplacements du piston, enregistrés en haut et en bas de l'éprouvette pendant un essai de compactage statique. Denis, 1994. [55]

II.12. Quelques notions sur le compactage sur chantier :

II.12.1. Les engins de compactage :

II.12.1.1. Généralités :

Avant de décrire les différents engins de compactage, nous allons tenter de les classer et de donner quelques notions générales applicables à tous les engins quelles que soit leur nature.

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

II.12.1.2. Définition Générale :

- Nous appellerons engin de compactage, tout matériel de génie civil destiné à compacter un sol ou une couche de chaussé.
- Les actions de compactage sur le chantier peuvent être classés en fonction du mode de transmission de l'énergie au matériau : statique (ou quasi-statique), pétrissage, impact, vibrations. Les matériels de compactage combinent souvent plusieurs des modes d'actions cités ci-dessus.

Dans les documents du ministère de l'équipement qui font référence en France, les différentes familles d'engins considérés sont :

- les compacteurs à pneus ;
- les compacteurs vibrants : à cylindres lisses, à pieds dameurs ;
- les compacteurs statiques à pieds dameurs ;
- les plaques vibrantes.

Pour chaque famille, on définit des classes d'efficacité calculées, par exemple, pour les compacteurs à pneus en fonction de la charge par roue ou dans le cas de compacteurs vibrants en fonction de l'amplitude des vibrations.

On rappelle ici que les compacteurs à pieds dameurs (à pieds de mouton) ne sont efficaces que pour les matériaux à cohésion et que les systèmes purement à vibrations ne sont efficaces que pour les matériaux non cohérents. [46]

II.12.1.3. Classement des engins :

Il est indispensable de procéder à un classement de ces engins, ne serait-ce que pour pouvoir décrire chacun des types retenus. De nombreuses classifications ont été tentées.

Nous mentionnerons celle du Comité for European Construction Equipment (C.E.C.E), de la fédération nationale des travaux Public (F.N.T.P) et de la Commission d'étude des matériels de Génie Civil (C.E.M.A.G).

La Recommandation pour les terrassements routiers, complétée par la note technique sur le compactage des remblais de tranchées, contient un autre classement que nous utiliserons en y adjoignant, d'une part, un classement morphologique des rouleaux vibrants, et d'autre part, quelques indications sommaires sur les rouleaux à bandages lisses, certes périmés aujourd'hui, mais qui nous paraissent cependant mériter encore une mention, fût-elle historique. [43]

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

II.12.1.4. Rouleaux à bandage lisse :

a) Historique et généralité :

Les rouleaux à bandage lisse sont les premiers engins de compactage apparus dans la technique, puisque dès 1830 l'ingénieur français Fortin proposa de tasser le macadam par un rouleau pesant 2400kg. [43]

b) Description générale et classements :

Les engins sont composés d'un châssis très robuste portant la chaîne cinématique (qui comprend le moteur), la cabine, le poste de commande et les roues.

Les roues, qui constituent l'élément compacteur, sont des cylindres en acier d'un diamètre variant de 0.40 m et 2 m. La surface cylindrique s'appelle le bandage lisse.

Les largeurs des génératrices de ces cylindres s'étagent de 0.20 m à 2 m pour certains tandems.

Ces roues comportent, en effet, trois types de dispositions différentes correspondant à trois classes morphologiques différentes :

- Les rouleaux compresseurs tricycles qui comportent une roue large à l'avant souvent divisée en deux éléments contigus.
Ce cylindre est de faible diamètre et il est placé dans l'axe du comparateur. Cette roue est directrice, mais non motrice.
- Les rouleaux compresseurs tandems comportent deux cylindres de même largeur à l'avant et à l'arrière ; le deuxième recouvrant exactement le premier. La direction est obtenue en donnant un angle aux axes des deux axes des deux cylindres. Cet engin est très employé pour le compactage des enrobés, mais comme cela a été indiqué précédemment, il ne doit alors venir qu'en deuxième position derrière un compacteur à pneus lourd (ou un engin vibrant).
- La troisième disposition (rouleau à bandages lisses triaxial) est moins fréquente et se rencontre ou s'est rencontrée dans des fabrications américaines, anglaises, danoises et russes. Il lui est reproché une maniabilité et une stabilité insuffisantes. Un constructeur anglais a rendu le bâti de cette machine articulé, ce qui lui donne des capacités d'évolution beaucoup plus importantes. (G. ARQUIE et G. MOREL, 1988). [43]

c) Poids total en charge :

La gamme de ces engins s'étant considérablement rétrécie, le poids total en charge qui s'étalait entre 1.5 tonne et 25 tonnes ne varie plus qu'entre 8 tonnes et 16 tonnes.

(G. ARQUIE et G. MOREL, 1988). [43]

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

II.12.1.5.rouleaux a pneu :

i. Généralité :

Apparu en France vers 1950, ce type d'engins s'est bientôt imposé par ses qualités qui lui ont conféré un quasi université d'emploi.

Sols cohérents ou couches de chaussées, graves simples ou graves traitées, enduits superficiels ou enrobés, peuvent être compactés avec ces matériels.

Tractés à leurs débuts, ils sont rapidement devenus automoteurs et le nombre de modèles existants ainsi que la variété des solutions, témoignent de l'intérêt porté à ce type d'engin. [43]

ii. Paramètres de compactage :

La partie « active » du point de vue compactage étant constituée par le train de roulement du compacteur à pneus, il convient de lui accorder la plus grande attention.

En effet, l'action du compacteur à pneus bien connue aujourd'hui et que nous n'entendons pas développer ici, fait appel à trois valeurs fondamentales :

- La charge par roue.
- La géométrie du pneumatique et sa pression de gonflage.
- Le nombre de passe. [43]

iii. Classification des compacteurs à pneus :

On distingue essentiellement trois types :

- Compacteurs à pneus tractés à une rangée de roues, très lourds (60 – 100 tonnes).
- Compacteurs à pneus tractés à deux rangées de roues, légers (< 15t).
- Compacteurs à pneus automoteurs. [43]

II.12.1.6.Rouleaux vibrants :

i. Généralité :

Les rouleaux vibrants se sont maintenant imposé tous les travaux de compactage.

En diminuant ou même en supprimant les frottements entre les grains, la vibration facilite le compactage, comme le montre son utilisation dans le serrage des bétons. Elle permet des actions en profondeur notables, surtout lorsque le rouleau est lourd.

Ces engins sont utilisables pour le compactage des matériaux à angle de frottement interne élevé ce qui explique que leur domaine d'action préférentiel soit celui des assises de chaussée.

- Rouleau mono axe tracté,

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

- Rouleau monocylindre autotracté.
- Rouleau automobile monocylindre.
- Rouleau tandem transversal.
- Rouleau tandem longitudinal.
- Rouleau automobile mixte vibrant à pneus.
- Combinaison d'attelages. [43]

II.12.1.7. Rouleaux à pieds dameurs :

i. Définition :

Ce sont des compacteurs très anciens utilisés aux Etats-Unis dès le début des années 30. C'est le type de rouleau qu'utilisait Proctor. (G. ARQUIE et G. MOREL, 1988)

Les compacteurs à pieds dameurs, actuellement sur le marché, sont de trois types :

- Les tandems, à articulation centrale,
- Les tricycles,
- Les quadri-roues.

Ils ont comme éléments agissants, des cylindres métalliques hérissés de protubérances de forme généralement fixe appelées pieds de mouton ; mais nous verrons qu'il existe d'autres formes de protubérance de noms différents (pieds d'éléphant). (BIAREZ, 1974)

- Rouleaux à pieds de mouton tractés,
- Rouleaux à pieds dameurs automoteurs,
- Rouleaux à grille. [43]

II.12.1.8. Rouleaux à segments :

Les compacteurs automoteurs à pieds dameurs sont caractérisés par des vitesses de travail relativement élevées qui permettent l'obtention de rendement important malgré leur limitation du point de vue de l'épaisseur des couches à compacter. (BIAREZ, 1974)

En fin, il est à que Le passage répété d'engins lourds et le désherbage ont eu notamment une influence notable sur le tassement. On parle alors de compactage, c'est à dire de diminution de la porosité du sol. La notion de porosité est importante pour le fonctionnement du sol car elle conditionne la circulation de l'air et de l'eau. (P. GUILBAULT, 2007) [43]

II.13. Mise en œuvre des remblais :

La mise en place des remblais (A.EMMANUEL, 2002), notamment celle relative aux digues et barrages doit obéir à certaines règles et normes qui peuvent être résumées au niveau des critères ci-dessous :

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

- Pour obtenir un ouvrage aux dimensions du profil théorique portées sur les plans d'exécution, les remblais doivent être exécutés avec des surépaisseurs sur tous les talus. Ces surépaisseurs, qui permettent de compacter efficacement jusqu'à la limite théorique du talus, sont enlevées en fin d'exécution.
- Pour assurer une bonne liaison entre le remblai et une fondation meuble, cette dernière est compactée avec les mêmes engins que le remblai, puis scarifiée avant la mise en place de la première couche de remblai.
- Lorsque les talus de la clé d'étanchéité sont meubles, il est souhaitable que le compacteur « morde » sur la paroi pour assurer une bonne liaison entre le remblai et le terrain en place.
- Le matériau à compacter est régalé suivant une couche plane d'épaisseur uniforme sur une assise ne présentant ni creux, ni bosse, préalablement scarifiée sur une épaisseur minimale de 5 cm pour assurer une bonne liaison entre les couches. Les normes de compactage sont définies dans le CCTP ainsi que les modalités d'exécution de la planche d'essai.
- En cas d'arrêt du chantier, en particulier en fin de journée, la dernière couche mise en place doit être fermée et présenter une pente permettant l'écoulement naturel de l'eau de pluie éventuelle. Un remblai détrempe peut être conservé s'il est possible de ramener la teneur en eau à une valeur acceptable avant compactage. Dans le cas contraire, il doit être évacué. Un remblai gelé doit être enlevé.
- À proximité des structures rigides, ou en certains points particuliers, les engins de compactage normaux ne peuvent être utilisés. Ils sont alors remplacés par un matériel adapté aux circonstances et permettant d'obtenir un remblai compacté selon des prescriptions définies.
- Les stocks de matériaux drainants et filtrants doivent être protégés contre les eaux de ruissellement pour éviter toute pollution. Ils doivent être mis en place aussi rapidement que possible et être protégés immédiatement par une couche de matériaux compactés. Dans le cas où une zone est décapée, elle est toujours raccordée en pente assez douce aux zones avoisinantes du remblai, afin de permettre l'utilisation normale des engins et éviter les discontinuités dans le massif. [43]

II.14. Contrôles de compactage :

Les contrôles de compactage doivent s'effectuer à plusieurs stades de la réalisation d'un chantier. Ils sont maintenant intégrés dans les procédures qualité.

Chapitre II : Notions fondamentales sur le compactage

On peut distinguer temporellement trois dates :

1. contrôle a priori.
2. contrôle à la mise en œuvre.
3. contrôle a posteriori.

Les contrôles a priori ont pour but de vérifier que le matériau que l'on extrait de la zone d'emprunt est bien celui qui est prévu ou si l'on doit le reclasser en fonction de sa nature et de son état et redéfinir les conditions de compactage. Il est tout à fait évident qu'il est beaucoup plus facile et efficace de travailler avec un matériau relativement homogène.

Les contrôles à la mise en œuvre : une fois que les règles de compactage ont été définies (éventuellement grâce à la réalisation de planches d'essais), ces contrôles permettent de vérifier que la réalisation pratique est conforme à la définition en termes d'engins utilisés, d'épaisseur de couches, de traitements, d'énergie, etc...

Les contrôles a posteriori sont réalisés après le compactage, ils peuvent porter sur une valeur de densité, sur une propriété mécanique objectif, etc... Il est clair qu'il est préférable de ne pas avoir de résultats négatifs à ce niveau pour des raisons de bon fonctionnement du chantier et que la meilleure efficacité se situe en amont. [46]

II.15. Conclusion :

Cette contribution bibliographique a mis en évidence l'ensemble des aspects liés au compactage des sols, objectif de compactage, l'influence de plusieurs paramètres comme énergie de compactage, nature de sol et la teneur en eau, ainsi la classification des sols en vue du compactage.

III.1. Introduction :

L'industrie routière algérienne utilise actuellement deux catégories de bitume 40/50 et 80/100 :

- la première est fabriquée en Algérie même ;
- la seconde est soit fabriquée en Algérie soit importée d'Espagne.

L'analyse en laboratoire de quelques bitumes de catégorie 40/50 et des constatations opérées sur chantier laissent à penser que l'utilisation de ces bitumes peut poser différents problèmes liés aux fluctuations des caractéristiques des liants à l'arrivée sur le chantier et à leur qualité intrinsèque avec des conséquences en matière de formulation et conditions de fabrication et de mise en place des enrobés.

Nous évoquerons le premier point, en nous limitant aux caractéristiques usuelles des bitumes, pour, compte tenu du climat algérien, essayer de rapprocher les constatations de chantier de la qualité intrinsèque des liants, tout en étant conscient que la formule, les conditions de fabrication et de mise en place des enrobés jouent le plus grand rôle dans la qualité du revêtement en place.[57]

Depuis vingt à vingt-cinq ans, une technique nouvelle est apparue dans le domaine des routes : le béton compacté au rouleau ou (B.C.R) Elle est innovante tant pour le matériau que pour sa mise en œuvre. Le matériau est composé de granulats, d'eau et de liants hydrauliques mis en place comme un remblai, essentiellement à l'aide des matériels classiques de terrassement, que ce soit pour son transport (camions), sa mise en place en couches minces (buteur) ou son compactage (rouleau vibrant lourd). Cette technique s'inspire donc à la fois des procédés de construction des ouvrages poids en béton pour le dimensionnement de l'ouvrage et le matériau et des ouvrages en terre ou enrochements pour l'exécution du chantier. Ses gros intérêts sont sa rapidité d'exécution et le faible coût de mise en œuvre. [58]

III.2. Le béton compacté au rouleau :

III.2.1. Constituants d'un mélange de BCR :

La composition du BCR doit faire l'objet d'études au laboratoire portant sur la maniabilité du béton frais et sur la résistance du béton durci. La granulométrie est choisie, après essais au laboratoire, de façon à obtenir un béton compact, résistant et maniable. Généralement, les mélanges de BCR sont fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale comprise entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs. Les granulats représentent un pourcentage approximativement compris entre 75 et 85% du volume total du mélange solide. [59]

Dans notre étude, nous avons utilisé, pour des raisons économiques, un faible dosage en ciment de 280 kg/m^3 qui est substitué ensuite par des FC de $150 \mu\text{m}$. Le ciment que nous avons utilisé est un ciment hydraulique du type Portland, de provenance la cimenterie M'sila de Classe CPJ 32,5 N (Chamil). Les granulats utilisés sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques des granulats utilisés, carrière Kef azrou.

Granulats	Provenance	ρ Masse volumique kg/m^3	A_p : Coefficient d'aplatissement	Los Angeles
Sable 0/4	Kef Azrou	2820		
Gravier 3/8	Kef Azrou	2570	8,37	31,24 %
Gravier 8/15	Kef Azrou	2730	8,73	27,44 %

Pour déterminer les pourcentages des granulats utilisés, la teneur en eau optimale, nous avons utilisé la méthode de détermination compacité (Voir chapitre III).

III.2.2. Les procédés de mise en place du BCR en couche de roulement :

Pour la grande majorité des chantiers, la mise en œuvre de revêtements en BCR est effectuée à l'aide d'équipements habituellement employés pour la construction de pavage en béton bitumineux. Ces équipements sont, pour la plupart, bien adaptés à la mise en place du BCR. La mise en œuvre d'un revêtement en BCR comprend les étapes suivantes : préparation de sol support et de la fondation, production du BCR, transport, mise en place et compactage, sciage des joints et mûrissement [60].

