

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de **Master**

Spécialité : Génie Civil

Option : Master Matériaux en Génie Civil

THEME

Effet d'un ajout cimentaire sur les propriétés des BCR

**Réalisé par
FERDJALLAH Mohamed-Amine
et
AKDIF Mohamed**

**Encadré par
Pr CHAID Rabah**

Année Universitaire 2017-2018

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu le tout puissant de nous avoir illuminé et ouvert les portes du savoir, et nous avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce mémoire.

Nous tenons en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur **Pr CHAID Rabah**. A qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique de notre projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier sincèrement M' le directeur de «laboratoire central des matériaux de cosider» pour nous avoir accepté d'effectuer le stage pratique au sein de ce centre, et pour la confiance qu'il nous a témoigné.

Il nous est particulièrement agréable de témoigner notre reconnaissance à nos encadreurs **M'Makhloufi Abdel Hadi**, et **SALAH BENDJAMA** pour leurs suivi pratique et leurs conseils instructifs et précieux.

Nous tenons à exprimer aussi notre vive reconnaissance aux enseignants de département de génie des matériaux qui ont contribué à notre formation.

Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leurs concours à l'élaboration de ce travail, trouvant ici l'expression de notre profonde sympathie.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont encouragées pour réaliser
Ce travail.

Dédicace

ON TIENT À DÉDIER CE MODESTE TRAVAIL
À CEUX QUI NOUS ONT DONNÉ LA VIE ET QUI ONT TOUJOURS VEILLÉ À
NOTRE
BIEN-ÊTRE, NOS TRÈS CHERS PARENTS
À CEUX QUI SONT LA SOURCE DE NOTRE INSPIRATION ET NOTRE
COURAGE,
NOS CHÈRES SŒURS ET NOS CHERS FRÈRES
À TOUTE LA FAMILLE ET LA BELLE FAMILLE
AUSSI À NOS TRÈS CHÈRES AMIES
FERDJALLAH MOHAMED AMINE & AKDIF MOHAMED

Sommaire

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION.....	1
2. Historique du BCR	2
3. Applications barrages	3
4. Applications routes (Pavages).....	5
5. Avantage du BCR.....	6
6. Différence entre chaussée en BCR et chaussée en Béton Bitumineux.....	8
7. Les constituants du BCR	9
7.1. Les liants.....	9
7.2. Les granulats.....	10
7.3. Les granulats fins ($\varnothing < 5 \text{ mm}$)	10
7.4. Les éléments fins ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$)	10
7.5. Les additions	11
7.6. L'eau de gâchage	12
7.7. Les entraîneurs d'air	13
7.8. Les super plastifiant	13
8. Procédés de réalisations du BCR.....	13
8.1. Exécution des joints.....	13
8.2. Contrôle de qualité dans l'exécution des chaussées en BCR.....	14
8.3. Ségrégation	17
8.4. Caractéristiques de la surface.....	15
9. Transport du BCR	16
10. Mise en place du BCR	17
10.1 Équipements	19
10.2 Compactage du BCR.....	21

11. Propriétés des bétons	22
11.1.à l'état frais.....	22
11.2. À l'état durci.....	22
12. FORMULATION DES MELANGES DES BCR.....	22
13. Durabilité du BCR	24
14. TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE BCR	24
14.1. La formulation.....	24
14.1.1. Méthode de formulation empirique.....	25
14.1.2. Méthode de formulation respectant les limites de maniabilité	26
14.1.3. Méthode de formulation semi empirique	26
15. Les ajouts.....	26
15.1 Les fillers calcaire	26
15.2 La fumée de silice et les cendres volantes.....	26
16. Caractérisation mécanique.....	27
16.1. Maniabilité du BCR.....	27
16.2. Résistances à la compression et à la traction	27
16.3. Résistance à la flexion	27
16.4. Comportement à la fatigue.....	28
17. Retrait du béton au laitier	29
18. conclusion	30

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

1. INTRODUCTION	31
2. MATERIAUX	31
2.1 Le cement.....	31
2.2 Les Granulates.....	32
2.2.1 <i>Le sable</i>	32
2.2.2 <i>Les gravies</i>	34
2.3 L'adjuvant Super plastifiant.....	38
2.4 Entertainer d'air	38
2.5 l'eau de gâchage.....	40
3. METHODES D'ESSAI	40
3.1 Essai de Vébé	40
3.2 Proctor normal et modifié	40
3.3 Proctor normal et modifié (NA 5262 : 2007)	42
4. METHODE MATRICIELLE (MODELE DE REGRESSION)	45
5. PREPARATION DES EPROUVETTES	48
6. CONCLUSION	51

Chapitre III : PRESENTATION ET ANALYSE

DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

1. INTRODUCTION	52
2. FORMULATION DES BETONS	52
3. BETON A L'ETAT FRAIS.....	54
3.1 Masse volumique.....	54
3.2 L'affaissement au cône d'Abrams	54

3.3 Temps vébe.....	56
4. BETON A L'ETAT DURCI :	56
4.1. Masse volumique.....	56
4.2. Résistance à la compression	57
4.3. La résistance à la traction par fendage:	59
4.4. Perméabilité de l'eau sous pression	61
4.6. Le module instantané (en GPa)	61
5-PLANIFICATION DE L'EXPERIENCE	62
5.1. Calculs des coefficients	65
5.2. Las Equation générale (module régression)	66
5.3. Les diagrammes ternaires	68
6. Conclusion	79
Conclusion générale.....	80

liste des Figure

Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau.....	3
Figure I.2 : Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie).....	4
Figure I.3 : Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie).....	4
Figure I.4 : Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada.....	5
Figure I.5 : Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada.....	5
Figure I.6 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA	6
Figure I.7 : Aire d'entreposage du bois en BCR - Papeterie DOMTAR.....	7
Figure I.8 : Zone d'arrêt d'autobus - Ville de Sherbrooke.....	8
Figure I.9 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB.....	9
Figure I.10 : Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR.....	14
Figure I.11 : Contrôle du compactage.....	15
Figure I.12 : Ségrégation des éprouvettes de BCR.....	15
Figure I.13 : Schéma d'une centrale mobil.....	16
Figure I.14 : Photographie d'une centrale mobile.....	17
Figure I.15 : Finisseur conventionnel.....	19
Figure I.16 : Finisseur conventionnel avec et sans barres de compactage	20
Figure I.17 : Finisseur conventionnel à très faible énergie de compactage	20
Figure I.18 : Finisseur à haut pouvoir de compactage	21
Figure I.19 : Texture du BCR avec un finisseur à haut pouvoir de compactage.....	21
Figure I.20 : Distribution des contraintes au centre de la dalle selon le point d'application de la charge.....	21
Figure I.21 : Courbe de fatigue du BCR et du BC (d'après Agal et al.).....	29

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

Figure II.1: Courbes d'analyse granulométrique des granulats (Méthode Fuller–Thomson).	36
Figure II.2: Courbes d'analyse granulométrique des granulats (Méthode Dreux – Gorisse).	37
Figure II.3: Mesure de la consistance (Essai Vébé).	41
Figure II.4: Appareil d'Essai Vébé.	41
Figure II.5: Machine Proctor normal et modifié.	42
Figure II.6: Eprouvette d'une partie de mélange.	42
Figure II.7 : optimisation des mélanges granulaires.	43
Figure II.8 : exemples d'écarts au carré obtenus lors d'une optimisation granulaire	44
Figure II.9. : Diagramme ternaire type.	45
Figure II.10. : Malaxage du béton	59
Figure II.11. : Éprouvette Cylindrique (16×32 cm).	59
Figure II.12. : Préparation des moules du BCR.	50
Figure II.14. : appareil à air comprimé pour démoulage.	51
Figure II.15. : Conservation des éprouvettes	51

Chapitre III: PRESENTATION ET ANALYSE

DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Figure III.1 : Masse volumique a l'état frais des différents bétons.	54
Figure III.2 : diagramme de l'Affaissement en (mm).	55
Figure III.3: diagramme de résultat temps vébe	56
Figure III.4: diagramme de Masse volumique a l'état durci	57
Figure III.5: Résistance à la compression des béton à 2 j.	57
Figure III.6: Résistance à la compression des béton à 7 jr.	58
Figure III.7: Résistance à la compression des béton à 28 j.	58
Figure III.8: la résistance à la traction par fendage à 7 j.	59
Figure III.9: la résistance à la traction par fendage à 28 j.	60
Figure III.10: résultat perméabilité de l'eau sous pression.	61
Figure III.11 : module instantané (en GPa).	62

Figure III.12: diagramme ternaires de la Masse volumique de béton frais	68
Figure III.13: diagramme ternaires de affaissement de béton frais	69
Figure III.14: diagramme ternaires de Temps vébe de béton frais	70
Figure III.15: diagramme ternaires de la Masse volumique de béton durci	71
Figure III.16: diagramme ternaires de la résistance à la compressio à 2 j.....	72
Figure III.17: diagramme ternaires de la résistance à la compressio à 7 j.....	73
Figure III.18: diagramme ternaires de la résistance à la compressio à 28 j.....	74
Figure III.19: diagramme ternaires de la résistance à la traction par fendage à 7 j.....	75
Figure III.20 : diagramme ternaires de la résistance à la traction par fendage à 28 j.....	76
Figure III.21 : diagramme ternaires de la perméabilité de l'eau sous pression à 28 j.....	77
Figure III.22: diagramme ternaires de module instantané à 28 j.	78