- **Le sol support et la fondation :**

La bibliographie montre que la grande sensibilité des dalles aux irrégularités et aux mouvements propres du sol impose de mettre celui-ci dans des conditions optimales d'homogénéité et de stabilité. Il est indispensable de procéder au compactage du terrain pour éliminer les tassements initiaux. Il est possible de poser la dalle de BCR directement sur le sol support pour le cas des routes secondaires à circulation légère. Mais les chaussées en BCR sont le plus souvent destinées à la circulation lourde. L'interposition d'une fondation en matériau graveleux est nécessaire et cette couche doit être convenablement compactée sans excès [60].

- **Confection et mise en place du BCR :**

Le dosage pondéral et le malaxage du BCR sont faits soit en centrale fixe soit dans de grandes bétonnières mobiles sur chenilles (multifoot) suivant le chantier et déversant le béton à distance au moyen de bennes roulant sur un bras mobile, soit plus rarement dans des bétonnières incorporées à l'ensemble vibro-finiisseur. Le temps de malaxage doit être strictement observé (une minute environ). L'eau est dosée le plus souvent volumétriquement ; l'adjuvant, s'il y a lieu, est introduit en solution dans l'eau de gâchage. D'une façon générale, les spécifications n'exigent que le BCR soit transporté, mis en place et compacté dans les 60 minutes qui suivent le début du malaxage, quoique les conditions de température ambiante puissent augmenter ou diminuer cette période [60].

- **Le problème des joints :**

En vue de faciliter la dilatation et le retrait, et de permettre certaines déformations relatives des dalles de BCR, il est nécessaire de concevoir des joints entre celles-ci. Malgré que ces joints constituent les points faibles des chaussées en BCR. L'épaisseur de ces joints est de l'ordre de 20 à 30 mm [60].



Figure III.1: Production et malaxage du BCR [58]

La mise en œuvre de revêtements en BCR est effectuée à l'aide d'équipements habituellement employés pour la construction de pavage en béton bitumineux. Le BCR pour les pavages est mis en place avec une paveuse à asphalte jusqu'à des épaisseurs de 125 à 250 mm. Les équipements de pavage haut compaction sont préférables pour les épaisseurs de plus de 150 mm [58].



Figure III.2 : Transport et mise en place du BCR par finisseur à haut pouvoir de compactage [58]

Le compactage est l'étape la plus importante du procédé : il assure la densité et la résistance du revêtement, de même que son égalité et sa texture superficielle. Il commence dès la mise en

place et se poursuit jusqu'à ce que le revêtement ait la densité recherchée. Une fois le BCR durci, la chaussée peut être ouverte à la circulation. Pour éviter l'évaporation de l'eau de gâchage, on a recours au répandage d'un produit de cure constituant une membrane de protection superficielle, pulvérisée en une ou deux couches [60].

III.3. Le béton bitumineux (BB) :

III.3.1. Caractéristiques et mise en œuvre principales du béton bitumineux :

Les bétons bitumineux sont des matériaux imperméables. Leur formulation et leur aspect en font un matériau fermé ce qui signifie que leur surface est entièrement composée de granulats et de liant sans aucun espace entre les particules. Ils restent cependant des matériaux rugueux. C'est le revêtement classique des chaussées et des trottoirs. Pour ces derniers et en milieu urbain, l'asphalte est aussi très utilisé. Constitué d'un liant bitumineux noir, il peut être clair avec un liant bitumineux sans asphaltène. Il sera privilégié pour l'utilisation sur des espaces modes doux. Aujourd'hui, environ 90% des enrobés sont réalisés avec des liants bitumineux noirs. La formulation des bétons bitumineux diffère selon le type d'usages qu'ils supportent. D'une part, le choix d'une structure adaptée est essentiel, d'autre part, la teneur en liant, la fraction des granulats, l'ajout d'adjuvant et l'épaisseur d'application permettent de répondre aux sollicitations attendues. Suivant ces caractéristiques, on parlera de structure légère, lourde ou super lourde. [57]

III.4. Différence entre chaussée en BCR et chaussée en béton bitumineux :

Les chaussées sont divisées traditionnellement en deux grandes catégories : les chaussées rigides et les chaussées souples. Cette subdivision permet de clarifier les idées sur la façon dont la chaussée réagit aux charges qui y sont appliquées et aux agressions des conditions ambiantes. Les spécialistes montrent qu'il y a une grande différence entre la chaussée en BCR et la chaussée en BB. La rigidité structurelle du premier est plus forte comparativement à celle de la seconde. La principale différence entre ces deux types de chaussées, souple et rigide, réside dans la façon où le revêtement répartit la charge sur la couche de forme. Grâce à ces bonnes rigidités et raideur, le BCR tend à étaler la charge sur une grande surface de la couche de forme. Par contre, le revêtement en BB se compose de matériaux plus souples et moins raides, il ne répartit pas la charge de la même façon qu'un revêtement rigide.

Pour atteindre les objectifs de répartition, il faut ainsi plus de couches de revêtement ou plus d'épaisseurs, pour former une hauteur propre à assurer un étalement optimal de la charge sur le sol support. En outre, selon Saucier et al et d'après une étude du coût du cycle de vie faite en

1998 par ERES Consultants, la durée utile prévue de la chaussée souple en BB est de 17 ans, alors que celle de la chaussée rigide en BCR est de 34 ans. [61]

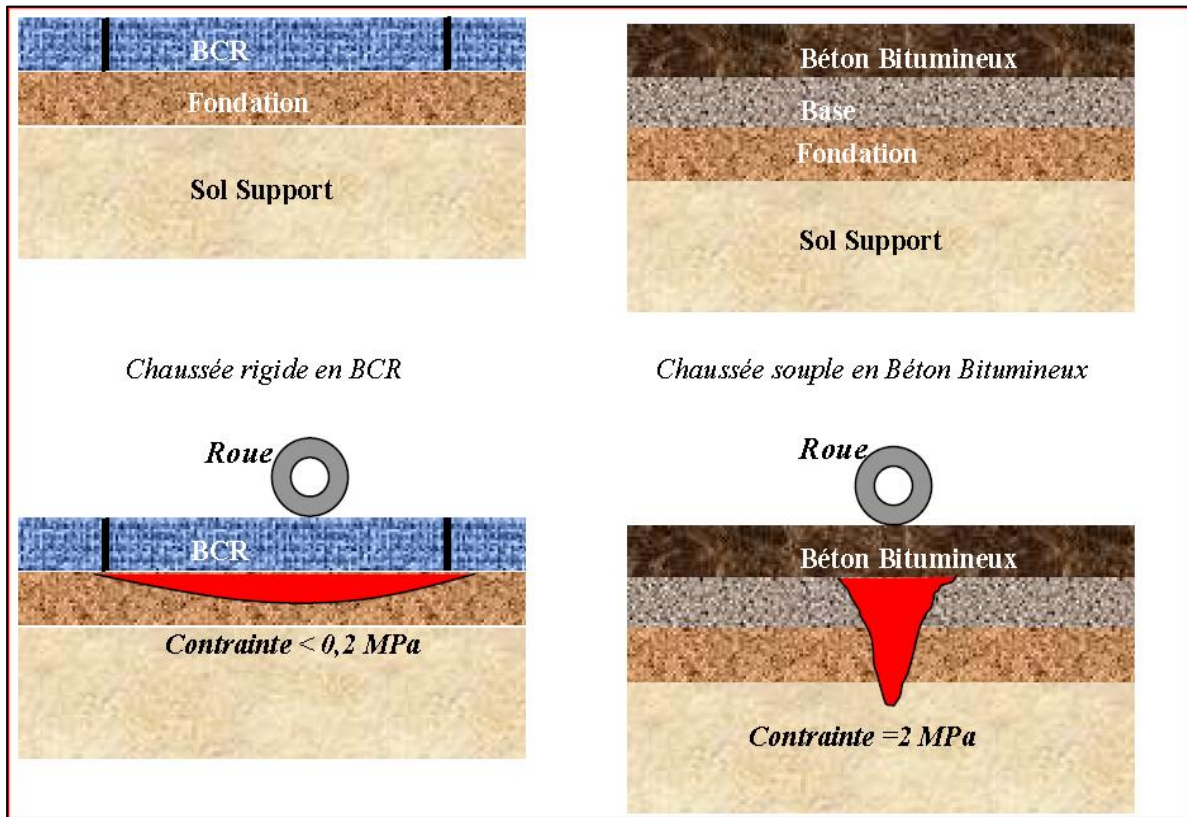


Figure III.3 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB [62]

Nouman a indiqué que la compagnie NSTPW a réalisé une comparaison de deux variantes de chaussée à travers l'étude de deux sections l'une rigide l'autre souple pendant les cinq premières années après construction. L'étude a porté sur la performance des deux types de chaussées basés sur les critères suivants : indice concernant le profil "profile ride index" (PRI), indice concernant le confort "riding comfort index" (RCI), indice de frottement extérieur "surface friction" (pendule britannique), niveaux de bruit au bord de la route "road-side noise levels" et une enquêtes extérieures de détresse "surface distress surveys". [61]

Les évaluations annuelles sont résumées dans le Tableau suivant :

Tableau III.2 : Comparaison des performances de deux types de chaussées (rigide et souple)

[62]

Summary of Results from TPW 5-Yr Study					
Rigid	1995	1996	1997	1998	1999
IRI (mm/100 m)	4.1	4.8	7.1	6.1	6.8
RCI	7.5	6.4	7.8	7.3	7.4
Friction No.	84	71	70	68	60
Noise Level (dBA)	93	89	90	96	89
Flexible	1995	1996	1997	1998	1999
IRI (mm/100 m)	4.2	7.2	11.2	13.3	16.2
RCI	7.9	6.9	7.2	6.6	6.9
Friction No.	68	56	53	65	48
Noise Level (dBA)	89	87	88	93	87

III.5.étude économique :

III.5.1.Evaluation économique :

Nous traitons dans cette partie de notre travail une évaluation économique qui a été réalisé à Lafarge Holcim au CDL de deux variantes différentes de structures de chaussées (Figure 4). La première variante est une structure conventionnelle de Type couche de fondation et couche de base en grave non traité avec une couche de roulement en Béton Bitumineux (BB). La deuxième variante est structure de chaussées en BCR sur une couche de fondation/base en graves non traité reposant elle-même sur le sol support.

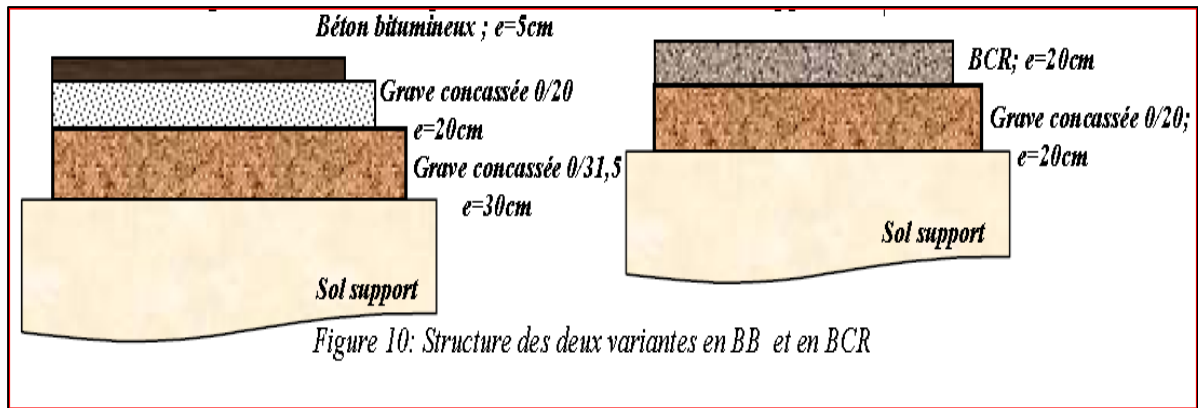


Figure III.4 : Structure des deux variantes en BB et en BCR. [62]

Tableau III.3 : Les prix estimatif des deux variantes étudié.

Cas de structure :

- RN
- Trafic Moyen
- 6cm BB + 20cm GB (20ans)
- alternative
- 6cm BB + 25cm BCR + GNT (25ans)

	PU dzd / m ²	PU dzd / m ² / an
Structure classique BB	3 894	194,70
Structure BCR	4 449	177,95
Gains	9,5%	

III.5.2. Interprétation :

L'étude économique à travers la préparation de prix pour les deux variantes différentes montre clairement la différence dans le prix de revient des deux propositions.

La deuxième variante dont laquelle nous utilisons le BCR en couche de roulement se distingue par son prix un peu élevé par rapport à la variante traditionnelle dont laquelle nous utilisons le Béton bitumineux en couche de roulement, et cela à court terme. Mais à long terme plus d'un an on peut gagner par conséquent 9,5% par l'utilisation de BB.

III.6. Conclusion :

- Les avantages précités, tel que la durabilité (moins d'entretien) et la résistance du BCR, appuyés aussi par des études de formulation, de résistance et d'une évaluation économique

montre que le BCR est un matériau très convenable et rentable pour la construction et l'entretien des routes et des voies fortement sollicités.

- Le fait de réduire le dosage en ciment dans la fabrication du béton compacté au rouleau de la marge (12%-16%) à la marge (5%-11%), encourage les décideurs à choisir cette variante pour la construction des chaussées rigides surtout lorsqu'il s'agit des moyens économiques réduits.
- La résistance mécanique du BCR est fortement influencée par la faible quantité de pâte qui entoure les granulats et il reste aux gros granulats serrés du mélange de BCR à supporter les efforts en donnant lieu à des excellentes résistances mécaniques comparé aux cas des bétons conventionnels.

CHAPITRE IV : Caractérisation des matériaux utilisés et la formulation d'un BCR.

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour élaborer les mélanges de béton compacté au rouleau ont été rapportés, les étapes et la procédure utilisée pour la formulation de BCR ont été bien expliqués.

IV.2. Matériaux utilisés :

Les matériaux prélevés ont été soumis aux essais d'identification au sein du **laboratoire de développement de la construction (CDL) LAFARGE à ROUIBA**, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes Algériennes et Européennes. Les essais effectués sur les matériaux sont : analyse granulométrique, équivalent de sable, Bleu de méthylène, coefficient d'absorption d'eau, masses volumique (apparente et absolue), Los Angeles et les essais sur le ciment utilisé.

IV.2.1. Caractéristique du sable :

Nous avons utilisé dans ce travail un sable 0/4 de carrière Kef Azrou de LAFARGE qui situe à Mhir willaya de BORDJ BOU ARRERIDJ.

IV.2.1.1. Analyse granulométrique (NA 2607) lavage et tamisage :

L'essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise.

Le procédé adopté est le tamisage par lavage suivi du tamisage à sec selon la norme NA2607.

Dans cet essai on a utilisés les matériels suivant :



Figure IV.1 : Une balance hydrostatique et une série des tamis.



Figure IV.2 : Etuve à 105° C et bac rempli de sable 0/4.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/4 sont regroupés dans le tableau III.1 et la figure (III.4) ci-dessous :

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

Tableau IV.1 : Analyse granulométrique du sable 0/4 Kef Azrou.

Procédé utilisé : lavage et tamisage									Sable 0/4 Kef Azrou				
Masse sèche totale M1 = 1200 g													
Masse sèche après lavage M2 = 1045,1 g													
Masse sèche des fines retirée par lavage M1 – M2 = 154,9 g													
Tamis mm	8	6,3	4	13,15	2	1,6	1	0,5	0,315	0,25	0,125	0,063	FT
Poids de ret(g)	0	0	3	28	170	403	497	638	777	846	876	970	1040
ret%	0,00	0,00	0,25	2,33	14,7	33,8	41,2	53,7	64,75	70,50	73,00	80,83	86,67
passant%	100	100	99,75	97,67	83	66,2	58,8	46,3	35,25	29,50	27,00	19,17	13,33

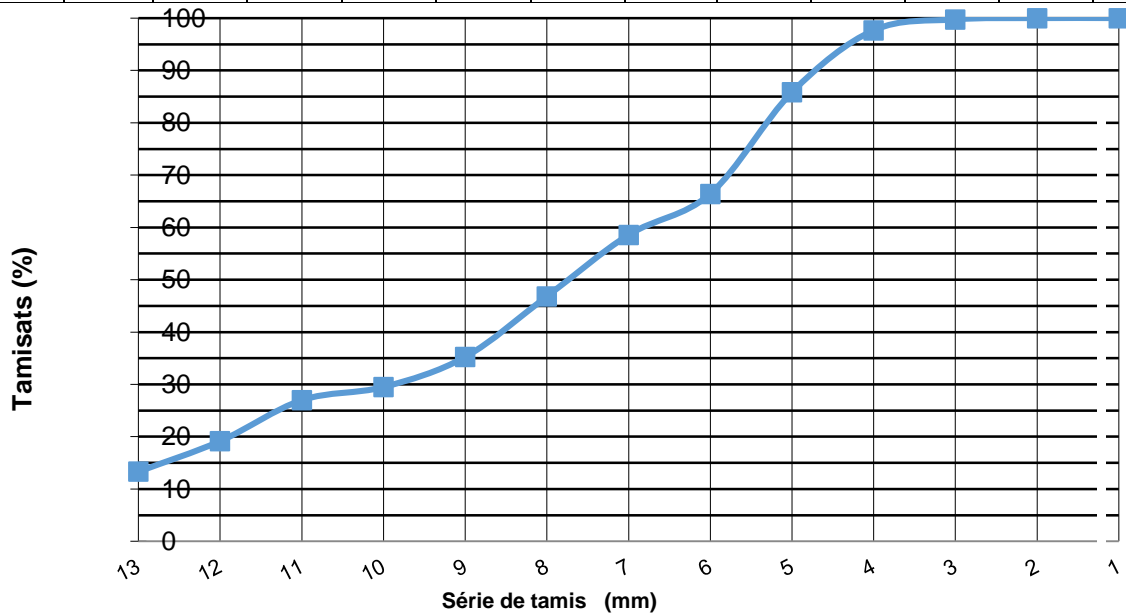


Figure IV.3 : L'analyse granulométrique du sable 0/4(Boussaâda).

IV.2.1.2. Module de finesse selon la norme (NA2607) :

Le module de finesse est calculé par la somme des refus sur les tamis (4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125) divisée par cent.

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, on trouve que la norme NA2607 donne la classification suivante :

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

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

On a obtenu pour le sable testé un module de finesse MF= 3.08, ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable.

MF > 2.5 C'est un sable Gros.

IV.2.1.3. Propreté « équivalent de sable » selon la norme (NA 455) :

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 NA 455 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai [23].

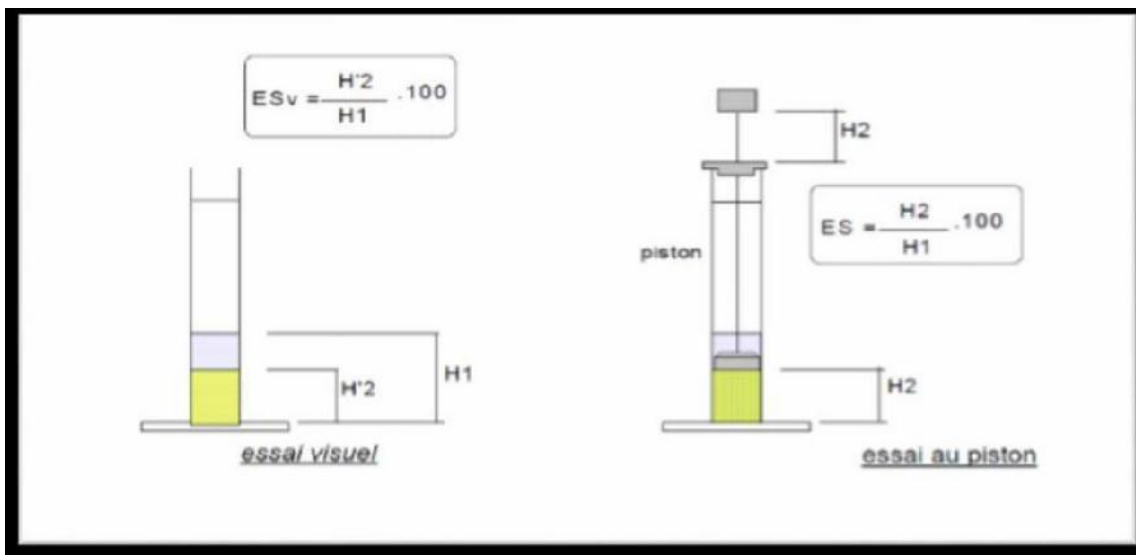


Figure IV.4 : Essais d'équivalent de sable.

Cet essai nécessite le matériel suivant :



Figure IV.5 : Diviseur échantillonneur du sable et une Machine d'agitation.

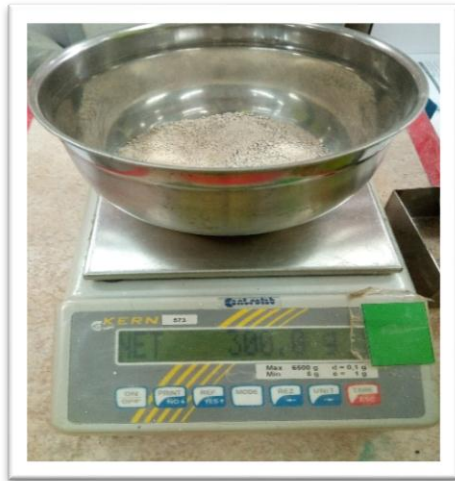


Figure IV.6 : Balance de pesé et deux Cylindre gradué.

- **Interprétation des résultats :**

Tableau IV.3 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable Esv et Esp.

Esv	Esp	Nature et qualité de sable
Es < 65	Es < 60	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < Es < 75	65 < Es < 70	Sable légèrement argileux : de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ Es ≤ 85	70 ≤ Es ≤ 80	Sable propre : à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
70 ≤ Es ≤ 80	Es ≥ 85	Sable très propre : l'absence totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau IV.4 : Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable 0/4 de Kef Azrou.

	1	2	3
Hauteur de l'échantillon h1 (mm)	13,1	11,7	11,9
Hauteur de sédiment h2 (mm)	6,8	6,1	6,5
Equivalent de sable (ES) % 100x (h2/h1)	51,91	52,14	54,62
ES Moyen	52,89		

Les essais réalisés ont montré que le sable 0/4 présent des faibles pourcentages de fines argileuses et par conséquent ils sont conclus convenables pour le BCR.

IV.2.1.4. Essai de bleu méthylène (NA 1984) :

Des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée.

Note : Une vérification de conformité en injectant en une seule fois la quantité spécifiée de bleu de méthylène peut être utilisée comme étape d'un procédé de contrôle de production.

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :

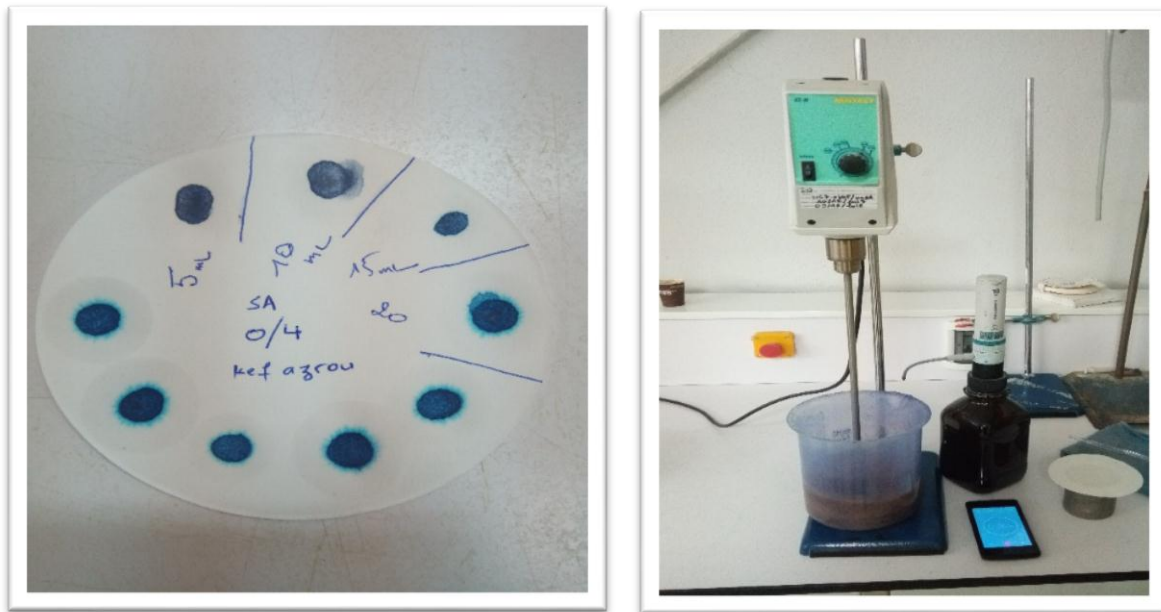


Figure IV.7 : Papier-filtre et un Agitateur à ailettes.

Les résultats de l'analyse sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Tableau des résultats de Bleu de Méthylène du sable 0/4 de Kafe Azrou.

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction inférieure à 2 mm en (g).	$M_1 = 300$
Quantité total de la solution de colorant ajoutée (ml).	$V_1 = 20$
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par Kg de grains de fraction 0/2mm.	$MB = (V_1 / M_1) \times 10 = 0,66$

IV.2.1.6. Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et Coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6) :

La masse volumique réelle se calcule à partir du rapport masse/volume. La masse se détermine en pesant la prise d'essai saturée surface sèche et de nouveau après séchage à l'étuve. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée soit par réduction du poids, selon la méthode du panier en treillis ou par pesée, selon la méthode au pycnomètre.

L'essai nécessite le matériel suivant :



Figure IV.8 : Balance hydrostatique et un thermomètre.



Figure IV.9 : un pycnomètre remplie de sable 0/4 un étuve ventilée.

Les résultats de l'analyse sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et coefficient d'absorption d'eau du sable 0/4

Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air : M1 (g)	1053,2
Masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés : M2 (g)	2251,5
Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement : M3 (g)	1575,9
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air : M4 (g)	1046
$\rho_a = \frac{M4}{(M4 - (M2 - M3))}$	2,82
$\rho_{rd} = \frac{M4}{(M1 - (M2 - M3))}$	2,77
$\rho_{ssd} = \frac{M1}{(M1 - (M2 - M3))}$	2,79
WA 24 = $\frac{(M1 - M4)}{M4} * 100$	0,69
Densité apparente : P/V	1,58

IV.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)**

IV.2.2.1. Analyse granulométrique lavage et tamisage (NA2607) :

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.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

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 : **$M > 0,2 D_{max}$** .

D_{max} : diamètre maximal du gros granulat en (mm).

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

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on des 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].

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.10 : étuve à 105°C et une Série des tamis.



Figure IV.11 : Bac remplie de gravier 3/8 de Kef Azrou et une Balance de pesé.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont regroupés dans les tableaux (III.7 ; III.8), Les courbes granulométriques de différentes fractions similaires utilisées sont tracés dans les figures (IV.12 ; IV.13) suivants :

Tableau IV.7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 de Kef Azrou.

Procédé utilisé : lavage et tamisage											Gravier 3/8 Kef Azrou		
Masse sèche totale M1 = 1700g													
Masse sèche après lavage M2 = 1678 g													
Masse sèche des fines retiré par lavage M1 – M2 = 22 g													
Tamis mm	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2,5	0,063	FT
Poids de ret (g)	0	0	0	0	0	0	0	70	676	1435	1657	1678	1678
ret%	0	0	0	0	0	0,00	0,00	4,12	39,76	84,41	97,47	98,71	98,71
passant%	100	100	100	100	100	100	100	95,88	60,24	15,59	2,53	1,29	1,29

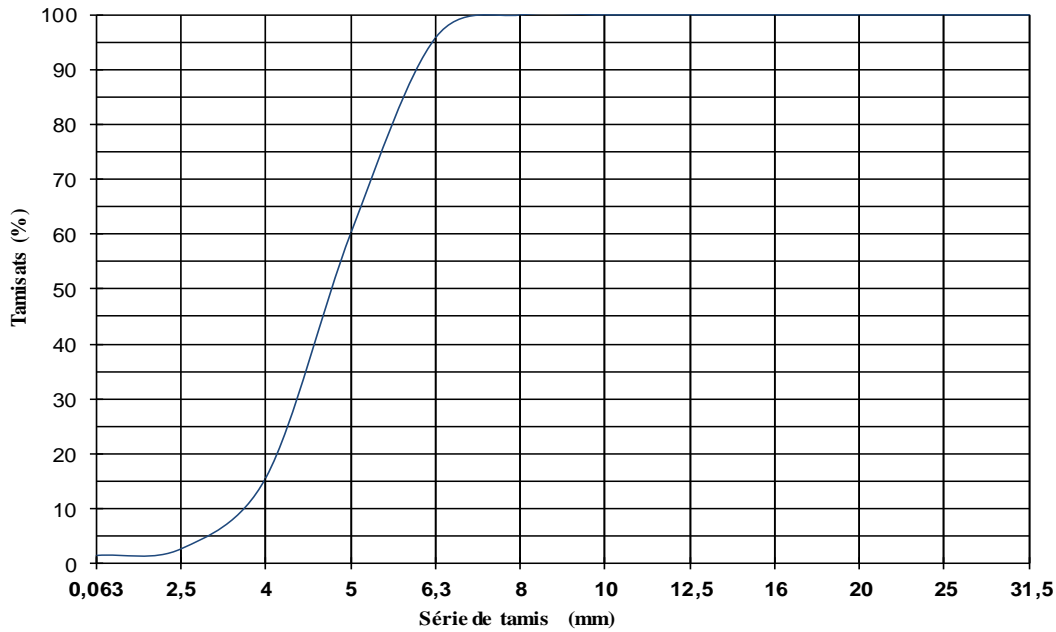


Figure VI.12 : L'analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tableau IV.8 : Analyse granulométrique du gravier 8/15 Kef Azrou.