Liste des Tableaux

Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

Tableau II.1 : Certains citation des valeurs chimiques du ciment CRS-CEM I 42,5 N-SR3.....	31
Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CRS-CEM I 42,5 N-SR3.....	31
Tableau II.3 : Propriétés physico-mécaniques du ciment CRS-CEM I 42,5 N-SR3.....	32
Tableau II.4 : Analyse granulométrique du sable 0/3.....	32
Tableau II.5 : Analyse granulométrique du sable 0/1.....	33
Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable corrigé.	33
Tableau II.7 : Propriétés des sables.....	33
Tableau II.8 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	34
Tableau II.9 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	34
Tableau II.10 : Analyse granulométrique du gravier 15/25.....	35
Tableau II.11 : Caractéristiques des granulats.....	35
Tableau II.12 : Composition chimique du laitier.....	40
Tableau II.13 : Autres caractéristiques du laitier.	40
Tableau II.14 : Valeurs conventionnelles.....	47
Tableau II.15 : Valeur réelles.	47
Tableau II.16 : Composition des bétons (1 m ³).....	48
Tableau II.17 : Notation des éprouvettes.....	50

Chapitre III : PRESENTATION ET ANALYSE

DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Tableau III.1 : Masse volumique a l'état frais des différents bétons.....	54
Tableau III.2 : Classification des bétons selon l'affaissement.....	55
Tableau III.3 : résultat Affaissement (mm).....	55
Tableau III.4 : résultat Tempes vébe par (s)	56
Tableau III.5 : masse volumique a l'état durci des différents bétons.....	57
Tableau III.6 : Résistance à la compression des bétons	59
Tableau III.7 : résultat la résistance à la traction par fendage.....	60

Tableau III.8 : résultat perméabilité de l'eau sous pression.....	61
Tabelle III.9 :resultat module instantané (en GPa).....	62
Tableau III.10 : Récapitulatif des caractéristiques des bétons frais.....	63
Tableau III.11 : Récapitulatif des caractéristiques des bétons durci	64
Tableau III.12 : les coefficients d'influence.....	65

Référence BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.
- [2] Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M., (2000), Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.
- [3] Gagné R., (2004), Le Béton Compacté au Rouleau BCR, présentation PowerPoint, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Canada.
- [4] Ciment Québec Inc. (CQI) possède l'une des cimenteries les plus modernes en Amérique du Nord. CQI fabrique de nombreux types de ciment qu'elle distribue au Québec,
- [5] Anderson R., (1986) Roller Compacted pavements- Physical Properties, CBI report No. Ra 3:86, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden, pp. 18-24.
- [6] Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes, Chaussée en béton de ciment, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France, pp. 29-47 et 112-133.
- [7] Huang Y. H., (2004), Pavement Analysis and Design, seconde édition, Université de Kentucky USA, pp. 5-8.
- [8] Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca> [1.9-a] Belaïd M., "Photo de Barrage en Tunisie" Communication personnelle, Tunisie.
- [9] Belaïd M., (2004), Etude des Matériaux du Béton Compacté au Rouleau et du remblai dur, Annales de l'Équipement, Volume XIV, N° 02, Tunisie.
- [10] ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- [11] American Concrete Pavement Association, (1996), Whitetopping – State of the Practice, Engineering Bulletin, EB, USA, 210 pages.
- [12] Zaniewski, J.P., (1989) Effect of Pavement Surface Type on Fuel Consumption, SR289.01P, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- [13] Site de l'American Concrete Pavement Association, (CAC) (EUPAVE) (NCHRP) (NRMCA) (PCA) (RMC) (FHWA) (IPRF) (IGGA) (MIT CSH) (NCC) (CP Tech)

[14] Saucier F., Cormier B. et Duchesne C., (1995), Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.

[15] Projet National BaCaRa 1988-1996, (1996), Le béton compacté au rouleau. Presse ENPC, Paris, pp. 17-25.

[16] Baron J. et Olivier J. P., (1997), Les Bétons: bases et données pour leur formulation, Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Eyrolles Paris, pp. 20-149.

[17] Atis C. D., Sevim U. K., Ozcan F., Bilim C., Karahan O., Tanrikulu A. H. et Eksi A., (2004), Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash, *Materials letters* 58 (2004), pp.1446-1450.

[18] Cao C., Sun W. et Qin H., (2000), The analysis on strength and fly ash effect of roller compacted concrete with high volume fly ash, *Cement and Concrete Research* 30 (2000), pp. 71-75.

[19] Canadian Industries Recycling Coal Ash CIRCA, (2002), Fiche d'information technique N°3, Janvier 2002, Canada.

[20] ENV 206, (1999), Béton - Part 1: Spécification, performances, production et conformité, Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles, Belgique.

[21] American Concrete Institute ACI 325.10R-95, (1995), State-of-the-art report on rollercompacted concrete pavements, *Manual of concrete practice*, ACI manual of concrete practice, ACI, USA, 32 pages. [1.23*] Coquand R., (1985), *Routes*, Eyrolles, Paris France, pp. 7-46.

[22] Smith T., Tighe S. et Fung R., (2001), Presentation of the Concrete Pavement Technology Advancements, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia. [23] Gagné R., (2000), High-performance roller compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability, International symposium on engineering materials for sustainable development, Novembre 2000, Okayama, Japon, pp. 74-88.

[24] Haque M. N. et Ward M. A., (1986), Marginal Materials in Roller Compacted Concrete for pavement Construction, *ACI Journal*, N° 83-63, Juillet-Aout 1986.

[25] Marchand J., Gagné R., Ouellet E. et Lepage S., (1997) Mixture proportioning of roller compacted concrete, *Concrete Technology*, Special Publication SP 171-22. pp. 457-487.

[26] Ouellet E., Marchand J. et Reid E., (1998), Comportement mécanique et durabilité au gel de mélanges de béton compacté au rouleau ACI, Section Québec et de l'est de l'Ontario, Canada, 6 pages. [27] Agal T., Charvet B., Assaf G. J. Marleau F., (2005), *Catalogue des chaussées en Béton Compacté au Rouleau*, 32 pages.

[28] Gauthier P. et Marchand J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pp. 47-61.

[29] Marchand J., Gagné R., Ouellet E. et Lepage S., (1997), Mixture proportioning of roller compacted concrete, a review, Concrete Technology Special Publication SP 171-22, pp. 457-487.

[30] Tayabji S. D. et Colley B. E., (1986), Analysis of jointed concrete pavement, Report N° FHWA-RD-86-041, Federal Highway Administration.

[31] Jeuffroy G. et Sauterey R., (1989), Cours de routes, Chaussée en béton de ciment, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris, France, pp. 81-107.

[32] GAUTHIER, P., MARCHAND, J., BOISVERT, L., OUELLET, E., PIGEON, M. Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtements en béton compacté au rouleau, Formation continue GCI-A2455, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, 2000, pagination multiple.

[33] Service d'expertise en matériaux (S.E.M.) inc., Rapport interne, pagination multiple.

[34] Devis technique normalisé pour le béton compacté au rouleau 3VM-30, Ville de Montréal, Service des travaux publics et de l'environnement, Division de la voirie, Section du laboratoire, février 2001, 25 p.

[35] NANNI, A., LUDWIG, D., A., SHOENBERGER, J., E. Physico-mechanical properties and load transfer efficiency of RCC pavement, ACI Materials Journal, 1996, juillet-août, pp. 356361.

[36] Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, Rapport interne, pagination multiple.

[37] l'industrie cimentière française regroupe cinq sociétés productrices de ciment : Ciments Calcia, Eqiom, Kernéos, Lafarge Ciments et Vicat. (SFIC), Cimbéton, l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH), Bétocib et la fondation Ecole Française du Béton (EFB)

[38] malhotar , V,M, Matériaux complémentaire en cémentation pour le béton , public par centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie Ottawa , canada pp471 . 1987 .

[39] aitcin ,P-C , Neville ,A, acker ,P. the various types of shrinkage deformation in concrete , concrete international No,9,pp.35-41,Canada 1997 .

[40] takahashi ,T,nakata,H,YODHIDA,K, Autogenous shrinkage of cement past during hydration Proceeding oh the 10th international congress on the chemistry of cement , Gothenburg ,suede 1997.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

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 [1], 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 bulldozers, plaques vibrantes...). D'après Gauthier et al [2], 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 [1]. 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).

La formulation, les méthodes de confection et les méthodes de mise en place diffèrent en fonction du type de BCR [3]. Pour sa confection, le BCR est produit, suivant la taille du projet, dans des centrales fixes ou mobiles. Le malaxage peut se faire, soit dans un malaxeur conventionnel à axe vertical, un malaxeur à tambour basculant, ou dans le cas des petits projets, dans une bétonnière. Le transport jusqu'au chantier est assuré à l'aide de camions à benne basculante. Pour des épaisseurs inférieures à 25 cm, le BCR pour les pavages est mis en place avec une paveuse dite à asphalte. On emploie couramment, pour sa mise en œuvre, des finisseurs à haut pouvoir de compactage [1]. Immédiatement après sa mise en place par les finisseurs, le BCR est compacté successivement avec des rouleaux vibrateurs à roues métalliques puis avec des compacteurs pneumatiques. La circulation du faible trafic est ouverte juste après sa mise en place et on ne permet la circulation du fort trafic qu'après 5 à 7 jours de mûrissement [4]. Du point de vue composition, Anderson [5] a indiqué dans ses études, que le BCR est un matériau caractérisé par un volume de pâte inférieur à celui du BC comme c'est présenté sur la Figure 1 et que son squelette granulaire est plus compact. La teneur en eau est aussi plus faible chez le BCR comparée aux teneurs utilisées dans le BC. La formulation d'un mélange de BCR doit minimiser au maximum le volume de vide et les granulats seront généralement enrobés d'une mince couche de pâte vu la faible teneur en liant.