Procédé utilisé : lavage et tamisage										Gravier 8/15 Kef Azrou			
Masse sèche totale M1 = 1700g													
Masse sèche après lavage M2 = 1678 g													
Masse sèche des fines retiré par lavage M1 – M2 = 22 g													
Tamis mm	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2,5	0,063	FT
Poids de ret (g)	0	0	0	117	776	1416	2126	2267				3145	3146
ret%	0	0	0	3,656	24,28	48,53	68,53	90,72				98,28	98,3
passant%	100	100	100	96,34	75,72	51,47	31,47	9				1,719	1,7

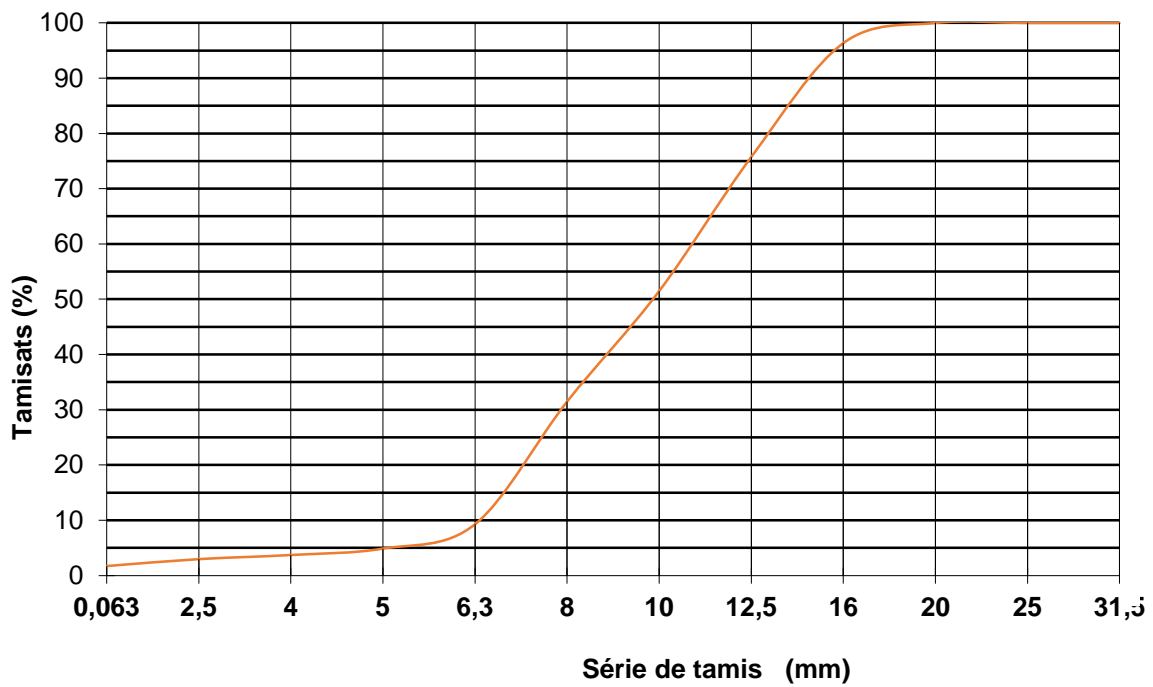


Figure IV.13 : L'analyse granulométrique du gravier 8/15.

IV.2.2.2.Coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3) :

L'essai consiste à effectuer un double tamisage. On fractionne l'échantillon au moyen de tamis en différents granulats élémentaires d_i/D_i , ensuite on fait tamiser chaque granulats élémentaires d_i/D_i , au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement $D_i/2$.

Cet essai nécessite le matériel suivant :



Figure IV.14 : Séries des grilles à fentes.



Figure IV.15 : Balance de pesés, bac et une grille a fente.

Les résultats sont regroupés dans les tableaux (III.9 ; III.10) suivants :

Tableau IV.9 : Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8.

Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille		
Granulat élémentaire di/Di	Masse (Ri) du granulat (g) élémentaire di/Di	Ecartement nominal de la grille (mm)	Passant sur une grille Mi (g)	Ai = Mi / Ri * 100
63 / 80		40		
50 / 63		31,5		
40 / 50		25		
31,5 / 40		20		
25 / 31,5		16		
20 / 25		12,5		
16 / 20		10		
12,5 / 16		8		

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

10 / 12,5	0	6,3	0	
8 / 10	4	5	0	0,00
6,3 / 8	329	4	11	3,34
5 / 6,3	641	3,15	56	8,74
4 / 5	520	2,5	58	11,15
M1 = $\sum R_i$ = 1494		M2 = $\sum M_i$ = 125		
A = M2 / M1 × 100 = 8,37				

IV.2.2.3. La masse volumique (NF EN 1097-6) :

La masse volumique réelle se calcule à partir du rapport masse/volume. La masse se détermine en pesant la prise d'essai saturée à surface sèche et de nouveau après séchage à l'étuve. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée soit par réduction du poids, selon la méthode du panier en treillis ou par pesée, selon la méthode au pycnomètre.

Cet essai nécessite le matériel suivant :

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

Tableau IV.10 : Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.

Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille		
Granulat élémentaire di/Di	Masse (Ri) du granulat (g) élémentaire di/Di	Ecartement nominal de la grille (mm)	Passant sur une grille Mi (g)	Ai = Mi / Ri * 100
63 / 80		40		
50 / 63		31,5		
40 / 50		25		
31,5 / 40		20		
25 / 31,5		16		
20 / 25	0	12,5	0	
16 / 20	117	10	0	0,00
12,5 / 16	660	8	51	7,73
10 / 12,5	776	6,3	57	7,35
8 / 10	640	5	77	12,03
6,3 / 8	710	4	70	9,86
5 / 6,3	141	3,15	12	8,51
4 / 5	37	2,5	2	
M1 = $\sum Ri = 3081$		M2 = $\sum Mi = 269$		
A = M2 / M1 × 100 = 8,73				



Figure IV.16 : Panier en treillis remplie de gravier 3/8 et une Balance hydrostatique.



Figure IV.17 : Chiffons absorbant, doux et secs et un Conteneur de 5 L et une Balance.



Figure IV.18 : Entonnoir sur trépied, un conteneur et un récipient.

Les résultats de l'essai sont regroupés dans les tableaux (III.11 ; III.12).

Tableau IV.11 : masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 3/8.

Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air : M1(g)	1002
Masse dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulats saturés : M2 (g)	1358,1
Masse dans l'eau du panier vide : M3(g)	752,1
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air : M4 (g)	991,6
La masse volumique de l'eau à la température enregistrée lorsque M2 a été déterminé, ρ_w	0,998
$\rho_a = \frac{M4}{(M4 - (M2 - M3))} * \rho_w$	2,57
$\rho_{rd} = \frac{M4}{(M1 - (M2 - M3))} * \rho_w$	2,50

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

$\rho_{ssd} =$	$M1 / (M1 - (M2 - M3)) * \rho_w$	2,53
WA 24 =	$((M1 - M4) / M4) * 100$ %	1,05
Densité apparente : P/V		0,21

Tableau IV.12 : masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 8/15.

Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air : M1 (g)	2022,3	
Masse dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulats saturés : M2 (g)	2009,7	
Masse dans l'eau du panier vide : M3 (g)	750	
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air : M4 (g)	1986,7	
La masse volumique de l'eau à la température enregistrée lorsque M2 a été déterminé, ρ_w	0,9991	
$\rho_a =$	$M4 / (M4 - (M2 - M3)) * \rho_w$	2,73
$\rho_{rd} =$	$M4 / (M1 - (M2 - M3)) * \rho_w$	2,60
$\rho_{ssd} =$	$M1 / (M1 - (M2 - M3)) * \rho_w$	2,65
WA 24 =	$((M1 - M4) / M4) * 100$ %	1,79
Densité apparente : P/V		1,46

IV.2.2.6. La résistance à la fragmentation par chocs, essai Los Angeles selon la norme (P 18-573) :

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.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes 4-6,3 mm ; 6,3-10 mm ; 10-14 mm ; 10-25 mm ; doit contenir 60 % de 10-16 mm ; la classe 16-31,5 mm 60 % de 16-25 mm et la classe 25-50 mm 60 % de 25-40 (mm).

La masse de la charge de boulets varie suivant les classes granulaires.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$100 \frac{m}{M}$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau (La).

L'essai nécessite le matériel suivant :

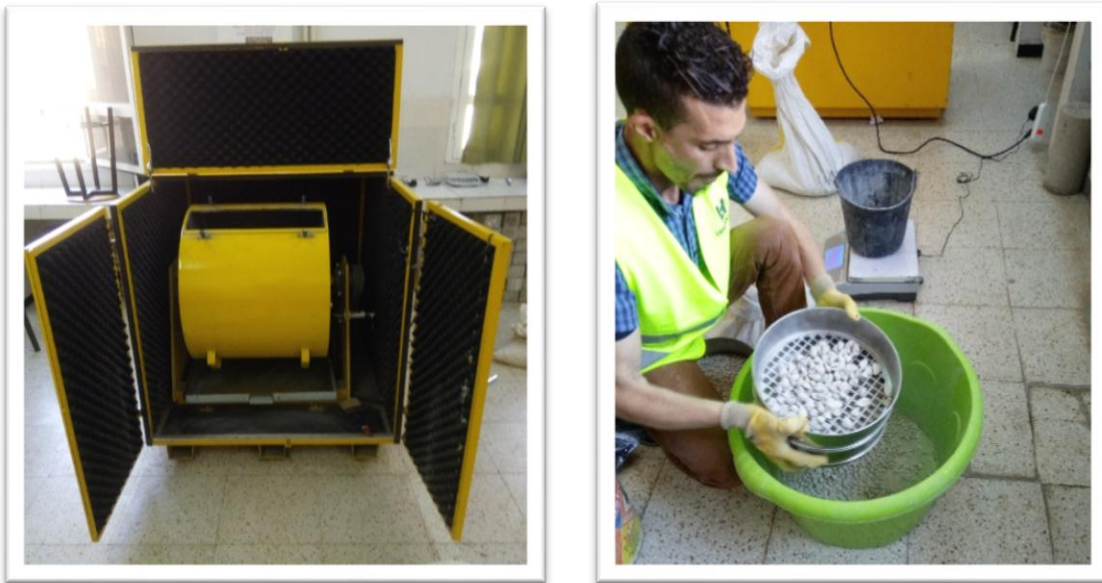


Figure IV.19 : Appareille de los Angeles, un Tamis et un récipient.



Figure IV.20 : Boulets d'acier et une Balance de pesé.

Tableau IV.13 : classe granulaires et les nombres de boulets correspondant.

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6,3	7	3080	+20
6,3 - 10	9	3960	a
10 - 14	11	4840	-150
10 - 25	11	4840	+20
16 - 31,5	12	5280	a
25 - 50	12	5280	-150

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Tableau IV.14 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.

Fraction de Gravier	Classe granulaire	Nombre des boules	M (Kg)	m (Kg)	Coef LA %
3/8	6,3 - 10	9	5	1,56	31,24 %
8/15	10 - 14	11	5	1,37	27,44 %

• Classification :

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

Tableau IV.15 : Classification des roche en fonction du coefficient LA.

Coefficient LA	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

❖ Commentaire :

- Le gravier (3/8) :c'est un gravier Mis dure (LA=31,24 %) / (LA entre 30à40),
- Le gravier (8/15) :c'est un gravier très dure (LA=27,44 %) / (LA entre 20 à 25).

IV.2.3. Caractéristiques du ciment utilisé (ciment matine CPJ -CEM II/B 42,5 R) :

Les ciments utilisés dans cette recherche sont des ciments portland composés (Matine) classe 42.5 R et Chamil 32,5 N qui présentent des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301194 provient de la cimenterie Lafarge de OGGAZE (MASCARA) pour matine et la cimenterie Lafarge de m'silla pour Chamil. Les essais sont réalisés selon les normes ci-dessous :

IV.2.3.1. Caractéristiques physiques :

IV.2.3.1.1.la consistance normale (EN 196-3) :

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT ».

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.21 : malaxeur normalisé et un Appareil de Vicat muni de sa Sonde de consistance.



Figure IV.22 : Bassin de conservation à 20°C.

IV.2.3.1.2. Le temps de prise (EN 196-3) :

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est l'appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

du moule telle que $d = 4\text{mm} (\pm 1\text{mm})$ on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « temps de début de prise ». Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 (mm).

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.23 : Malaxeur normalisé et un Appareil de Vicat manuel.



Figure IV.24 : Bassin de conservation à 20°C.

IV.2.3.1.3. La finesse (Blaine) (EN 196-6) :

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g . Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation sont élevée et plus ces résistances mécaniques à jeune âge sont grandes.

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.25 : Appareil de Blaine et une balance sensible.

IV.2.3.1.4. Définition du mortier normal (EN 196-1) :

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme EN 196-1. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 g (± 5 g). La composition du mortier à tester est la suivante :

- sable normalisé = 1350 g (± 5 g).
- ciment = 450 g.

- Eau de gâchage = 225 ml.

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.26 : Moules prismatique de $(4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3)$ et une Table à choc.



Figure IV.27 : Appareil de compression et de flexion et un Malaxeur automatique de mortier.

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

Les résultats de l'analyse sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.16 : Caractéristiques physique du ciment matine (CPJ -CEM II/B 42,5 R).

		Valeur	Unité
Consistance normale		27	%
La finesse (Blaine) (NA231)		5000	cm ³ /g
Temps de prise	début	160	min
	fin	235	
Résistance à la compression	2 jours	11,5	MPa
	28 jours	46	
Résistance à la flexion	2 jours	7,5	MPa
	28 jours	9,5	

IV.2.3.2. Définition du mortier normal (EN 196-1) avec substitution du ciment par des fillers calcaires :

Les mêmes étapes ont été réalisées, et les résultats de l'analyse sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.17 : .Caractéristiques physico-mécanique du mortier normalisé avec substitution des fillers calcaires.

		Valeur			Unité
La finesse (Blaine) (NA231)		5200			cm ³ /g
Pourcentage des FC		5% FC	10% FC	15% FC	%
Résistance à la compression	2 jours	18,90	13,91	13,78	MPa
	14 jours	38,59	33,83	31,81	
	28 jours	41,08	36,94	35,43	
Résistance à la flexion	2 jours	4,51	4,94	4,99	MPa
	14 jours	6,27	6,65	6,42	
	28 jours	7,30	6,50	6,19	

IV.2.3.3. Les caractéristiques minéralogiques du ciment matine (CPJ -CEM II/B 42,5 R) :

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

Donnée :

Tableau IV.18 : Les compositions minéralogiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R.

Eléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
Teneur %	59	14	6	100

IV.2.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ -CEM II/B 42,5 R (matine) :

Tableau III.19 : Les compositions chimiques du CPJ -CEM II/B 42,5 R (matine).

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O
Teneur %	20,5	4,75	62,72	3,75	1,90	1,98	0,09

IV.2.3.4. Caractéristiques du ciment utilisé (ciment Chamil CPJ -CEM II/B 32,5 N) :

Même étapes ont été réalisés sur le ciment Chamil (CPJ – CEM II/B 32,5 N)

IV.2.3.4.1. Caractéristiques physiques :

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau III.20 : Caractéristiques physique du CHMIL 32,5 N.

		Valeur	Unité
Consistance normale		28	%
La finesse (Blaine) (NA231)		4600	cm ³ /g
Temps de prise	début	162	min
	fin	260	
Résistance à la flexion	7 jours	6	MPa
	28 jours	7,5	
Résistance à la compression	7 jours	17	
	28 jours	35	

IV.2.3.4.2. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ-CHAMIL 32,5 N :

Selon la méthode de bogue, La composition minéralogique de ciment **CPJ-CHAMIL 32,5 N**

Donnée :

Tableau IV.21 : Les compositions minéralogiques du Chamil 32,5 N.

Eléments	C ₃ S	C ₃ A
Teneur %	61	8

IV.2.3.4.3. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CPJ 32,5 N (Chamil) :

Tableau IV.22 : Caractéristiques chimique du ciment utilisé (Chamil 32,5 N).

Eléments	Teneur %
Perte au feu (NA 5042)	14
Teneur en sulfates (SO ₃)	3
Teneur en oxyde de magnésium MgO	2
Teneur en chlorures	0,03

• La composition chimique des deux ciments est établie par laboratoire de cimenterie Lafarge de M'sila.

IV.2.3.5. Les caractéristique des fillers calcaire :

La gamme des carbonates de calcium (Filler calcaire) se caractérise par sa très grande blancheur et sa pureté chimique ses caractéristiques physico-chimiques lui permettent d'être utilisée dans toutes les applications industrielles de CaCO₃.

Dans notre étude nous avons utilisés des fillers calcaires commercialisé par Lafarge Holcim Algérie de 150 µ, et ses caractéristique physico-chimique sont montré dans l'annexe B.

IV.3. Formulation du BCR et procédures d'essais réalisés :

IV.3.1. Formulation du BCR :

IV.3.1.1. Fuseau granulométrique :

Après plusieurs essais réalisés au Laboratoire de Développement de la Construction (CDL) à Rouiba sur les différentes classes granulaires, un fuseau granulométrique a été choisi, comme le montre la figure suivante :

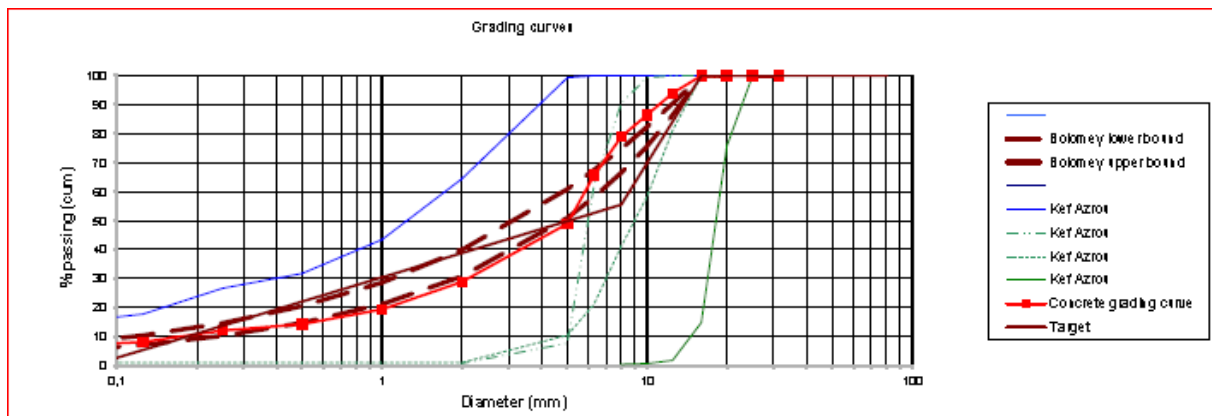


Figure IV.28 : fuseau granulométrique de BCR.

IV.3.1.2. La méthode de formulation de BCR :

On a procédé à la méthode de compacité, moins de pores, plus de compacité, plus de densité et plus de résistance, qui a été proposé par le responsable de CDL, et les étapes sont :

- Détermination de la densité optimale :

Dans notre étude on a utilisé le sable 0/4 et les graviers 3/8, 8/15.

- Premièrement on a pris les graviers 3/8 et 8/15, on sachant la densité réelle et absolue de chaque type de gravier la procédure suivis est montré dans le tableau suivant :

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux et formulation d'un BCR.

Tableau IV.23 : méthode de compacité.

essai	La quantité de gravier 3/8 en %	La quantité de gravier 8/15 en %	La densité
1	20	80	2,50
2	25	75	2,53
3	30	70	2,56
4	35	65	2,60
5	40	60	2,49

Après avoir une densité de 2,60 avec 35% de gravier 3/8 et 65% de gravier 8/15, on a mélangé avec le sable 0/4 avec la même procédure est les résultats sont montrés dans la figure suivante :

0,719192			%	FM	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063		
Q1		0																			
Q4	Kef Azrou	44	3,17		100	100	100	100	100	100	100	100	99,3	64,4	43,5	31,8	26,7	17,8	14,8		
3/8	Kef Azrou	24			100	100	100	100	100	99,3	90,6	61,9	7,8	0,8							
8/15	Kef Azrou	32			100	100	100	99,8	81,1	58,4	41,2	21,1	10,5	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
15/25	Kef Azrou	0			100	100	75,7	14,9	1,8	0,7	0,5										
100,00																					
Concrete grading curve					100	100	100	100	94	87	79	66	49	29	19	14	12	8	7		
Bolomey upper bound					100	100	100	100	90	82	75	67	61	40	29	21	15	10	7		

Figure IV.29 : Les quantités des granulats utilisés.

Le dosage du ciment, la quantité d'eau ont été proposé par laboratoire de LAFARGE comme le montre la figure suivante :

	Material	Source	Density	Absorption or Dry-extract	%/CEM	kg/m ³	l/m ³
A G G R E G A T E S	0/1		2,55	1,1			
	0/4	Kef Azrou	2,70	0,6		963	357
	3/8	Kef Azrou	2,66	1		517	194
	8/15	Kef Azrou	2,67	1,3		692	259
	15/25	Kef Azrou	2,67	0,8			
P A S T E	Matine 42,5	M'sila	3,06			240	78,4
	Limestone filler		2,70				
	Fly-ash		2,25				
	Slag		3,00				
	Silica fume		2,25				
	Total water – Water in admix		1	0,46		111	111
	Free water = Total water- Absorption		1	0,38		91	91,2
	Air content (%)				2		20
	Superplast		1,08	20	0		
	Retarder		1,06	30			
					2504	1000	

Figure IV.30 : tableau de gâchage de BCR.

IV.3.1.7. Confection et conservation des éprouvettes :

Cinquante-huit éprouvettes ont été confectionnées pour déterminer la résistance à la compression, la résistance à la traction par l'essai brésilien et le module d'élasticité.

Après finition, les moules sont recouverts par de la membrane plastique, ensuite après 24 heures, les éprouvettes sont démoulés et placés dans leurs environnements respectifs Jusqu'à l'âge d'écrasement qui est de 7 et 28j.

Le travail réalisé a été effectué en deux parties différentes :

1. Compactage avec Dame Proctor (16 éprouvettes ont été confectionnées).
 - Environnement I : une chambre de conservation a T = 35°C.
 - Environnement II : à l'air libre dans l'laboratoire a T = 20°C.
2. Compactage avec Marteau Vibrant :(42 éprouvettes ont été confectionnées).
 - A l'aire libre dans laboratoire a T = 20°C.



Figure IV.31 : Salle de conservation à 20°C, et une Salle de conservation à 30°C.



Figure IV.32 : Éprouvettes emballé par du plastique à l'aire libre.

IV.3.2.Méthode de confection par compactage utilisé :

Pour compacter le BCR au laboratoire on a utilisé deux mode défirent :

- Proctor modifié.
- Marteau vibrant.

IV.3.2.1. Méthode de confection par compactage au Proctor modifié (NF P 49 093) :

Le procédé de Proctor modifié qui correspond à une énergie de compactage assimilable à l'énergie donnée par un rouleau compacteur.

On a choisis un moule de (15x30 cm) qui correspond à un moule CBR pour le béton compacté au rouleau qui ressemble aux sols grossiers dont le diamètre des grains ne dépassant 20 (mm).



Figure IV.33 : Machine de Proctor modifié.

IV.3.2.2. Méthode de confection par compactage au marteau vibrant (NF EN 13286-51) :

Le compactage des éprouvettes de BCR se fait à l'aide d'un marteau vibrant C'est un appareil servant à compacter le BCR comme on peut le voir dans la figure III.34.

Le marteau vibrant est muni d'une plaque d'acier d'une superficie légèrement inférieure à celle du moule cylindrique ($\geq 0.6 D$) en acier, ayant un diamètre de(12,2) cm et de hauteur (40cm).

La mise en place du BCR se fait en cinq couches dans les moules préalablement huilés. Chaque couche de BCR est compactée jusqu'au refus une minute est suffisante. Après le compactage de la dernière couche, on a laissé environ 2 mm Pour égaliser la surface avec du ciment rouge, (Voir l'annexe A).



Figure IV.34 : Marteau vibrant et Les tige de compactage.

IV.3.3. surfaçage des éprouvettes :

IV.3.3.1. surfaçage des éprouvettes avec la machine :

Les éprouvettes des BCR ont été surfacées pour rendre leurs bases planes et perpendiculaires par rapport à la hauteur. Cette planéité a été obtenue à l'aide de la machine de surfaçage. Une des bases du cylindre est bloquée dans un moule par des vérins. L'ensemble moule plus éprouvette tourne en rotation à une vitesse constante. Au côté opposé du moule, une meule au diamant perpendiculaire à l'axe du cylindre et tournant aussi en rotation scie progressivement l'autre face du cylindre la rendant lisse et orthogonale par rapport à la hauteur, comme le montre la figure suivante :



Figure IV.35 : Rectifieuse à éprouvette modèle Duo-MATIC.

IV.3.3.2. surfacage des éprouvettes à l'aide du ciment rouge :

Comme le surfacage avec la machine n'a pas été convenable pour le BCR, on a procédé à un autre mode de surfacage à l'aide de ciment rouge, comme la montre la figure suivant :



Figure IV.36 : Surfacage des éprouvettes.

IV.3.4.Procédures d'essais réalisés :

IV.3.4.1.Essais sur le béton frais :

IV.3.4.1.1.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 IV.37 : Mesure de la masse volumique du BCR à l'état frais.

IV.3.4.2. 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 28) jours.

IV.3.4.2.1. La masse volumique sur béton durci (NF EN 12390-7) :

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

C'est-à-dire : $\rho = M/V$.

La masse volumique exprimée en kg/dm^3 car la densité.



Figure III.38 : Mesure de la masse volumique du BCR à l'état durci.

IV.3.2.2.2. 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.

Cet essai est réalisé à 7 et 28 jours avec le matériel suivant



Figure IV.39 : la presse hydraulique.

IV.2.2.3. Le module d'élasticité du BCR (module de YOUNG) :

Le module d'élasticité ou module de Young caractérise la rigidité du matériau c'est-à-dire la propriété de se déformer de façon élastique, réversible sous l'action d'une charge.

Elle est influencée par la propriété de la pâte de ciment hydratée ainsi que celle des granulats.

Le module d'élasticité moyen du BCR est de l'ordre de 30 GPa après 28 jours de mûrissement est indépendant des variations de température contrairement au béton bitumineux.

L'essai est réalisé avec trois mélange de BCR (0%FC, 10%FC et 15%FC) a 28 jours.

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.40 : Extensomètre, presse hydraulique et un PC.

IV.2.2.4. La résistance à la traction par fendage (NF.P 18 408) :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$F_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

F_{tj} : résistance à la traction.

J : Age du béton (jours).

D : diamètre du cylindre.

L : longueur du cylindre.

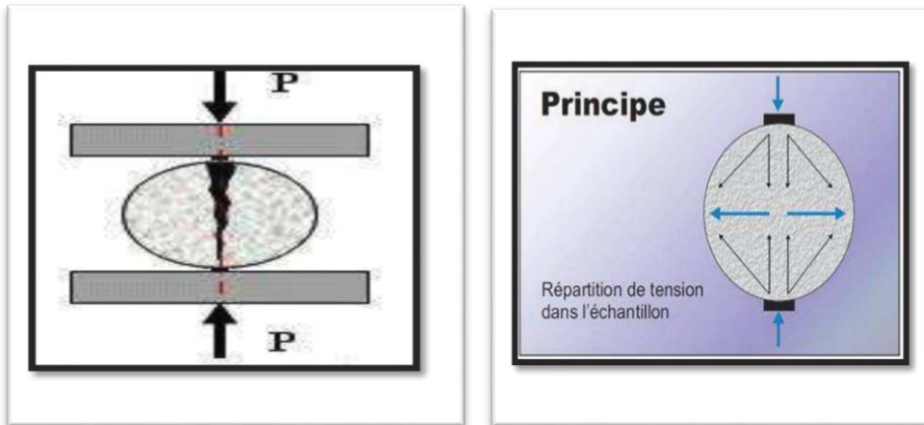


Figure IV.41 : Essai de traction par fendage.

Dans cet essai on a utilisés le matériel suivant :



Figure IV.42 : Une éprouvette soumise à l'essai de fendage et un Dispositif de Fendage.

IV.3.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 physique et mécaniques nécessaire pour entamer le programme expérimental.

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction :

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

V.2. Formulation de BCR en substituant le ciment par les fillers calcaires (compactage Proctor modifié) :

En plus de différents pourcentages des fillers incorporé (remplaçant le ciment), dans cette partie nous avons étudié deux conditions d'environnements, et effectués des essais de compression et mesure des densités.

A) L'environnement de conservation à 20°C :

Les densités obtenues à 24 heures à 7j et 28j, sont résumées dans le tableau IV.1 et représenté par la figure IV.1 ci-dessous :

Tableau IV.1 : Densité de BCR à base de fillers calcaire en fonction de jours.

Environnement I : T=20°C																
moyen de compactage « Proctor modifié »																
Filler (%)	0				5				10				15			
Age (jours)	0	2	7	28	0	2	7	28	0	2	7	28	0	2	7	28
Densité	2,39	2,31	2,27	2,25	2,34	2,31	2,27	2,25	2,39	2,37	2,36	2,34	2,35	2,33	2,32	2,30

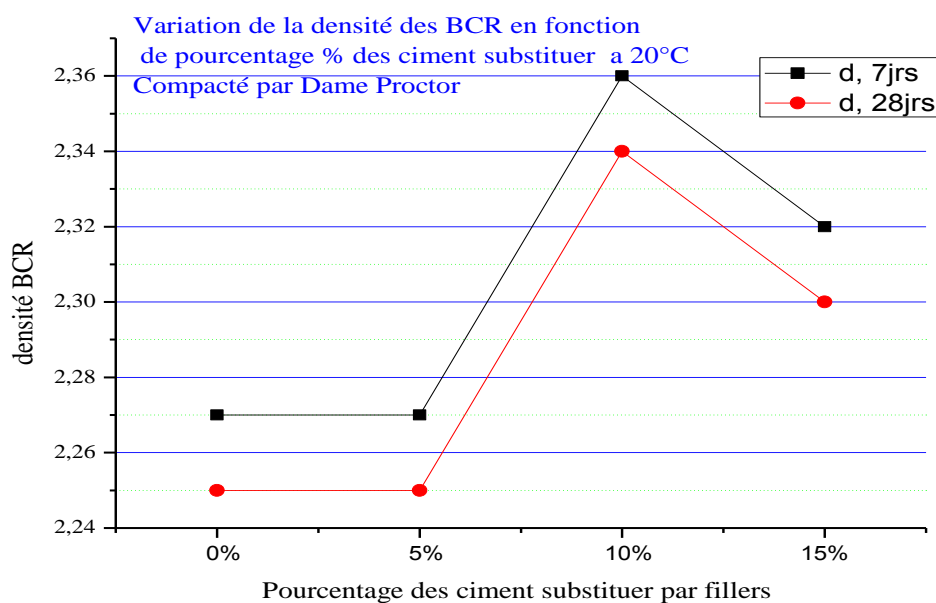


Figure V.1 : Densité des BCR en fonction du ciment substitué par fillers calcaire.

De la figure V.1, on remarque que les BCR avec (0% et 5%) FC ont la même densité (2,27), une augmentation a été notée pour le BCR avec 10% FC, cependant elle diminue pour la substitution de 15% FC, ces résultats peuvent être expliqués par :

- Le dosage optimal à substituer est de 10 % FC, cet optimum est dépendant de la nature de ciment, la granulométrie ainsi que finesse du filler.
- L'augmentation de la densité pour le BCR avec 10% FC, cela peut s'expliquer par l'incorporation des FC qui densifie la matrice cimentaire, au-delà de 10% FC la densité diminue, ce dernier peut s'expliquer par L'excès de FC dans le BCR, (excès des fines) provoque le ressuage (matelassage) donc une difficulté de compactage (collage de mélange avec la dame).
- À 28 jours on constate que la densité diminue avec une faible quantité dans les différents pourcentages par rapport à 7 jours, cela peut être expliqué par l'évaporation de l'eau libre qui n'a pas participé à la réaction d'hydratation, c'est l'effet de cure.