2. Historique du BCR

Des chercheurs tel que Jeuffroy et Sauterey [6] ont considéré que l'emploi des liants hydrauliques ou pouzzolaniques dans les structures de chaussées a commencé dès le 1er 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 20ème 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 programme de transformation d'empierrements et d'anciens pavages en béton, notamment sur la route Nationale N° 43 entre Lillers et Chocques [6]. 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/m^3), alors que la couche supérieure est plus mince et plus fortement dosée (400 kg/m^3) 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 [6]. Plusieurs autres applications ont été réalisées en Europe en général. Jeuffroy et Sauterey [6], 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 [5]. Aux USA la première chaussée rigide, d'après Huang [7], 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 [3]. Les statistiques de 2001 montrent que près de 95 000 km au USA ont été construits en béton hydraulique [7]. Selon Gauthier et al. [1, 2]. La première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord date depuis 1942 par le corps des ingénieurs de l'armée américain (US Army Corps of Engineers) qui ont construit une voie à Yakima. Gauthier et Marchand ont précisé [1] 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 $52\,000 \text{ m}^2$ sur l'Île de Vancouver par British Columbia Forest Company (BCFP). La même surface a été doublée en 1978. Ces premières applications ont été faites pour l'industrie forestière qui cherchait des pavages extrêmement résistants. Actuellement on construit des pavages en BCR avec des épaisseurs variant de 20 cm à un mètre pour la construction de rues, d'aires industrielles et d'aires d'entrepôts. Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en

utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Australie et d'autres pays. On remarque aussi, d'après Gauthier et al. [2], 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) [1, 2], 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/m^3) [1]. 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.

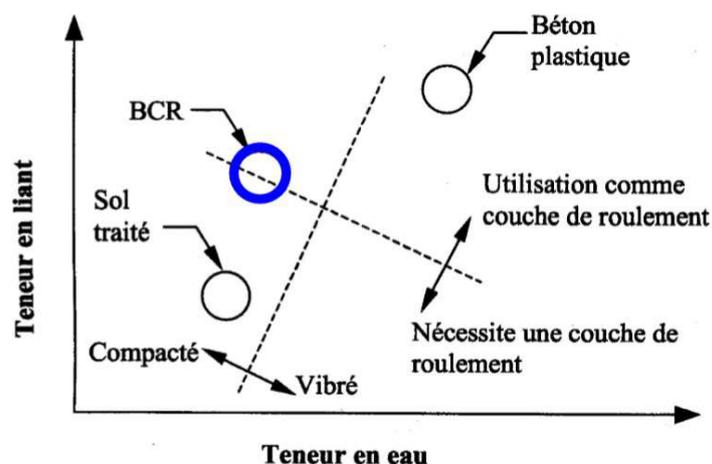


Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau.

3. Applications barrages

Pour faire des économies et résoudre le problème d'utilisation des grandes quantités de terre dans les digues de retenue, le BCR en tant que matériau est utilisé dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces. L'avantage de cette technique est que ce matériau permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval. L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du barrage. Ce matériau, caractérisé par un affaissement nul, est produit dans des centrales de malaxage implantées à proximité du site puis il est transporté à pied d'œuvre par des convoyeurs ou des camions. Le liant utilisé est généralement le ciment alors que le dosage est nettement plus faible comparé à celui d'un BC. La dimension maximale du granulat varie de 25 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

[8]. 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 [8]. 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 2, 3, 4 et 5.



Figure I.2 : Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie).

Parmi les barrages en BCR réalisés en Tunisie on peut citer: Barrage Errmil (Figures 2 et 4) à Bouarada, Barrage Fom El khanga 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'élèvent à 90 Millions d'euros.



Figure I.3 : Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie)

Au Canada, par contre, la construction de barrages en BCR est relativement plus développée dont on peut citer le barrage de Manouane. En outre, en Amérique du Nord, le plus grand barrage en BCR se trouve à Olivenhain, Californie (USA). Le plus haut barrage en BCR est le barrage Miel en Colombie de 617 m de hauteur, suivi par le barrage de Biobio au Chili de 503 m de hauteur. The 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.

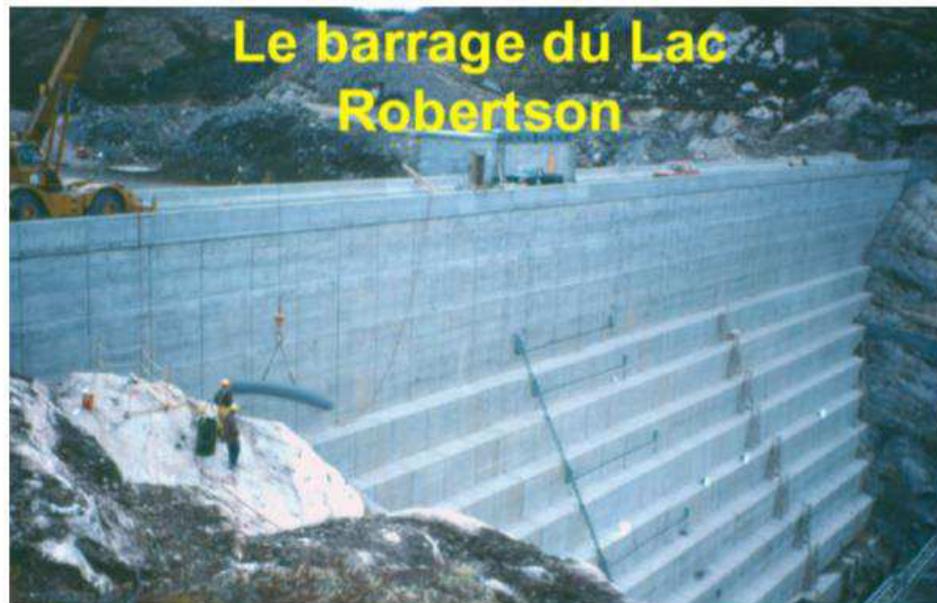


Figure I.4 : Barrage du Lac Robertson en BCR au Canada.



Figure I.5 : Barrage et Batardeau en BCR sur la rivière Manouane au Canada.

4. Applications routes (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 6). Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulat est limitée à 20 mm [8]. Du point de vue durabilité, le revêtement en BCR a montré des bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voies d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telle que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes [8, 10].



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

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 [8].

5. Avantage du BCR

Selon la classification, le pavage en BCR est considéré comme étant une chaussée rigide. D'après Gagné [3], ce matériau présente des bonnes performances (résistance et durabilité) et il est employé pour supporter des lourdes charges puisque sa résistance en flexion est élevée. Pour sa réalisation, il nécessite beaucoup moins de travaux préparatifs tels que les terrassements, le compactage et la préparation de fondation. En service, il présente une bonne rigidité. Le revêtement en BCR, pour les voies d'accès et les routes, offre un certain nombre d'avantages comme son prix de revient en considérant les frais d'entretiens, son revêtement en béton de bonne résistance ainsi que sa forte capacité portante. Comparés aux mélanges de BC et à résistance mécanique égale, les mélanges de BCR ont une teneur en liant plus faible.

Les travaux cités dans les références [1,3, 8, 10,12], font apparaître plusieurs avantages du BCR, qui sont résumés comme suit:

- Bonne résistance à la compression: pour supporter les charges concentrées lourdes,
- Bonne résistance à la flexion: pour supporter les lourdes charges répétées sans affaissement et répartir uniformément les charges sur la couche de fondation.
- Bonne résistance au cisaillement: pour résoudre le problème d'orniérage.
- Haute densité et faible absorption: donnant lieu à une bonne durabilité,
- Faible teneur en eau: permettant d'augmenter les résistances mécaniques et de réduire le retrait (Figure 7).
- Ne nécessite pas d'armature de résistance, ni goudons, ni tirants: permettant des économies de temps pour la mise en place et réduisant ainsi le coût de construction.
- Ne nécessite ni coffrages ni travaux de finition: permet d'accélérer la mise en œuvre et réduit le coût et la main-d'œuvre (Figure 7).
- Technologie peu complexe comparée au dallage en béton armé.
- Surface claire et rigide: La clarté de la surface permet des économies d'énergies d'éclairage et la rigidité permet une résistance à l'abrasion,
- Les procédés de confection et de transport avec des usines en continu ou des convoyeurs et les techniques de mise en place permettent d'enregistrer des économies sur le coût global de la construction (Figure 8)
- Moins de travaux d'entretien: L'organisme ERES [10] indique dans son rapport que les routes en BB nécessitent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contre, on ne commence à faire des travaux d'entretien pour les routes rigides qu'après 12 à 15 ans.
- Peu de déformation: La rigidité du BCR empêche la formation de déformations d'autre part, le BCR ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur.
- 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 BB, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.
- Des économies de carburant: La chaussée souple augmente, jusqu'à 20 %, la consommation de carburant puisqu'elle fléchit plus que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à déduire qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple.



Figure I.7 : Aire d'entreposage du bois en BCR - Papeterie DOMTAR.**Figure I.8** : Zone d'arrêt d'autobus - Ville de Sherbrooke.

6. 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 de la première 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 (Figure 10). 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 [8, 13]. En outre, selon Saucier et al [10] et d'après une étude du coût du cycle de vie faite en 1998 par ERES Consultants [14], 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.