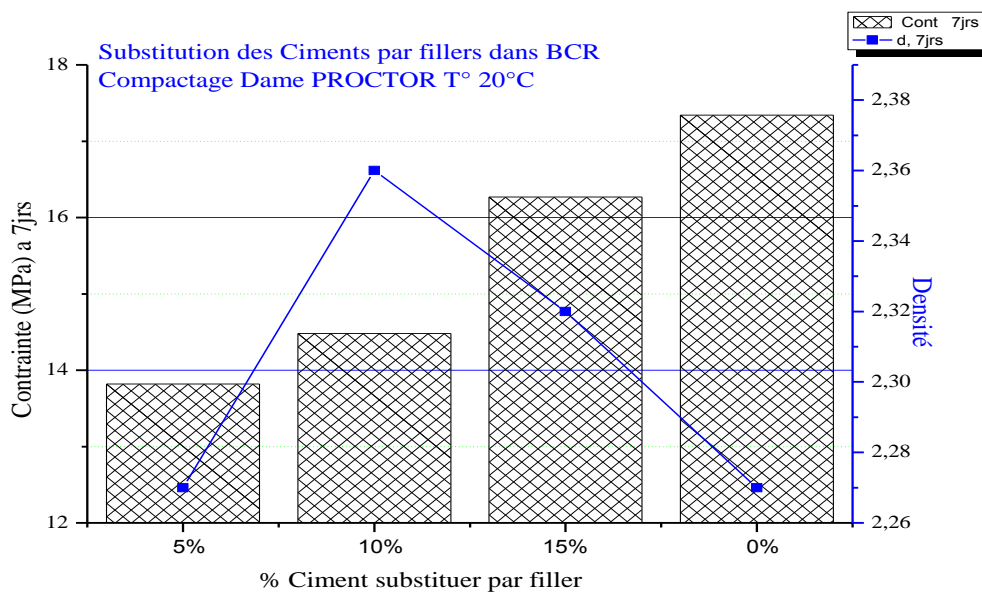


Figure V.2 : Résistance à la compression des BCR à base des fillers calcaires et densité à 7 jours.

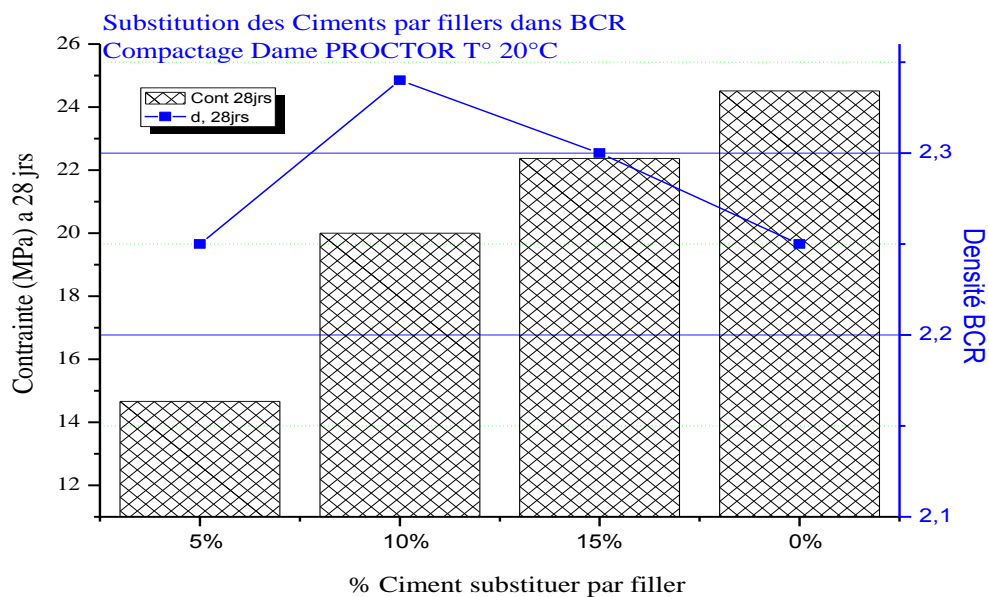


Figure V.3 : Résistance à la compression des BCR à base des fillers calcaires et densité à 28 jours.

De la figure (V.2 et V.3), on remarque une diminution de la résistance à la compression du BCR à base de fillers par rapport au béton témoin.

- La densité du BCR sans filler est identique au BCR avec 5% de filler, tandis que la résistance à la compression du béton sans filler est plus élevée par rapport à la résistance avec 5% de filler.
- La différence de la résistance à la compression des bétons sans filler par rapport aux béton avec filler peut-être expliqué par la quantité des CSH développée dans les bétons sans filler, autrement dit, il y'a plus de composant actif qui est en l'occurrence, le ciment, tandis que le filler est un ajout inerte.
- On constate aussi une évolution des résistances à 28 jours par rapport à 7 jours, cela est dû à l'hydratation complète des grains de ciment à 28 jours, ce qui engendre une formation importante des cristaux de CSH qui sont responsable sur les résistances mécaniques du béton.

B) L'environnement de conservation à 35°C :

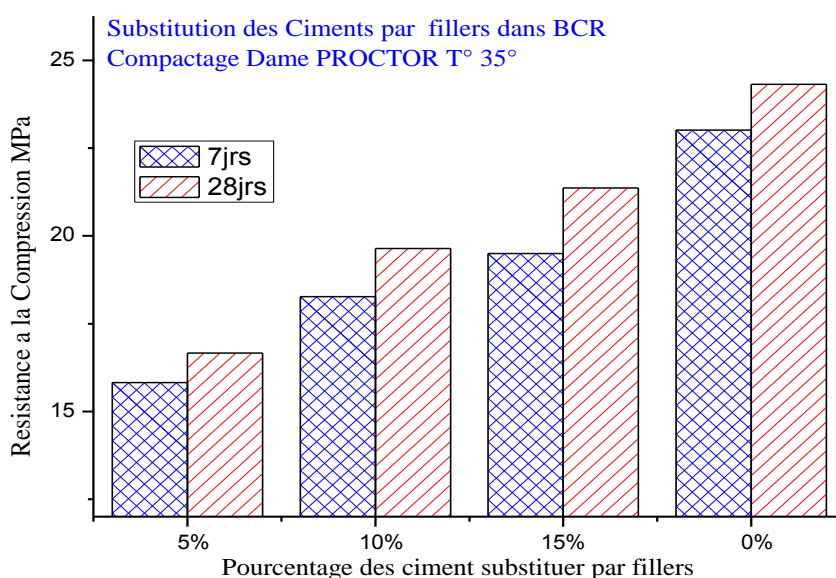


Figure V.4 : Résistance à la compression des BCR à base des fillers calcaires en fonction de l'âge.

A 35°C, on remarque que la résistance a la compression augmente rapidement comparé au résultats obtenues à 20°C à 7 jours, cela s'explique par l'effet de la tempereure qui joue un role d'un catalyseur ce qui booste les résistances à jeune âge et ça grace à la formaton rapide des cristeaux (CSH).

Tableau V.2 : L'effet de l'environnement de conservation sur la densité de « BCR ».

Environnement II : T= 35 °C																
Outils de compactage « Proctor modifié »																
Filler (%)	0				5				10				15			
Age (jours)	0	2	7	28	0	2	7	28	0	2	7	28	0	2	7	28
Densité	2,39	2,35	2,29	2,27	2,34	2,25	2,23	2,21	2,36	2,34	2,32	2,30	2,35	2,33	2,31	2,29

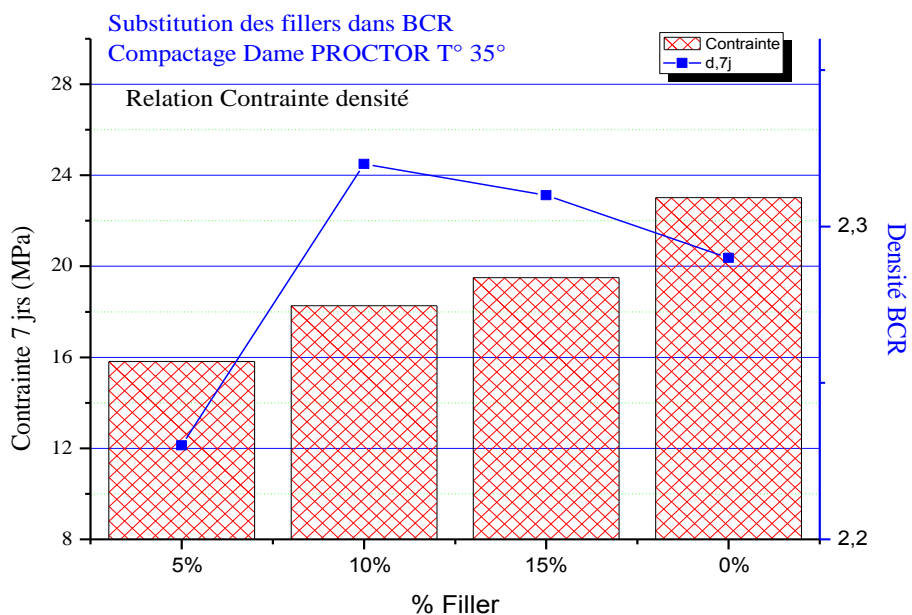


Figure V.5 : L'effet de l'environnement de conservation sur la densité de BCR à 7 jours.

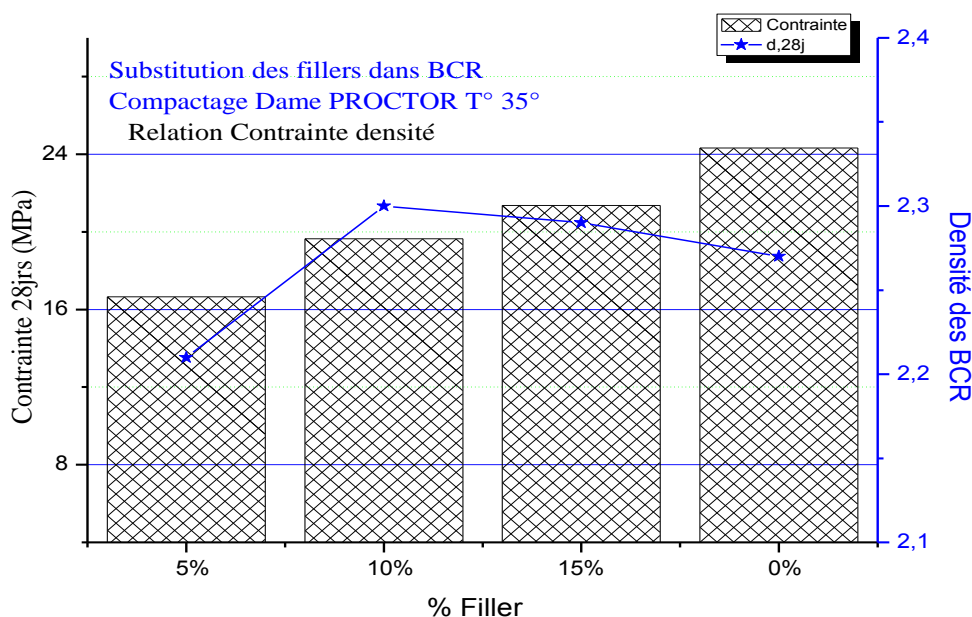


Figure V.6 : L'effet de l'environnement de conservation sur la densité de BCR à 28 jours.

D'après ces résultats, une légère diminution des densités est constatée pour les différents types des BCR avec filler calcaire en fonction de temps, pour les différentes températures, ($T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$ et $T^{\circ} = 35^{\circ}$), tandis que la diminution de la densité est remarquable pour $T^{\circ} = 35^{\circ}\text{C}$, ceci peut être expliqué par le taux d'évaporation d'eau dans le BCR dans le climat à ($T = 35^{\circ}\text{C}$).

V.3.Effet de l'énergie de compactage de BCR :

Après plusieurs investigations et recherches sur le compactage, nous avons opté pour un autre moyen de compactage (**marteau vibrant**) afin d'augmenter et de faciliter le compactage (voir annexe A).

Cette partie est réalisée uniquement à l'âge de 7 jours.

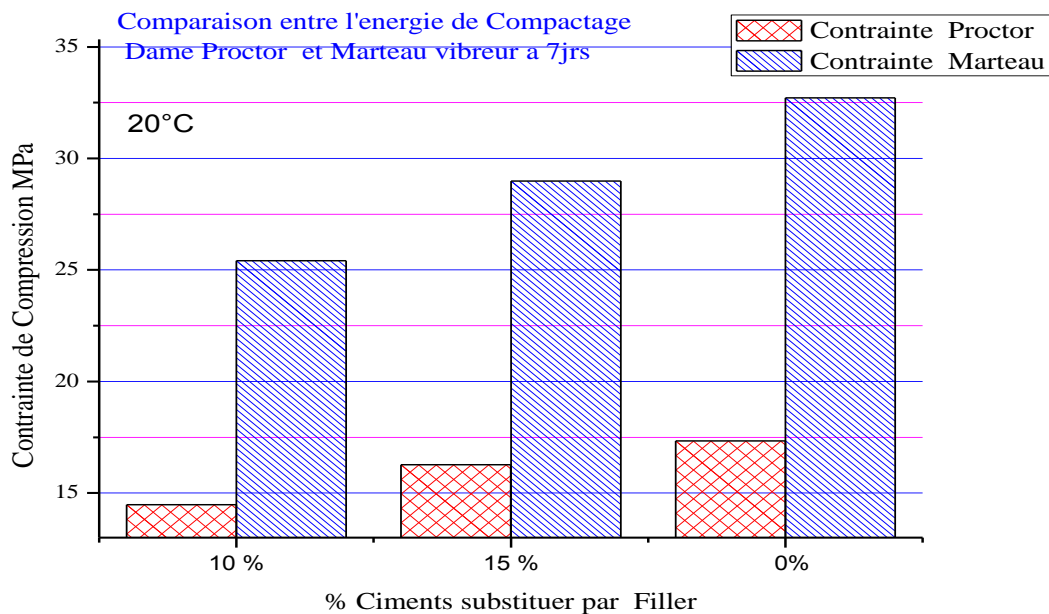


Figure V.7 : L'effet du moyen de compactage sur les BCR à base des fillers calcaire sur la résistance à la compression.

En comparant les deux méthodes de compactage, on constate que avec Proctor modifié, l'incorporation des fillers a impacté négativement les performances mécaniques du BCR, ce qui est le contraire avec l'utilisation du marteau vibrant qui nous a permis d'avoir des densités élevées et donc des résistances élevées comme le montre la figure IV.7, cela peut être expliqué par :

Les fillers densifient la matrice, donc ça demande une énergie importante pour les compacter.

Dans notre cas, pour avoir un bon compactage il faut :

- Un squelette compacte qui représente moins de pores.
- L'incorporation des ajouts cimentaire comme le cas des fillers.
- Énergie de compactage optimale.

En conclusion de cette partie de travail, une décision a été prise :

L'utilisation de marteau vibrant pour la suite des essais et cela a fin de minimiser des difficultés de compactage et améliorer la densité et augmenter les performances mécaniques.

V.4.L'effet du dosage en ciment :

Un autre point d'économie de ciment nous a été proposé, c'est bien d'utiliser le ciment dosé à 240 kg/m^3 au lieu de 280 kg/m^3 . Dans cette partie l'énergie de compactage utilisée est le marteau vibrant.

Les résultats obtenus après avoir écrasé les éprouvettes à l'âge de 7j et 28j sont résumés dans la figure IV.8 ci-dessous :

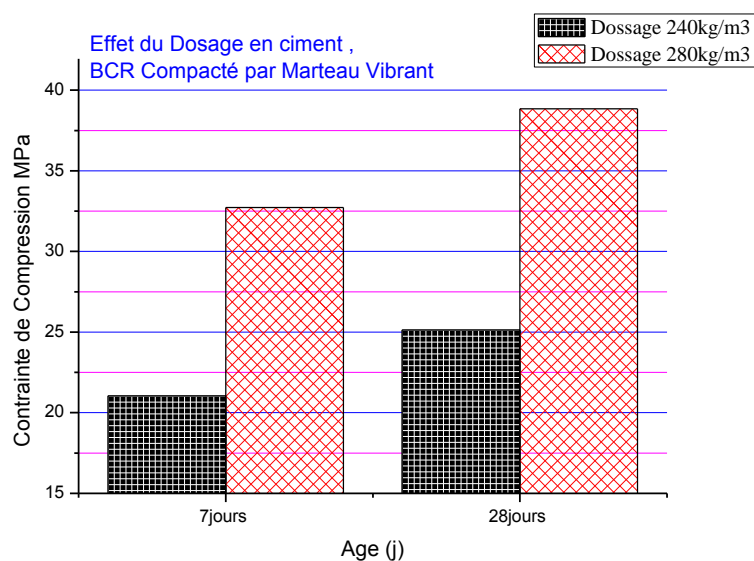


Figure V.8 : Effet du dosage en ciment sur la résistance à la compression.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression est très élevée à un dosage de 280 Kg/m^3 par rapport au dosage de 240 Kg/m^3 de BCR, pour un dosage en eau constant.

Ceci s'explique par l'augmentation du dosage en ciment du BCR aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C du BCR, ce qui traduira nécessairement par une augmentation de la résistance.

Et malgré le faible dosage (240 kg/m^3) de BCR les résultats obtenus reste conforme aux exigences techniques de laboratoire de Lafarge.

En changeant le dosage en ciment la résistance obtenue est conforme aux exigences de demandé par (CDL). Cela grâce à l'utilisation de nouveau outille de compactage qu'on a modifié.

V.5. Les BCR à base des fillers calcaires compacté par marteau vibrant :

a) Résistance à la Compression :

Les résultats obtenus après avoir écraser les éprouvettes à l'âge de 7j et 28j sont représentée dans la figure IV.10 ci-dessous :

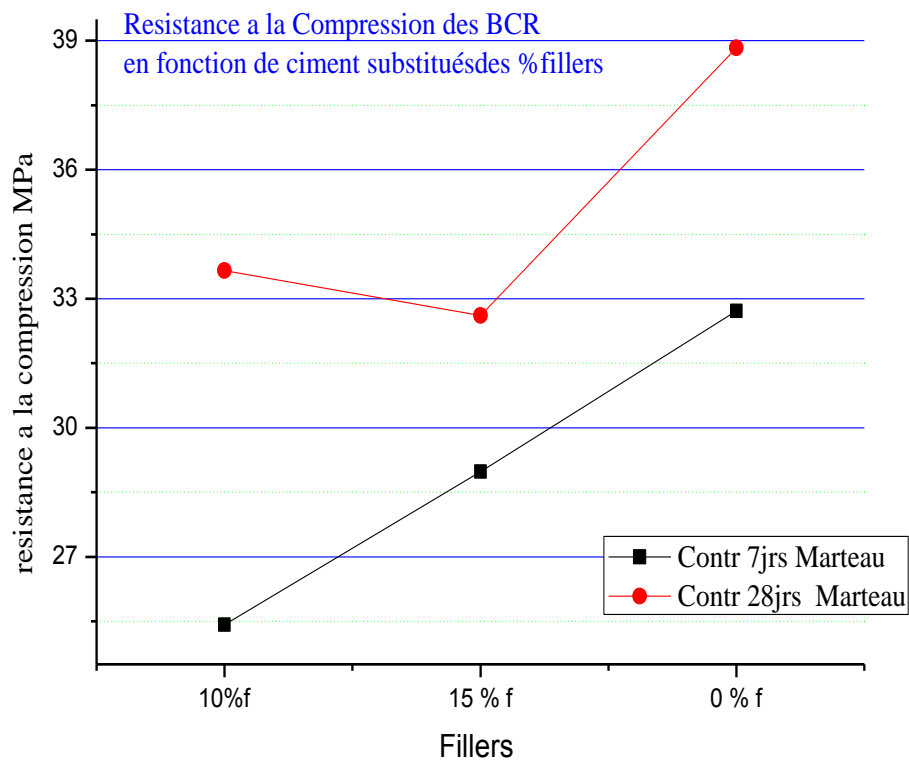


Figure V.9 : Résistance à la compression de BCR à base des FC.

À 7 jours :

Les résistances de BCR avec FC augmentent régulièrement en fonction de pourcentage de FC substitué, cela peut être attribué à l'effet de FC qui densifient la matrice ce qui implique l'augmentation de la résistance à jeune âge.

À 28 jours :

On remarque que l'évolution de la résistance à la compression des BCR avec FC indique que le béton contenant 10% FC présente des résultats élevés par rapport au béton avec 15% FC, ceci est dû essentiellement aux caractéristiques des fillers calcaires qui forment un noyau où se cristallise tout autour la portlandite. Par conséquent, provoquer une accélération de l'hydratation des grains de ciment.

Cependant, le béton contenant 15% FC accordent une moindre résistance par rapport au béton témoin et 10% FC, ceci s'explique par l'excès de FC qui joue un rôle inverse de phénomène (le ressuage).

L'évolution des résistances en fonction de l'âge montre que pendant 7 jours, les résistances sont faibles pour tous bétons, tandis qu'à 28 jours, les résistances augmentent remarquablement, cela s'explique par la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et le rôle physico-chimique des FC.

b) Le module d'élasticité du BCR (module de YOUNG) :

Le module d'élasticité ou module de Young caractérise la rigidité du matériau c'est-à-dire la propriété de se déformer de façon élastique, réversible sous l'action d'une charge.

Elle est influencée par la propriété de la pâte de ciment hydratée ainsi que celle des granulats.

Le module d'élasticité moyen du BCR est de l'ordre de 30 GPa après 28 jours de mûrissement est indépendant des variations de température contrairement au béton bitumineux.

Les résultats de l'analyse sont regroupés dans les figures et le tableau suivant :

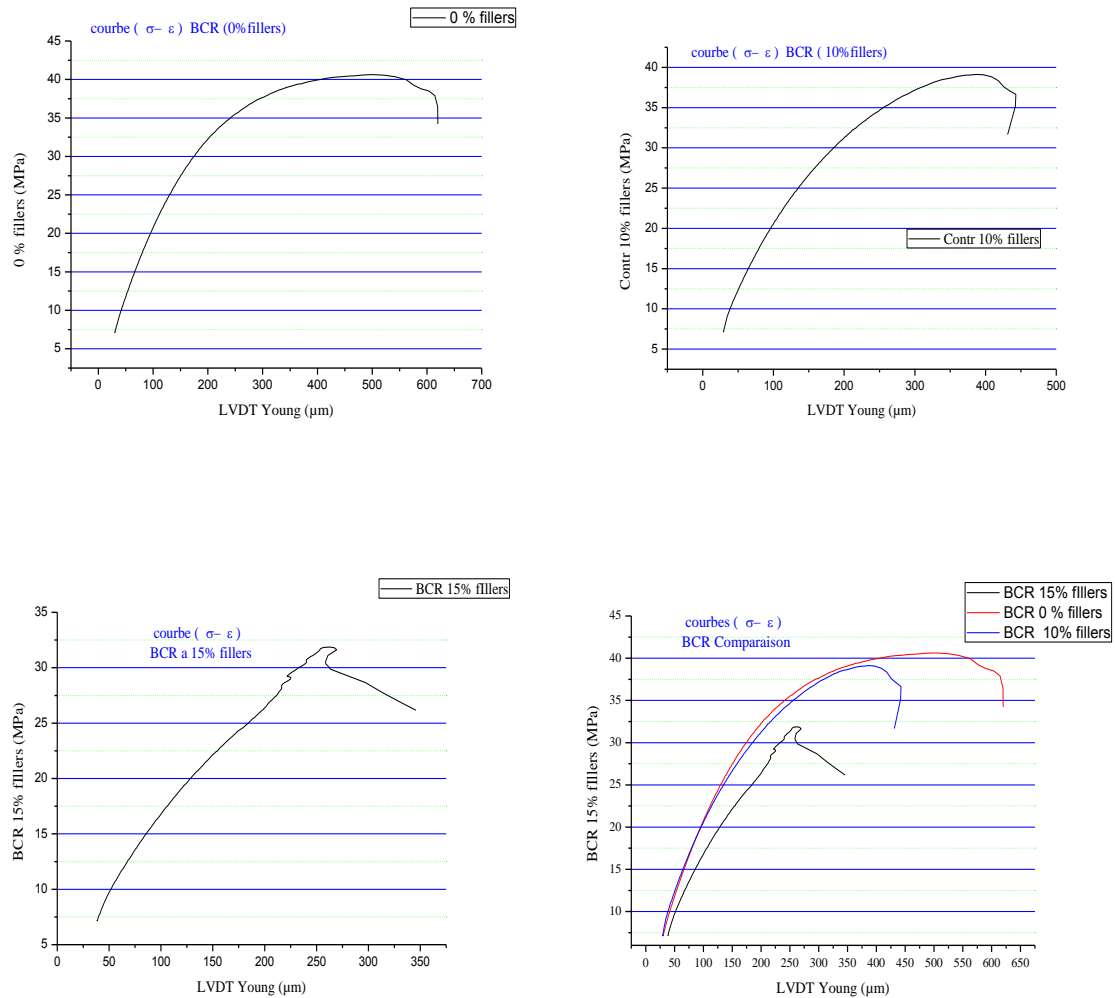


Figure V.10 : Module d'élasticité des BCR avec filler calcaire.

Dans notre cas, afin de faire une comparaison entre le comportement des BCR, (effet de substitution de ciment par filler calcaire à différentes phases, et le point de rupture), nous avons opté pour une charge de 3000kN, et une vitesse de 0,5MP/s.

De la figure on remarque que la courbe de BCR avec 10% FC a une pente élevée comparé aux autres BCR, ce qui est confirmé dans le calcul de module de Young, ceci s'explique par le rôle de FC qui a amélioré la ductilité de BCR, au-delà de 10% FC, les FC ont un effet inverse voir la courbe de BCR avec 15% FC.

A la fin de la partie rectiligne jusqu'au point de rupture le BCR avec 10% FC converge vers le même comportement que le BCR sans FC.

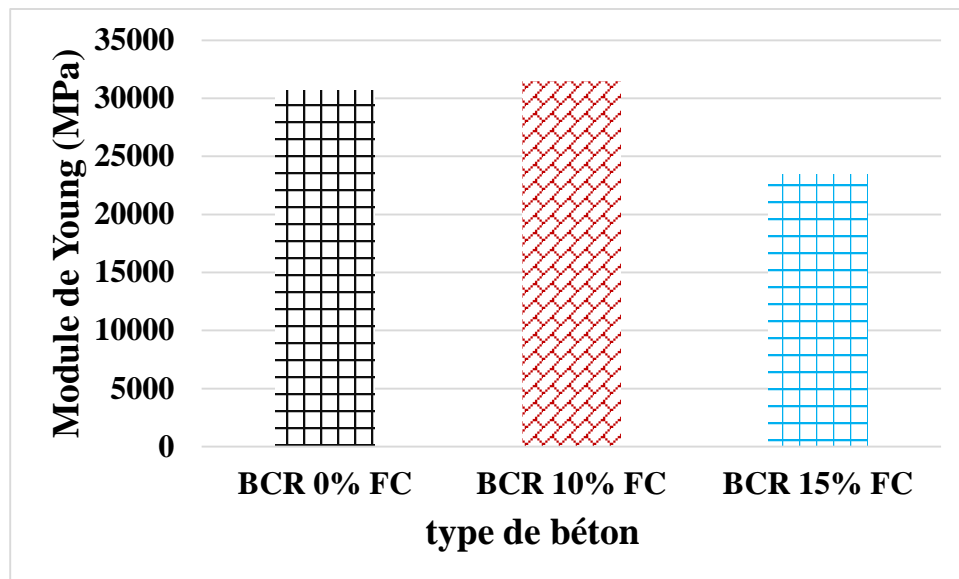


Figure V.11 : l'effet des filler calcaire dans le BCR sur la variation de module de Young.

D'après l'histogramme une comparaison des tests en compression avec l'extensomètre, on constate que le module de Young est influencé par le pourcentage de FC dans le BCR. La rigidité de BCR avec 10% FC est nettement supérieure comparée aux BCR (0% et 15%) FC.

En effet c'est le BCR qui présente le module d'élasticité le plus important, qui sera plus résistant à la fissuration et c'est le cas de BCR avec 10% FC, contrairement au BCR avec 15% FC, ce dernier son aptitude à se déformer sera plus élevé.

c) La résistance à la traction par fendage (essai brésilien) (NF.P 18-408) :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$F_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

F_{tj} : résistance à la traction.

D : diamètre de l'éprouvette.

L : longueur de l'éprouvette.

P : Charge maximale de compression

Les résultats sont obtenus après avoir mesuré trois éprouvettes et on a pris la moyenne comme le montre la figure et le tableau suivant :

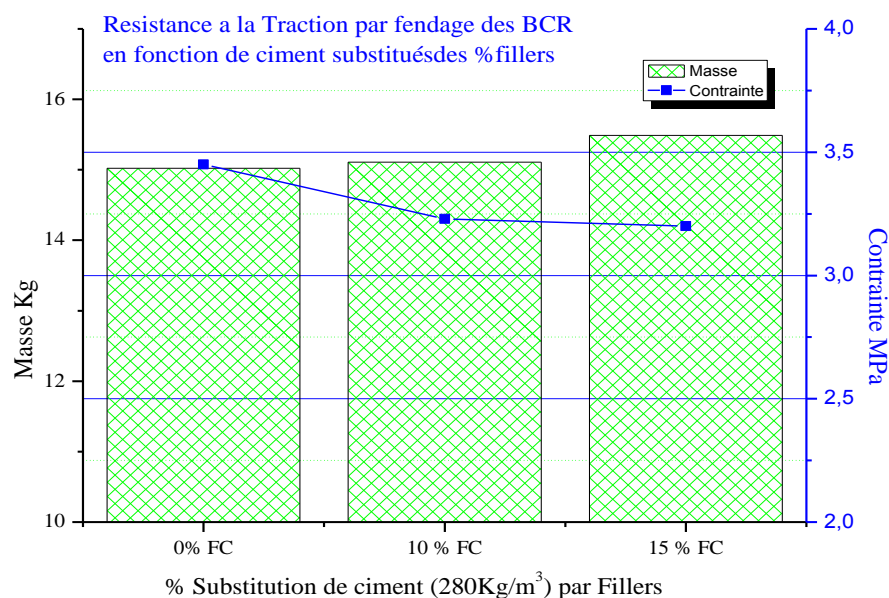


Figure 12 : Résistance à la traction par fendage des BCR en fonction de ciment substitué par des FC.

De la figure on remarque que la résistance à la traction par fendage de BCR sans fillers calcaires est sensiblement supérieure comparée aux résistances à la traction par fendage des BCR à base de fillers calcaires.