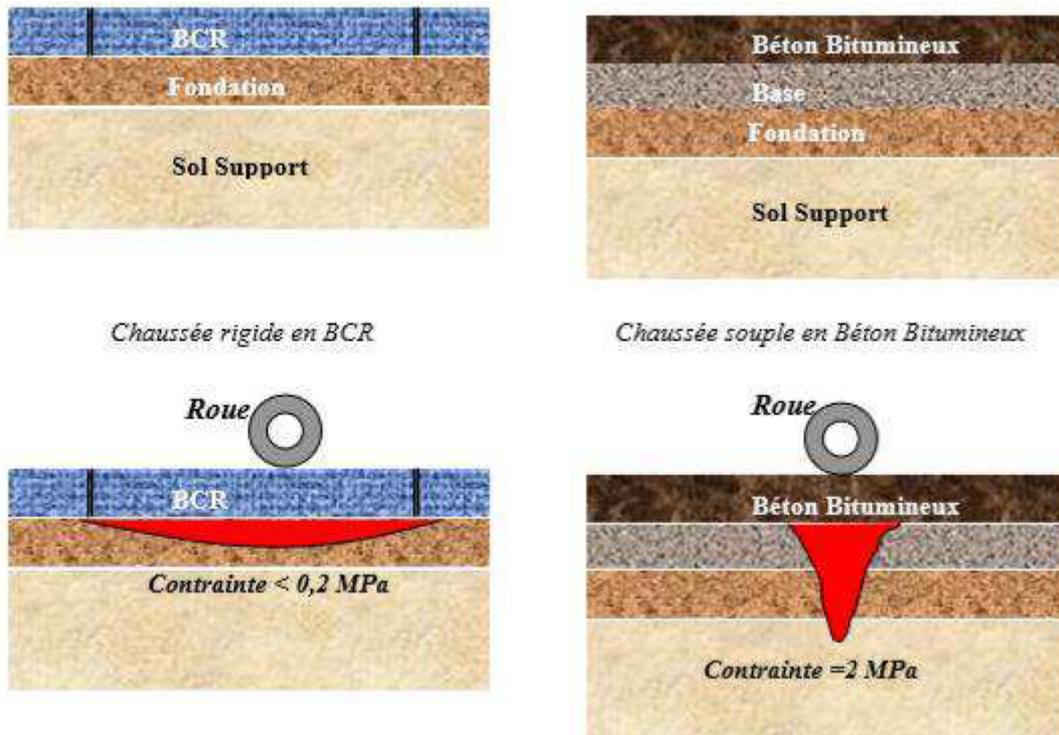


Figure I.9 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB.

7. Les constituants du BCR

7.1. Les liants

Pour la construction de revêtements de chaussées en BCR, Gauthier et Marchand [1] ont précisé que les mélanges sont généralement formulés avec des dosages en ciment variant entre 250 et 350 kg/m³, représentant une proportion totale en liant comprise entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs. Les forts dosages en liants ne sont pas très rentables car une teneur en ciment trop élevée peut gonfler les coûts de production sans augmenter significativement les résistances mécaniques ou prolonger la durée de vie du revêtement. Les propriétés nécessaires des liants hydrauliques utilisés pour le BCR sont principalement:

- une faible chaleur d'hydratation.
 - une prise retardée ou un temps de prise assez long.
 - le pourcentage C3A doit être limité pour garantir une bonne durabilité et éviter la dégradation,
 - Une bonne résistance aux sulfates car l'eau peut contenir des agents agressifs.
- Plusieurs types de liants ont été utilisés pour le BCR, on trouve principalement [15]:
- le ciment normalisé du même type que ceux utilisés pour le BC.
 - le ciment avec des additions en quantité souvent importante de cendres volantes (principalement), de laitier moulu ou de pouzzolanes.

- le liant spécial pour le BCR fabriqué en usine à base de laitier et analogue à ceux utilisés dans le domaine routier en France.

L'utilisation d'un liant à base de laitier permet d'obtenir une plus faible exothermie et un délai de maniabilité beaucoup plus long que celui des liants des deux autres catégories. Pour la construction des grands projets, la combinaison de plusieurs produits (cendres volantes, laitier moulu, pouzzolanes...) à la centrale de fabrication du BCR, permet de faire des économies très intéressantes [15].

7.2. Les granulats

Les granulats sont définis par la norme (NF P18-101) comme étant l'ensemble de grains minéraux, désignés par les termes fines, sables, gravillons ou cailloux et de dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Baron et Olivier [17] ont indiqué que les granulats représentent un constituant essentiel et un élément permanent des mélanges de BCR qui conditionne à la fois ces caractéristiques et son coût. Ils constituent aussi le squelette de ce matériau et représentent les 4/5 du poids du mélange. Ils sont peu déformables et ils améliorent les résistances du mélange en s'opposant à la propagation des microfissures provoquées par le retrait [15].

Les granulats employés dans la formulation de BCR proviennent des carrières de roches calcaires ou d'un gîte en terrain meuble alluvionnaire tels que les tout-venants et les graves roulées. Ces granulats interviennent généralement pour les BC avec un pourcentage de 75% du volume total du mélange solide. Par contre, pour le BCR les granulats représentent une proportion comprise entre 75 et 85% du volume total du mélange solide. Leurs influences sur le BCR à court et à long terme sont remarquables [1].

7.3. Les granulats fins ($\phi < 5$ mm)

La fraction granulaire (0-5) joue un rôle important dans le remplissage de l'espace intergranulaire. La présence de cette fraction peut atteindre 40% dont elle améliore le compactage et par conséquent la compacité du mélange. Des granulats de cette classe sont issus soit directement des gîtes et des carrières, ou obtenus par concassage et broyage d'une roche. Ils peuvent aussi provenir de carrières de sable fin, ou de dépôts de silts, ou être constitués par des cendres volantes sèches ou humides. La **compactibilité** et la portance du matériau frais dépendent de la quantité de pâte et de mortier lorsqu'elle remplit juste les vides entre les grains de graviers (granulométrie "creuse") et particulièrement si les granulats sont concassés. Par analogie au BC, un excédent de pâte et de mortier peut conduire à certains avantages tels que la limitation de la ségrégation et l'amélioration de l'étanchéité du matériau. Par contre, il est très difficile d'aboutir à une compacité maximale sur toute l'épaisseur de la couche mais on obtient un matelassage [15] [9].

7.4. Les éléments fins ($\phi < 80$ μ m)

Pour les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 0.08 mm, leur pourcentage varie entre 7 et 15 %. Cette fraction granulaire améliore considérablement le compactage.

Le Projet National Français BaCaRa [15] a montré qu'avec une teneur en éléments fins totale, y compris liant, variant entre 8 et 15 %, on obtient un bon comportement du BCR au

compactage. Cette proportion peut contenir des fines artificielles ou naturelles provenant des granulats. En revanche, la partie des éléments fins provenant des granulats a souvent des propriétés actives (favorables ou nocives). Certains éléments fins peuvent avoir des propriétés pouzzolaniques permettant des économies par la réduction de la teneur en ciment. Ces fines peuvent agir négativement pour réduire sensiblement les résistances en traction directe et au cisaillement lorsqu'elles sont dosées en excès, du fait des décollements pâte/granulats et de l'enrobage des éléments fins par le liant [1].

Gauthier et Marchand [1] ont précisé que les résultats d'une étude de laboratoire, réalisée sur le comportement mécanique et la durabilité au gel de mélanges de BCR, ont montré que l'ajout d'environ 7% de filler calcaire (particules minérales inférieures à 80 μm) par rapport à la masse totale des matériaux secs dans des mélanges de BCR peut généralement contribuer à améliorer les propriétés du béton.

L'introduction d'éléments fins, surtout s'ils sont pouzzolaniques, permet, dans la plupart des cas, une diminution de la teneur en liant, et par conséquent, provoque une réduction de la chaleur d'hydratation, un retard de la prise, une diminution du coût du liant et une augmentation du volume de pâte dans l'espace inter-granulaire [15].

7.5. Les additions

Les additions sont définies par les chercheurs comme des matériaux minéraux finement broyés et qui peuvent être ajoutés au BCR pour lui confier des propriétés particulières ou pour améliorer certaines de ses caractéristiques [16]. Pour obtenir une bonne cohésion et maniabilité du BCR à l'état frais et une bonne compacité et durabilité à l'état durci, une quantité d'éléments fins est nécessaire. On a recours à des additions dans le cas d'une insuffisance de fines dans la composition des éléments. Alors que l'excès d'éléments fins n'est pas favorable car ceux-ci demandent une importante quantité d'eau ce qui peut entraîner des pertes de résistance mécanique [6]. D'après Gagné [3], les études ont montré aussi que la majorité des revêtements en BCR construits ces dernières années ont été fabriqués avec des ciments hydrauliques composés avec des additions soit de fumées de silice, de laitiers ou de cendres volantes. La norme ENV 206 propose deux classes pour les additions:

- le type I (additions quasiment inertes)
- le type II (pouzzolanes et additions à caractères hydraulique latent)

Il existe quatre additions utilisables pour le BCR

a) Les additions calcaires [NF P 18-508]

Les additions calcaires sont définies selon Baron et Olivier [16] comme étant des produits secs finement broyés de densité variant entre 2,1 et 2,7. Ils sont obtenus par une fine division de roches calcaires provenant de gisement pouvant être dolomitique, massives ou meubles dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P 18-508.

b) Les cendres volantes [NF EN 450]

Les cendres volantes sont des poudres fines de densité variant entre 1,9 et 2,8 et constituées principalement de particules vitreuses de formes sphériques. Chimiquement, ces fines définies par l'ENV 197-1, ont essentiellement des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques [16]. Le taux maximal de substitution de ciment par une cendre volante est limité à 25% par rapport à la masse totale du liant [1]. La contribution des cendres volantes à l'amélioration des propriétés et de la qualité du BCR est essentielle puisqu'elles permettent sa compaction complète. Selon Atis et al. [17] et Cao et al. [18], les cendres volantes peuvent apporter d'autres avantages d'ordres chimiques tels que la réduction de chaleur d'hydratation. Historiquement, depuis les années 1980, le BCR composé de cendres volantes a pris une place plus importante et remplace progressivement les mélanges usuels de béton pour la construction à coût plus réduit de plusieurs ouvrages routiers. De point de vue proportion, lorsque l'ajout de cendres de classe F dans la terminologie des Etats-Unis est faible (de l'ordre de 20 à 30 %), celles-ci participent totalement à la réaction de prise. Par contre, lorsque cette proportion est très élevée (de l'ordre de 60 %), une partie de ces fines ne participe pas à la réaction mais se présente comme des fines de remplissage. Les cendres volantes utilisées en France sont des cendres de lignite. Ces cendres sont, en fait, des bons liants hydrauliques qui peuvent faire prise de façon autonome (cendres volantes de classe C) [16].

c) Les laitiers de haut fourneau [NF P 18-506]

Les laitiers vitrifiés moulus sont des additions du type II suivant la classification « ENV 206 » dont leur densité varie entre 2,85 et 2,95. Ils proviennent du broyage fin du laitiers vitrifiés (granulé ou bouleté) qui est lui-même un co-produit de la fabrication de la fonte de haut fourneau [19 ,20]. Les particules de ces produits ont des propriétés hydrauliques en présence de calcium et d'alcalis qui peuvent provenir du ciment après hydratation [1].

d) Les fumées de silices [NF P 18-502]

Ces additions sont définies, d'après Baron et Olivier [16], comme étant des poudres amorphes finement broyées (silice amorphes de densité spécifique de l'ordre de 2,2 à 2,25) provenant de la production d'alliages de silicium. Elles sont récupérées par le système de captage après être entraînées par les gaz, depuis la zone de combustion des fours. Elles sont considérées comme des additions de type II selon la classification « ENV 206 » et substituables au ciment

7.6. L'eau de gâchage

La quantité d'eau dans un mètre cube de BCR, sert d'abord pour l'hydratation du ciment et le mouillage des granulats. Elle permet au BCR d'avoir les qualités de plasticité et d'ouvrabilité, qui sont contrôlées, en général, par des essais et des mesures appropriées. Une partie de cette eau peut être absorbée par les granulats alors qu'une autre reste libre et ceci en fonction de leur porosité (NF EN 1008) [1].

La plage de variation de la teneur en eau, qui est le pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs, est comprise entre 4,5% et 6%. Ce dosage en eau, considéré relativement faible par rapport à celui du BC, permet d'obtenir un béton sec à affaissement nul [1]. Alors que si on considère la teneur en eau efficace définie par la norme EN 206, cette teneur représente la différence entre la quantité d'eau totale introduite dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée par les granulats. On

définit alors la quantité d'eau totale comme étant la quantité d'eau ajoutée, y compris l'eau déjà contenue dans les granulats, ainsi que la quantité d'eau mélangée avec les adjuvants [20]. D'autre part, la quantité optimale d'eau à employer permet d'obtenir des résistances maximales [15]. Expérimentalement, cette quantité d'eau est dosée en fonction du mode et des moyens de serrage disponible sans être influencée par les autres conditions telles que les moyens de transport, moyens de malaxage, etc.

7.7. Les entraîneurs d'air

On opte couramment à l'utilisation des entraîneurs d'air malgré que la formation de vides d'air sphériques par l'emploi de ces agents dans les mélanges de BCR est plus difficile à produire que dans le cas des BC. Cette difficulté est expliquée par l'insuffisance de la quantité d'eau nécessaire pour entourer les bulles d'air formées dans un mélange de BCR. L'action recherchée par des agents entraîneurs d'air est de faciliter la formation des bulles en diminuant la tension de surface de l'eau et en fixant les bulles d'air formées durant le malaxage [2]. Par analogie avec l'idée de Baron et Olivier [16], un BCR courant sans ajouts d'agents entraîneurs d'air, contient couramment une quantité de bulles d'air dont le diamètre est généralement supérieur à un millimètre. Ces bulles d'air formées dans le BCR durci constituent le phénomène d'air occlus. En effet l'air occlus formé n'est pas comparable aux petites bulles qui sont fixées par l'ajout des entraîneurs d'air. Généralement, un BCR à air entraîné contient un volume de 0.01 à 0.1% d'air [2]

7.8. Les supers plastifiants

Les super plastifiants, tels que définis par Baron et Olivier [16], sont des produits défoulant qui dispersent très efficacement les grains de ciment, ainsi que les autres éléments fins et ultrafins. Les super plastifiants peuvent agir comme des réducteurs d'eau alors ses effets sont plus forts et très différents des réducteurs d'eau usuels. Les super plastifiants les plus utilisés sont chimiquement composés de sels de sodium ou de calcium de poly naphtalène sulfoné, de sel de sodium de poly mélamine sulfoné, de copolymère acrylate-ester ou de ligne sulfonâtes de grande pureté.

8. Procédés de réalisations du BCR

Les techniques de mise en œuvre des pavages en BCR, d'après Gauthier et al. [2], sont semblables à celles du BB puisqu'elles sont effectuées à l'aide des mêmes équipements employés pour la construction des revêtements en BB. Ces équipements sont, pour la plupart, conçus et adaptés à la mise en place du BCR. Le dosage (pondéral) et le malaxage du BCR sont faits soit dans des centrales fixes soit dans des grandes bétonnières mobiles sur chenilles. On cherche à ce que les constituants de base soient mélangés correctement afin de produire un BCR frais dont la surface de tous les granulats sera enrobée de pâte de ciment.

8.1. Exécution des joints

Afin de faciliter la dilatation et le retrait des dalles en BCR sous l'effet des conditions climatiques et pour permettre leurs déformations relatives, on réalise des joints entre celles-ci. Mais ces joints constituent eux-mêmes des problèmes pour les chaussées en BCR puisqu'ils

représentent, au fil du temps, les points de localisations des épaufrures et de pompages. C'est en ces points que des fissures, plus ou moins importantes, finissent généralement par se produire. Sur les chaussées rigides en BCR, on constate que des légères déformations des dalles à proximité du joint prennent naissance sous l'action des charges et s'accroissent avec le temps, plus vite à l'amont qu'à l'aval. Ce problème connu sous le nom de "marches d'escalier" est très présent sur les chaussées rigides au niveau des joints moulés et même sur des joints sciés [22].

En général, sur les chaussées rigides en BCR, les joints doivent être sciés après durcissement du béton afin d'obtenir un bon uni de chaussée (Figure 11). On distingue des joints de construction disposés longitudinalement et parallèles à l'axe de la chaussée. Ils correspondent généralement aux reprises du bétonnage. Les revêtements en BCR comportent aussi des joints de dilatation sous forme de coupures de la dalle sur toute sa hauteur. Ces joints ont des épaisseurs variant de 20 à 30 mm. L'uni est amélioré aussi avec des joints de retrait inclinés par rapport à l'axe de la chaussée (1/6) et irrégulièrement espacés pour éviter la résonance [22].



Figure I.10 : Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR.

8.2. Contrôle de qualité dans l'exécution des chaussées en BCR

Le processus de contrôle de la qualité exige un bon contrôle du compactage sur chantier. En effet un compactage insuffisant (< 97%) influe négativement sur les caractéristiques du BCR durci. Le contrôle de la compacité in situ est réalisé généralement par un Nucléo densimètre appelé aussi appareil Troxler (Figure 11).



Figure I.11 : Contrôle du compactage.

8.3. Ségrégation

Le BCR est un mélange raide à cause de son faible volume d'eau de gâchage et il est particulièrement sensible à la ségrégation en raison du faible volume de pâte (Figure 12). Le phénomène de ségrégation est fonction de la répartition granulaire, de la dimension maximale des granulats et des caractéristiques de la pâte. La ségrégation du BCR peut se produire à toutes les étapes de sa manipulation, lors du chargement, transport ou déchargement des camions à bennes basculantes.



Figure I.12 : Ségrégation des éprouvettes de BCR.

8.4. Caractéristiques de la surface

La fermeture de la surface de roulement du pavage en BCR représente un paramètre très important dans le choix des granulats et le processus de formulation des mélanges. En effet, l'uni d'une chaussée en BCR est fortement influencé par les procédures de mise en œuvre, par les variations de l'indice de serrage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les engins et le mode de compactage. Le confort au roulement est influencé par l'uni d'un revêtement en BCR qui reste, comme on l'a mentionné dans le (Figure 6). Un facteur limitatif

pour des applications du BCR où la vitesse des véhicules est un élément très important telle que pour les voies express et les autoroutes [1].

9. Transport du BCR

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. De plus, la benne du camion doit être propre [31].

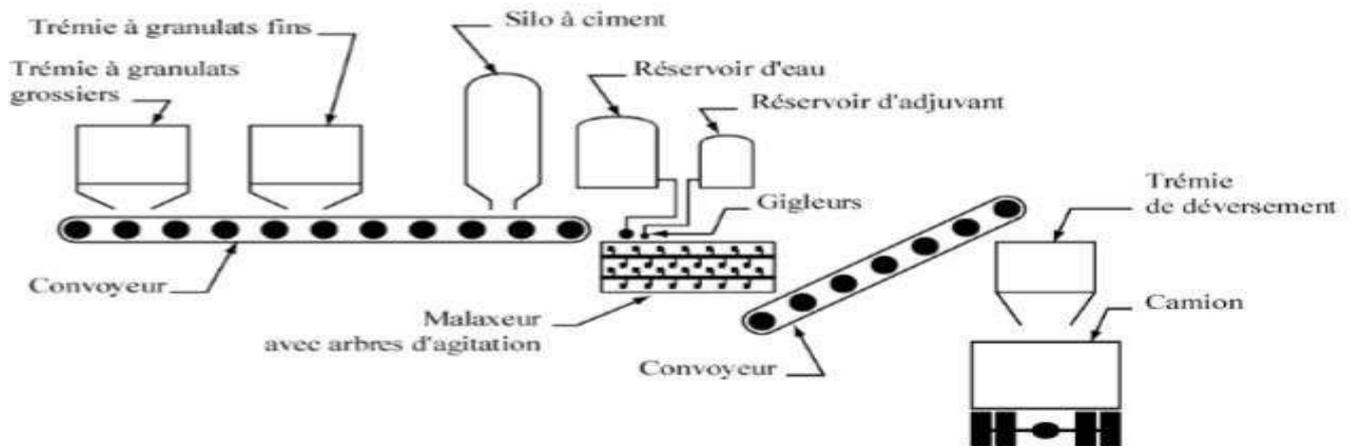


Figure I.13 : Schéma d'une centrale mobil.