En comparant la résistance à la traction par fendage dans les BCR avec filler calcaire, on constate, une légère stagnation a été constatée avec un taux de 1% de différence en comparant avec le BCR témoin.

Cela est dû probablement à la l'adhérence mortier gravier inter granulaires et inter couche qui devient meilleure, grâce à l'effet des FC qui densifient le squelette granulaire.

Le manque de liant hydraulique (ciment) qui joue le rôle d'une colle dans le squelette béton a été compensé par l'énergie et le mode de compactage dans les BCR à base des fillers calcaires.

V.6.Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de comparer l'effet de substitution de ciment par les fillers calcaires sur le BCR. Ainsi que le comportement physico-mécanique de BCR

Les conclusions qui peuvent être tirées sont :

- La substitution de ciment par le filler calcaire a amélioré le module de Young avec 10% FC.
- Les fillers calcaires ont amélioré les densités de BCR.
- Les résistances mécaniques de notre BCR restent conformes aux exigences en vigueur.
- Le BCR avec 10% FC est plus résistant à la fissuration

Référence bibliographique

Référence bibliographique :

[1] M. ZDIRI, M. ben ouezdou, j. neji - le BCR a faible dosage en ciment, une solution pour le renforcement des voies fortement sollicitées. Cas des matériaux de gisements locaux. Proceeding du congrès international urbistique, urbistics 2008, Hamamet Tunisie, 2008 ,9p.

[2]ZDIRI, Mostapha. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR) : Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux. Thèse de doctorat : Génie Civil : L'Université de Tunis El Manar (Tunisie) .L'Université d'Artois (France) .L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2008,244 p.

[3] GOUBET André. Béton compacté au rouleau. Revue française de géotechnique, 53 p.

[4]ZDIRI, Mostapha. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR) : Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux. Thèse de doctorat : Génie Civil : L'Université de Tunis El Manar (Tunisie) .L'Université d'Artois (France) .L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2008,244 p.

[5]ZENAGUI S'affia. L'utilisation du BCR pour la conception des petits barrages. Mémoire de projet de fin d'études master : Hydraulique, Tlemcen : Université Abou Bekr BELKAID, 2016,152p.

[6]ND1AYE, Diawoye, SALL, Aboubakry. Conception, formulation et mise en œuvre d'un béton compacte au rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées : application au tronçon Diamniadio-Mbour : Université Cheikh AntaDiop de Dakar, 2007,109 p.

[7]ZENAGUI Safia. L'utilisation du BCR pour la conception des petits barrages. Mémoire de projet de fin d'études master : Hydraulique, Tlemcen : Université Abou Bekr BELKAID, 2016,152 p.

[8] R. Karsten, H. Otmar, revêtements routiers en béton compacté au rouleau : expériences Faites en Allemagne 2006.

[9] GUIRAUD, H., P IGEON, 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>.

Référence bibliographique

- [12]Belaïd M., Photos de Barrage en Tunisie Communication personnelle, Tunisie.
- [13]Site Web de ciment de Québec, <https://www.BCR.CC.html>
- [14] ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- [15] OTSAMA MBA Jean Paul. Contribution à l'étude de l'influence des matériaux fins sur les propriétés rhéologique et mécanique du béton compacté au rouleau pour barrages. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées : Génie civil. SHERBROOKE (Québec), Canada : Université De SHERBROOKE ,1997 ,126.
- [16] 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 (ACRGTO). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- [17] Tremblay, S., 1997. Méthodes de Formulation de Bétons Compactés au Rouleau et Effet des Agents Entraîneur D'air Sur La Maniabilité. Université de Laval.
- [18] 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.
- [19]SAADAOUI Othman. Amélioration de la performance d'un béton routier caoutchouteux. Master matériaux : Génie Civil. M'sila : Université Mohamed Boudiaf, 2016, 99p.
- [20] BOMBLED J-P, « Rhéologie des mortiers et des bétons frais, influence du facteur ciment », Proceeding of RILEM, Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, P.1-169, 1973.
- [21]. ANDERSON R, GRAM H.E, « Properties of alkali activated slag-concrete », 1987.
- [22] Farran, Javelas, Maso, Perrin, 1972, Etude de l'auréole de transition existant entre les granulats d'un mortier et la masse de la pâte de ciment hydraté. Colloque RILEM INSA TOULOUSE.
- [23]Buil M., Paillere A., 1984, Utilisation des fillers fins dans les bétons, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie De l'Ingénieur, N°30, Paris, pp 193-196.
- [24] De Larrard F., 2000, Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.
- [25] CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F., ET CHARONNAT Y., Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrages d'art OA 33. Février 2002.
- [26] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, Cement and concrete research Vol. 36(2), pp. 264-277, 2006.

Référence bibliographique

- [27] Michel F., Pierard J., Courard L., Pollet V., Influence of physic-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, Proceedings of 5th International RILEM Symposium on SCC, p205-210, 3-5 September 2007, Ghent, Belgium.
- [28] Felekoglu B., Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), Resources, Conservation and Recycling, Volume 51, Issue 4, p770-791, 2007.
- [29] Lawrence P., Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2000.
- [30] Bosiljkov VB., SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, Cement and Concrete Research 33, p1279-1286, 2003.
- [31] Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe AM., Taerwe L., Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, Cement & Concrete Composites 29, p94-102, 2007.
- [32] Kakali G., Tsivilis S., Aggeli E., Batis G., Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO₃, Cement and concrete research 30, p1073-1077, 2000, DOI : 10.1016/S0008-8846(00)00292-1.
- [33] Husson S., Gullhot B., Pera J., Influence of different fillers on the hydration of C3S, Proceedings of the 9th ICCO, New Delhi, vol4, 1992.
- [34] Bonavetti V., Rahhal V.F., Irassar E.F., Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements, Cement and concrete research 31, p853-859, 2001, DOI: 10.1016/S00088846(01)00491-4.
- [35] Zhang F., Zhou Z., Lou Z., Solubility product and stability of ettringite, Proceedings of the 7th ICCO, Paris, vol2, 1980.
- [36] Farran J., Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et des matériaux enrobés, Thèse de l'Université de Toulouse, 1956.
- [37] Ollivier JP., Contribution à l'étude de l'hydratation de la pâte de ciment Portland au voisinage des granulats, Thèse de l'université Paul Sabatier, 15 avril 1981.
- [38] Escadeillas G., Les ciments aux fillers calcaires : Contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillerisés, Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, 1988.
- [39] Zhu W., Gibbs JC., Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 35, p1457-1462, 2005.

Référence bibliographique

- [40] Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Tsivilis S., Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements, *Cement & Concrete Composites* 27, 191-196, 2005.
- [41] KAZI AOUAL, Mohammed Rafik, KENADIL, Abderrahmen. *Effet du mode de compactage sur le comportement mécanique et hydrique des sols fins (Comparaison entre les procédés statique et dynamique)*. Mémoire de projet de fin d'études master : Infrastructures de Base et Géotechnique, Tlemcen : Université Abou Bekr BELKAID, 2016, 102p.
- [42] Bellarmin, Narimene, Nadji, Asma. *Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice C.B.R)*. Mémoire de projet de fin d'études master : Géotechnique, Boumerdes : Université de Boumerdes, 2017, 110p.
- [43] GHORZI Kheira HAFIDI Fatima Zohra. *Compactage des barrages en remblai*. Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Civil : Infrastructure de Base et Géotechnique (Travaux Public) : Université Abou Bekr BELKAID, 2013, 111p.
- [44] GUETOUCHE, Amar. *Mécanique des sols I*. Polycopie : génie civil. Sétif : université FERHAT Abbas, 2016, 46p.
- [45] www.tice.inpl-nancy.fr, (propriété physique et mécanique des sols).
- [46] www.corinsa.fr, Compactage à pneus.
- [47] ROBERT, Médor Eko. *Compactage de l'argile Sainte-Rosalie : Etude expérimentale dans un cadre élastoplastique et analyse numérique par la méthode des éléments finis*. Thèse de doctorat : Sciences de l'agriculture et de l'alimentation. Québec : Faculté des Études Supérieures de l'Université Laval, 1999, 392p.
- [48] LOUCIF, Tahar, NOUIBAT, Abderrahmane. *Influence du compactage et de la teneur en argile sur les caractéristiques de résistance des sols affaissables vis-à-vis du cisaillement*. Mémoire de projet de fin d'études master : Géotechnique, M'sila : Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2017, 82p.
- [49] Belarbi, Narimene, Nadji, Asma. *Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice C.B.R)*. Mémoire de projet de fin d'études master : Géotechnique, Boumerdes : Université de Boumerdes, 2017, 110p.
- [50] www.pdf.coursgeologi.com, Les essais de la géotechnique routière, étude comparative entre les normes.

Référence bibliographique

- [51] Belarbi, Narimene, Nadji, Asma. *Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice C.B.R)*. Mémoire de projet de fin d'études master : Géotechnique, Boumerdes : Université de Boumerdes, 2017, 110p.
- [52] GHORZI Kheira HAFIDI Fatima Zohra. *Compactage des barrages en remblai*. Mémoire pour l'obtention Du Diplôme de Master en Génie Civil : Infrastructure de Base et Géotechnique (Travaux Public) : Université Abou Bekr BELKAID, 2013, 111p.
- [53] KANAZOE, Mariétou. *Amélioration des graveleux latéritiques avec du concasse de classes granulométriques différente (0/20 ; 0/31,5 ; 5/20)*. Mémoire Pour l'obtention Master en ingénierie De l'eau et de l'environnement : Génie civil, Burkina Faso : institut international d'ingénierie de l'eau et l'environnement : 2011 ,106p.
- [54] Zadjaoui, A. *Influence des normes appliquées pour le compactage sur la densification d'un tuf calcaire en Algérie*. 14EME CRA MSG, YAOUNDE, 26-28 NOVEMBRE 2007.
- [57] Guy RAMOND, Nadir LARADI, Monique PASTOR, Caractéristiques de bitumes utilisés en Algérie, BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES - 225 - MARS-AVRIL 2000 - RÉF. 4245 - PP. 3-11.
- [58] J-M. DURAND, G. DEGOUTTE et al, LA TECHNIQUE DU BETON COMPACTE AU ROULEAU (B.C.R.) POSSIBILITES D'APPLICATION POUR LES BARRAGES EN AFRIQUE, sud science et technologie n°1-1998.
- [59] Gauthier P. et Marchand J., Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton, Québec (ABQ) Québec, 2004.
- [60] Site www.bcr.cc, www.cement.ca.
- [61] Mustapha ZDIRI, Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR) : Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux, Thèse en cotutelle entre : L'Université de Tunis El Manar (Tunisie), L'Université d'Artois (France) et L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, En vue de l'obtention de grade de : Docteur de L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis d'Artois
Docteur de L'Université Spécialité Génie Civil Spécialité Sciences pour l'Ingénieur, Soutenue le 04 Octobre 2008.
- [62] 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.

Annexe A : Le marteau vibrant

Le Marteau vibrant

Dans notre étude expérimentale après avoir des difficultés de compactage avec Proctor modifié et d'après les résultats obtenus, on a tiré les remarques suivantes :

- Ecrasement des grains de mélange ce qui influe négativement sur la granulométrie et le compactage.
- La durée de remplissage des éprouvettes est plus long qui provoque l'évaporation de l'eau, Ce qui induira à la difficulté de maniabilité.
- Problème de malaxage.
- Energie de compactage insuffisante pour le compactage de BCR.
- Le compactage avec Proctor modifié n'est pas similaire au compactage sur site.
- Densité obtenue est faible par rapport à celle de chantier.

Et ceci nous conduira à procéder à un autre outil de compactage adéquate pour le compactage de BCR qui a des caractéristique convenable pour le compactage de BCR.

D'après plusieurs recherches et modification faites au Laboratoire de Développement de la Construction(CDL) Lafarge a Rouïba, on a amélioré un nouveau outil de compactage qui est comme suite :



Les constituants et caractéristiques du marteau vibrant :

- Marteau piqueur de marque HYUNDAI.
- Le poids totale P = 10,6kg.
- Puissance du marteau piqueur 1500w.
- Energie du marteau piqueur 20j.
- Il est équipé de réglage de puissance.
- Voltage / fréquence 230V – 50 HZ.

Les accessoires du marteau vibrant :

Une dame composé de Tige d'acier qui a été fabriquer par nous-même de hauteur H = 40cm et un Cylindre d'acier de diamètre D = 12,2cm qu'on a fabriqué au tourneur, et qui est approprié pour les moules 16x32mm.

ALGÉRIE

FICHE TECHNIQUE

Carbonates de calcium naturel

La gamme des carbonates de calcium naturel se caractérise par sa très grande blancheur et sa pureté chimique. Ses caractéristiques physico-chimiques lui permettent d'être utilisée dans toutes les applications industrielles du CaCO_3 .


LAFARGE
 لافارج

Caractéristiques chimiques & physiques :

 CaCO_3 99%

 MgO 0,14%

 Fe_2O_3 0,01%

PAF : Perte au feu ISO 3282	43,9%
Insoluble HCl ISO 5796/1	0,005%
PH en solution ISO 787/9	9 +/- 0,5

Dureté (Mohs)	3
Densité ISO 787/10	2,7
Indice de réfraction	1,71
Blancheur	Y=83 L*=93

Résumé

Résumé :

L'incorporation des fillers calcaire dans la formulation de béton compacté au rouleau (BCR) permet, en plus du gain écologique et économique, permet d'atteindre des résistances conformes aux exigences des normes.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet des fillers calcaire, sur le comportement physico-mécanique en substituant 5%, 10%, 15% de ciment par des fillers calcaire et d'initier des recherches sur le mode de compactage.

Les résultats obtenus par Proctor modifié ont été inférieur d'un taux 59% comparé aux résultats obtenus par le mode de compactage (marteau vibrant).

Qualitativement, l'état de surface des éprouvettes dans le cas de compactage par le marteau vibrant pour FC10% été proche de l'homogénéité contrairement à celle de Proctor modifié qui présentent des traces d'incohésion.

Les résultats obtenus ont montré que la résistance mécanique des BCR contenant des fillers calcaires à court terme donne des résultats plus ou moins similaires à celle du béton sans fillers calcaires dans le cas d'un compactage par le marteau vibrant avec l'augmentation de la densité. Ainsi que l'importance du pourcentage des fillers sur les résistances de béton compacté au rouleau (BCR), l'importance de l'outil et la méthode de compactage.

Mots clés : BCR, fillers calcaire, compactage, comportement physico-mécanique, économie.

Summary:

The incorporation of calcareous fillers in the roller compacted concrete (RCC) formulation, in addition to the ecological and economic gain, makes it possible to achieve resistances in accordance with the requirements of the standards.

The objective of this study is to analyze the effect of calcareous fillers on the physico-mechanical behavior by replacing 5%, 10%, 15% of cement by calcareous fillers and to initiate research on the compaction mode.

The results obtained by modified Proctor were 59% lower than the results obtained by the compaction mode (vibratory hammer).

Résumé

Qualitatively, the surface condition of the specimens in the case of compaction by the vibratory hammer for FC 10% has been close to homogeneity unlike that of modified Proctor, which shows traces of incoherence.

The results obtained have shown that the mechanical resistance of RCC containing calcareous fillers in the short term gives results more or less similar to that of concrete without calcareous fillers in the case of compaction by the vibrating hammer with the increase of the density. As well as the importance of the percentage of fillers on roller compacted concrete (RCC) resistances, the importance of the tool and the compaction method.

Key words: roller compacted concrete, limestone fillers, compaction phsico-mécanique, behavior, economy.