Toutes les précautions doivent être prises pour éviter la ségrégation du BCR lors du chargement. Le BCR doit être déversé uniformément sur toute la longueur de la benne du camion : un tiers du chargement à l'avant, un tiers au centre et un tiers à l'arrière. Le déchargement dans la trémie du finisseur doit être réalisé en évitant la ségrégation du BCR.

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. [32]

Généralement, le temps de transport du BCR, depuis sa fabrication jusqu'à mise en place, est limité à 45 minutes. Le temps de transport devra être réduit si la température ambiante est supérieure ou égale à 27 °C.



Figure I.14 : Photographie d'une centrale mobile.

10. Mise en place du BCR

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 (FHPC). Les finisseurs doivent être équipés de barres de compactage afin de pré compacté 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.

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.

Peu importe le type d'équipement employé, il ne doit pas déconsolider la fondation granulaire ni abîmer la couche sous-jacente de BCR déjà compacté. De plus, la mise en place du BCR doit être réalisée de façon à éviter la ségrégation du BCR à la sortie du finisseur. À cet effet, la trémie du finisseur ne doit jamais être vidée complètement entre les déversements de béton. Les côtés de la trémie du finisseur ne doivent pas être relevés. Le niveau du BCR doit toujours être maintenu au-dessus de l'arbre de la vis de distribution de la table du finisseur (une épaisseur de 100 mm de BCR doit être maintenue dans la trémie [34]). Si une zone de ségrégation se produit, du BCR frais additionnel (passant 5 mm) doit être placé afin de corriger les défauts de surface.

La mise en place du BCR doit être réalisée de façon à assurer l'uniformité de la surface et l'épaisseur de la couche. Les finisseurs doivent être équipés de systèmes de guidage qui assurent l'uniformité du nivellement des couches de BCR. L'utilisation de lignes-repères en bordure des bandes de BCR permet de réaliser un profil de surface uniforme. Pour la première bande, deux lignes-repères sont requises de part et d'autre de la bande tandis qu'une ligne-repère est installée pour les bandes subséquentes. Le finisseur doit maintenir une vitesse

d'avancement constante afin d'éviter la formation d'ondulation. Un taux de déversement constant du BCR dans la trémie du finisseur permet de prévenir ce problème.

La vitesse d'avancement du finisseur influence le degré de compactage du BCR à la sortie de la table du finisseur [35]. Pour des vitesses d'avancement normalement employées, c'est-à-dire entre 2,2 à 3,7 m/min (0,13 et 0,22 km/h), on n'observe pas de diminution du degré de compactage à la sortie du finisseur. Par contre, pour des vitesses d'avancement de l'ordre de 5,5 m/min (0,33 km/h), le degré de compactage du BCR mesuré à la sortie du finisseur peut être réduit d'environ 8 % de la masse volumique humide de référence. En tout temps, le degré de compactage du BCR sur toute la largeur de la table du finisseur doit être d'au moins 80 % de la masse volumique humide de référence.

Lors de la construction, il est primordial de mettre en place le BCR de façon continue afin d'éviter les joints froids tant horizontaux que verticaux, favorisant ainsi l'adhérence entre les bandes adjacentes et entre deux couches horizontales respectivement. Généralement, le délai maximum de recouvrement entre deux bandes adjacentes de BCR ou entre deux couches est de 90 minutes depuis le contact initial eau-ciment. Toutes les surfaces doivent être maintenues constamment humide. Le délai de recouvrement devra être réduit si la température ambiante est supérieure ou égale à 27 °C.

Ce délai permet d'assurer une maniabilité suffisante au BCR frais pour réaliser des joints monolithiques entre les bandes et les couches. L'optimisation de la largeur et surtout de la longueur des bandes permet de respecter cette limite de temps. Une mise en place du BCR à l'aide d'au moins deux finisseurs placés en échelon permet de réduire le délai entre deux bandes adjacentes. La production du BCR doit cependant être suffisante pour alimenter les finisseurs. De plus, toute surface de BCR doit être maintenue humide en tout temps au moyen d'un jet d'eau en bruine afin d'assurer un lien adéquat.

Le délai maximum de recouvrement entre deux bandes adjacentes de BCR ou entre deux couches est de 90 minutes depuis le contact initial eau-ciment.

En tout temps, chacune des surfaces exposées du revêtement en BCR doit être maintenue humide jusqu'à l'étape du mûrissement final. Une technique efficace et économique employée sur plusieurs chantiers consiste à vaporiser de l'eau en bruine sans toutefois lessiver la surface et/ou à appliquer un agent retardateur d'évaporation. Cette vaporisation doit être réalisée sur les cotés de la bande de BCR et sur la surface du revêtement, ceci, jusqu'à ce qu'elle soit recouverte d'une couche ou jusqu'à l'application du produit de cure. Il est d'ailleurs recommandé de désigner, au début des travaux, une équipe de travail pour réaliser ces opérations.

Le BCR doit être maintenu humide en tout temps par l'application sur sa surface d'eau en bruine et/ou d'un agent retardateur d'évaporation jusqu'à l'étape du mûrissement final.

Avant le début des travaux, un plan de pose doit être établi afin de maximiser la mise en place du BCR. Ce plan de pose permet de vérifier si les délais de mise en place et de compactage sont respectés. Ce plan minimise également le nombre de joints froids, ce qui favorise l'adhérence entre les bandes adjacentes. Ce dernier doit inclure la séquence de mise en place, c'est-à-dire la direction des finisseurs, la largeur et la longueur des bandes. Si le

BCR est produit en centrale mobile, le plan de pose permet aussi de planifier l'installation de la centrale sur le site de même que l'emplacement des matières premières.

10.1 Équipements

a) Finisseur conventionnel

En règle générale, les finisseurs conventionnels tels que montrés à la (figure 15), permettent de mettre en place du BCR. Ils doivent par contre posséder certaines caractéristiques. Le degré de compactage du BCR à la sortie du finisseur doit être au minimum de 80 % de la masse volumique humide de référence. Il est fortement recommandé que le mode de traction de ce type de finisseur soit à chenille.



Figure I.15 : Finisseur conventionnel.

La largeur de la table de compactage du finisseur conventionnel est importante. Pour un finisseur muni d'un système d'extension avec système de vibration, il est recommandé de limiter la largeur d'une bande à 4,3 m. Avec les finisseurs dont les extensions ne sont pas équipées d'un système de vibration, il est préférable de les garder fermées, puisque les risques de ségrégation sont très importants (voir la figure 16).

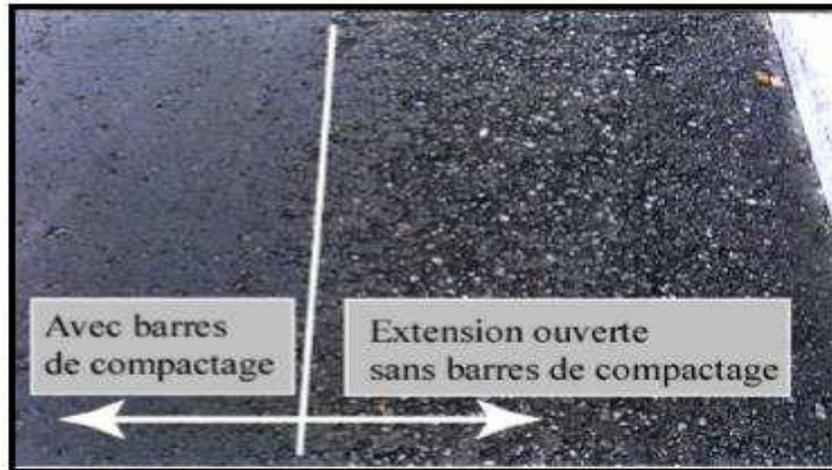


Figure I.16 :Finisseur conventionnel avec et sans barres de compactage .

Comme montré à la(figure 16), un finisseur à enrobé bitumineux possédant une très faible capacité de mise en place du BCR (faible énergie de compactage) provoque une forte ségrégation du BCR à la sortie du finisseur et une surface avec une texture très ouverte.

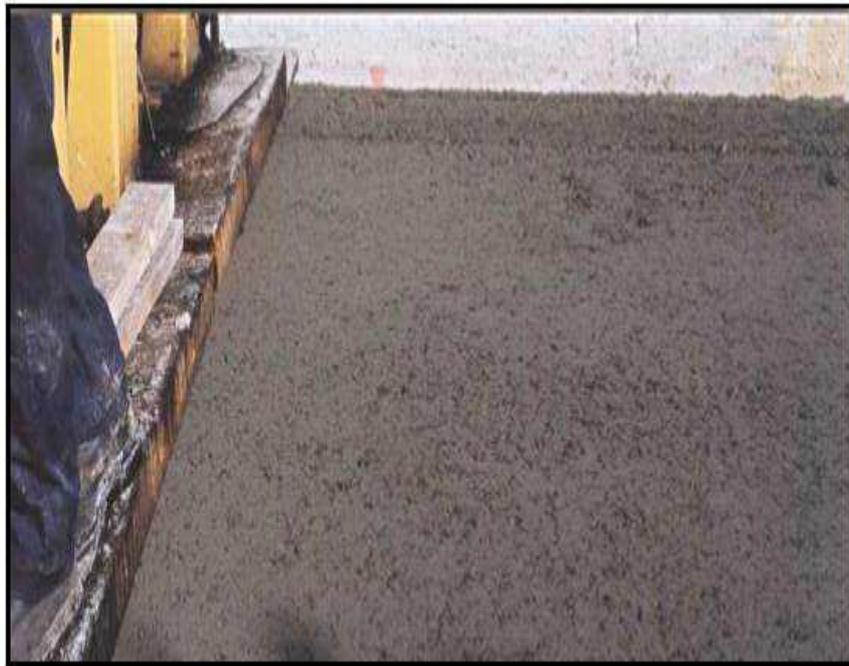


Figure I.17 :Finisseur conventionnel à très faible énergie de compactage .

B)Finisseur à haut pouvoir de compactage

Les finisseurs à haut pouvoir de compactage (FHPC) possèdent une grande capacité de mise en place (figures 18 et 17). Ils sont munis de double de barres de compactage en addition au système de vibration, ce qui permet d'atteindre un degré de compactage du BCR à la sortie du finisseur supérieur à celui de type conventionnel. Cette grande énergie de compactage des FHPC permet d'accroître le taux de mise en place. Le fabricant Allgemeine Baumaschinen-Gesellschaft (ABG) d'Allemagne manufacture ce type d'équipement.



Figure I.18 : Finisseur à haut pouvoir de compactage.



Figure I.19 : Texture du BCR avec un finisseur à haut pouvoir de compactage.

10.2 Compactage du BCR

Le degré de compactage du BCR à l'état frais influence ses propriétés mécaniques à l'état durci et notamment sa résistance à la flexion. Cette propriété du BCR détermine sa capacité à résister aux charges puisque le béton est moins résistant en traction qu'en compression. Comme montré à la (figure 20), la base du revêtement (fibre inférieure) est soumise à des contraintes de traction ou de compression selon le point d'application de la charge. Pour résister adéquatement aux efforts de traction à la base du revêtement (figure 20), il est essentiel de compacter le BCR à 100 % de la masse volumique humide de référence sur toute son épaisseur, c'est-à-dire jusqu'à la fibre inférieure.

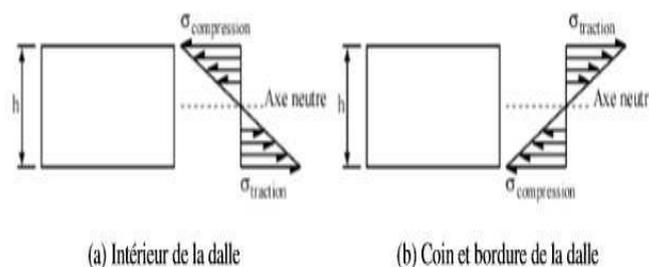


Figure I.20 : Distribution des contraintes au centre de la dalle selon le point d'application de la charge.

En place, le BCR doit atteindre un degré de compactage de 100 % par rapport à la masse volumique humide de référence. En pratique, une densité en place est considérée acceptable

si toutes les mesures sont supérieures à 99 % sans aucune valeur individuelle inférieure à 98 %. Les mesures de densité en place sont réalisées à l'aide d'un nucléo densimètre.

Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR. Le BCR frais doit être compacté à l'intérieur d'un délai maximum de 60 minutes mesuré à partir de son 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 bruine.

Le délai maximum pour compacter le BCR frais mis en place est de 60 minutes depuis le contact initial eau-ciment et les opérations de compactage doivent débuter, au maximum, 10 minutes après la mise en place

11. Propriétés des bétons

Le béton peut répondre à un grand nombre de spécifications : isolation thermique et phonique, aspect, durabilité, sécurité incendie... Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés :

- à l'état frais lorsqu'il est plastique et qu'on peut le travailler,
- à l'état durci quand sa forme ne peut plus être modifiée, ses caractéristiques continuent à évoluer

[37]

11.1. à l'état frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage, moule...) et à enrober convenablement les armatures. A la clé, une grande liberté de formes. [37]

- La consistance d'un béton est la grandeur qui caractérise son ouvrabilité
- La composition du béton et les moyens de sa mise en œuvre doivent être appropriés
- La teneur en eau doit être limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité

11.2. À l'état durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années [37].

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées

12. FORMULATION DES MELANGES DES BCR

Dans la technologie des Bétons Compactés au Rouleau (BCR) pour pavage, on utilise classiquement comme granulats, divers types d'agrégats, tels que les granulats concassés et les granulats roulés calcaires ou siliceux donnant lieu à des bétons de masse volumique de l'ordre 2100 à 2300 kg/m³. En outre, on a recours aussi à l'utilisation éventuelle des adjuvants, vu qu'ils confèrent physiquement et économiquement au BCR des avantages considérables. D'autre part, on utilise comme ajouts divers types de fines tels que les cendres volantes, les fumés de silice et les pouzzolanes, mais ces produits sont très coûteux et ne sont pas toujours disponibles dans certaines zones géographiques.

L'étude de la composition du BCR consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau. Cette optimisation a pour but de réaliser un BCR dont les qualités doivent être celles recherchées pour la construction routière. Le dosage des différents constituants dépend ainsi du type de matériau recherché et des constituants disponibles. La diminution de la porosité du squelette granulaire mène à la réduction de la teneur en particules fines, c'est-à-dire, à faire des économies sur le ciment, la fumée de silice, les cendres volantes, les laitiers et les autres matériaux fins. D'après Gauthier et Marchand [28], pour une résistance à la compression donnée, la forte compacité du squelette granulaire des mélanges de BCR nécessite donc une quantité moindre de liant comparativement à celle usuellement utilisée pour la fabrication des mélanges de BC. Une plus petite quantité de pâte est nécessaire pour lier tous les granulats.

L'objectif du processus de formulation d'un mélange de BCR est l'optimisation de la proportion des composants secs permettant d'obtenir les meilleures caractéristiques afin de se conformer à certaines exigences malgré les faibles teneurs en ciment de ces bétons. Cette proportion, doit être maintenue juste en dessous d'une certaine valeur à laquelle le passage du rouleau compacteur provoque des ondulations du BCR à l'état frais, et juste au-dessus d'un seuil où une consistance plus sèche du mélange produirait un accroissement de la ségrégation. En effet, la teneur en liant doit être essentiellement optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimum. Au cours de l'opération de formulation on doit ajuster aussi le rapport eau/liant du mélange de manière à obtenir une maniabilité optimale menant à l'obtention d'une densité en place optimale avec le rouleau compacteur. La teneur en eau optimale dépend des granulats, du type et de la quantité de liant. De plus, les proportions déterminées des différentes classes granulaires sont choisies afin d'atteindre la densité recherchée et à produire une surface fermée. En conséquence, la méthode de formulation doit avoir pour résultat un mélange de BCR le plus dense possible pour une maniabilité optimale [29].

On vise par l'application des méthodes de formulation du BCR, à partir de constituants donnés, de déterminer la composition optimale de ce matériau. Les objectifs du choix sont aussi bien techniques et économiques [30], on peut citer:

- la détermination des proportions optimales des différents constituants dans le mélange.
- l'incorporation des nouveaux matériaux dans la formulation du BCR.
- l'utilisation éventuelle des adjuvants dans la formulation des mélanges de BCR. Les caractéristiques recherchées sont principalement:
 - Une maniabilité convenable

- Des bonnes résistances mécaniques.
- Un minimum de retrait.

13. Durabilité du BCR

En se basant sur des études faites on peut comprendre que l'évaluation de la durabilité du BCR est notablement très intéressante pour la compétitivité de ce matériau. Cette caractéristique est démontrée par sa robustesse qui est la plus apparente au printemps, pendant le dégel. Le BCR a montré aussi une bonne résistance au ramollissement que subit sa couche de forme sous l'action du dégel et qui affecte sensiblement les revêtements en BB. Les études faites par L'American Association of State Highway and Transportation Officials ou l'AASHTO a démontré que près de 61 % des revêtements en BB subissent des dommages notables pendant cette période, comparativement à 5,5 % seulement des chaussées rigides en BCR ou en béton [13]. ERES indique aussi dans son rapport que les routes en BB exigent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contre, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton qu'après 12 ans [10, 14]. Du point de vue sécurité, l'expérience a montré que les conducteurs préfèrent la rigidité du BCR sur la souplesse du BB. En outre, les études faite par l'Université de l'Illinois, surtout celle intitulée "Safety Considerations of Rutting and Washboarding Asphalt Road Surfaces", a démontrée que la chaussée rigide assure, dans l'ensemble, une bonne adhérence et une distance d'arrêt plus courte que les revêtements en BB, surtout en cas de revêtements mouillés [4]. De point de vue énergie, les expériences menées par le motoriste Detroit Diesel [1.8] qui a fait entrer le type de chaussée dans le calcul du rendement énergétique des véhicules simulés par son logiciel Spec Manager, ont montré que l'estimation de la consommation de carburant d'un camion dans le cas d'une chaussée rigide est inférieure de 8 % à celle qu'on obtient dans le cas d'une chaussée en BB froid et de 17,5 % à celle d'une chaussée en BB chaud à 100 km/h. Le principe du logiciel c'est qu'il attribue un facteur correspondant au type de revêtement égal à 1 pour le type rigide, 1,2 pour type souple froid et 1,5 pour type souple chaud en maintenant toutes les autres variables constantes

14. TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE BCR

14.1. La formulation

Les études réalisées sur la technologie du BCR et notamment sur les différents constituants de ce matériau cherchent à définir un mélange répondant aux performances recherchées telles que la résistance à la compression, à la traction, à la flexion et au cisaillement. Ces études sont adaptées à la nature des matériaux disponibles. Elles sont focalisées sur l'identification des constituants, la formulation, la température de mise en place et de compactage et les méthodes de contrôles au laboratoire et sur chantier. Les principes de chaque méthode de formulation choisie sont basés sur le fait qu'un mélange de BCR doit généralement se conformer à certaines exigences. Selon Gauthier et al. [2], la teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre avec le minimum de dépenses, les propriétés mécaniques spécifiées. Pour les mélanges de BCR, le rapport eau/liant doit aussi être ajusté de façon à obtenir une maniabilité optimale permettant l'obtention d'une densité en place maximale avec les engins de compactage. La teneur en eau optimale dépend des granulats, du type et de la quantité de

liant. En outre, les proportions des différents composants granulaires doivent être fixées de manière à aboutir à la densité maximale et à produire un mélange plus compact [24].

Les études expérimentales qui sont faites par Gauthier et Marchand [1] et par Gauthier et al. [2] au CRIB à l'Université Laval au Canada ont pour objets de caractériser et d'évaluer des mélanges de BCR avec des dosages en ciment variant de 225 à 300 kg/m³. En effet, selon ces études, la majorité des méthodes de formulation utilisées pour les mélanges de BC ne sont pas automatiquement applicables pour les mélanges de BCR. Généralement, dans les formulations, on cherche à employer que des matériaux résistants, peu sensibles à l'eau, et susceptibles d'être compacté. Certaines méthodes de formulation de mélanges de BCR sont proposées par l'American Concrete Institute (ACI) [21]. Elles ont été développées en utilisant différentes approches et ont été employées dans beaucoup de projets routiers ou barrages. Elles sont, pour la plupart, basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques qui nécessitent la réalisation d'un nombre important de gâchées pour essais afin d'atteindre le mélange aux proportions optimales et meilleures caractéristiques [1, 2].

14.1.1. Méthode de formulation empirique

Il est tout à fait logique que les premières méthodes développées pour la formulation des mélanges de BCR sont des procédures empiriques [21]. Elles nécessitent la réalisation d'un certain nombre de gâchées en laboratoire avant d'obtenir le mélange de BCR possédant les caractéristiques recherchées. L'expérience a montré que dans certains cas, plus de 25 gâchées d'essais sont nécessaires pour obtenir le mélange optimal. Gagné [23] a indiqué qu'en passant sur chantier, il est parfois nécessaire de réaliser d'autres gâchées pour ajuster la maniabilité du mélange. Les méthodes empiriques sont des procédures simples à utiliser et relativement efficaces. Elles ne sont pas très flexibles et nécessitent beaucoup de temps et d'énergie pour corriger et adapter la formulation [25].

Les méthodes empiriques les plus couramment utilisées pour formuler des mélanges de BCR sont décrites par le Comité 325.10R-95 de l'ACI (American Concrete Institute) et comportent deux procédures [19, 21]:

- La méthode de formulation respectant les limites de maniabilité.
- La méthode de formulation adaptée aux méthodes utilisées en géotechniques.

14.1.2. Méthode de formulation respectant les limites de maniabilité

Cette méthode de formulation est proposée par l'ACI [21] qu'on l'applique pour la composition des mélanges de BCR afin d'atteindre un seuil caractéristique de maniabilité. Les dosages des différents constituants du mélange de BCR sont déterminés en suivant une procédure en trois étapes. La première étape comporte la réalisation d'une première série de gâchées d'essais uniquement de mélanges de mortier en faisant varier le rapport eau/ciment et le rapport sable/ciment afin de déterminer le volume de pâte minimum. Ensuite, on détermine la masse volumique de chaque mélange formulé. Dans la deuxième étape on fixera le rapport eau/liant selon les caractéristiques mécaniques recherchées (Figure 21). Une fois les rapports

eau/liant et sable/liant sont déterminés, on ajustera dans la troisième étape les dosages de granulats fins et grossiers afin d'atteindre le seuil de maniabilité voulue [25].

14.1.3. Méthode de formulation semi empirique

Le concept de la méthode semi-empirique, comme c'est expliqué par Gagné [23], est basé en même temps sur des données expérimentales et des formules empiriques. La formulation des mélanges de BCR à travers la méthode semi-empirique est basée sur le calcul du rapport du volume de pâte sur le volume de vides. L'application de cette méthode nécessite la confection de quelques gâchées d'essais au laboratoire. Le principe de cette méthode est basé sur l'hypothèse que le mélange de BCR optimal devrait avoir une quantité juste nécessaire de pâte pour remplir les espaces inter granulaires restants après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale par un processus de compactage. On dit que cette procédure de formulation est basée principalement sur une approche volumétrique. Pour un faible dosage en ciment, le volume de pâte est insuffisant et les vides laissés après le compactage vont affaiblir les caractéristiques mécaniques et augmenter la perméabilité du BCR. Alors que pour des forts dosages en ciment, le volume de pâte devient excessif et on augmentera par conséquent la chaleur d'hydratation ainsi que les coûts de fabrication sans amélioration significative des caractéristiques physiques ou amélioration de l'imperméabilité. La méthode semi-empirique, basée sur le volume de pâte optimal, est applicable seulement pour formuler des mélanges de BCR sans air entraîné car la composition des mélanges de BCR avec air entraîné est trop complexe à cause des effets du réseau des vides d'air sur les propriétés mécaniques.

15. Les ajouts

15.1 Les fillers calcaire

Les résultats d'études d'Ouellet [26] sur la formulation du BCR montrent que l'ajout de filler calcaire a un effet bénéfique sur les résistances mécaniques des mélanges. On peut donner l'exemple de l'ajout de 7% de filler calcaire par rapport à la masse totale des matériaux secs qui a permis de réduire 12% la porosité du BCR. Cette réduction de porosité traduite par une augmentation de compacité a permis par conséquent de diminuer légèrement le rapport eau/liant. D'autre part, les résistances mécaniques obtenues de ces mélanges de BCR avec ajout de filler de calcaire telles que la compression, la traction et la flexion sont supérieures à celles des mélanges sans ajout de fines. Cependant des teneurs de fines supérieures à 15% peuvent réduire significativement les résistances.

15.2 La fumée de silice et les cendres volantes

Les synthèses des travaux de recherches faites au CRIB de l'Université de Laval [2, 3] sur le comportement du BCR montrent que, pour le BCR fabriqué avec des ciments Portland, le développement des résistances à la compression est plus rapide que celui des mélanges confectionnés avec des ciments ternaires à bases de fumées de silices. Cependant après 28 jours de mûrissement, les résistances à la compression des deux types de BCR sont égales. Alors que les résistances à la flexion des mélanges avec un ciment ternaire sont légèrement inférieures à celles des mélanges de ciment portland. Les études réalisées sur l'influence de l'ajout des cendres volantes sous formes de taux de remplacement montrent que l'ajout de cendres volantes à teneur élevé (supérieur à 40%) influe fortement sur les résistances

mécaniques du BCR. Ces résistances diminuent avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes et surtout à jeune âge.

16. Caractérisation mécanique

L'objectif des méthodes de formulations c'est l'optimisation des dosages des constituants. En effet l'optimisation des proportions des matériaux secs des mélanges de BCR permet d'obtenir bonnes caractéristiques mécaniques malgré les faibles teneurs en ciment de ces bétons. Du point de vue rhéologie, le comportement mécanique du BCR est fortement influencé par le faible volume de pâte. On constate sur la structure granulaire que le squelette compact des mélanges de BCR contribue grandement aux améliorations des performances mécaniques comparées à celles des BC. La réduction de la porosité du squelette granulaire par densification permet la réduction de la demande en particules fines, telle que ciment, cendres volantes, laitiers, fumée de silice et autres matériaux fins [1, 26].

16.1. Maniabilité du BCR

A l'état frais, la maniabilité est la principale propriété du BCR, elle est définie comme étant l'indice de l'effort qui doit être fourni pour bien consolider un matériau frais. Elle représente aussi l'énergie de compactage nécessaire pour consolider adéquatement le matériau frais. Expérimentalement, la maniabilité d'un mélange de BCR est mesurée en déterminant le temps requis pour compacter avec une énergie normalisée une certaine quantité de BCR. La caractéristique de maniabilité du BCR est principalement fonction du dosage en pâte (eau et ciment). La bibliographie montre que la maniabilité du BCR doit être généralement comprise entre 40 et 90 secondes (temps VEBE) au moment de la mise en place [1].

16.2. Résistances à la compression et à la traction

Il est nécessaire de réaliser des essais de laboratoire sur le BCR afin de déterminer les valeurs numériques qui caractérisent le matériau au point de vue physique et mécanique. Ces essais permettent aussi de fixer les propriétés du matériau sous forme d'indices et de coefficients qui décrivent la manière de comportement sous l'action des différentes sollicitations et ceci soit dans le cas des charges d'exploitation normales, soit dans des circonstances exceptionnelles [26]. Marchand et Ouellet [1] ont montré dans leurs études que les propriétés de la matrice cimentaire et des inclusions granulaires expliquent les résistances à la compression élevées de ces mélanges. La résistance de la matrice cimentaire est fortement influencée par la compacité du mélange. Le faible dosage en ciment de ces mélanges produit une matrice cimentaire peu poreuse favorisant ainsi un bon comportement et des bonnes résistances. Ouellet et al. [26] a prouvé dans ses études expérimentales que les caractéristiques mécaniques du BCR sont aussi influencées par les propriétés des deux phases composant le mélange, qui sont la pâte de ciment hydratée et les granulats.

16.3. Résistance à la flexion

Pour le dimensionnement des dalles en BCR, la résistance à la flexion de ce matériau est le paramètre le plus important. D'après Gauthier et Marchand [1], cette résistance est généralement plus élevée que celle des BC si les mélanges sont formulés adéquatement en optimisant leur squelette granulaire. La bonne performance du BCR en flexion est directement influencé par la compacité du mélange dans le quel les granulats sont

parfaitement en contact les uns contre les autres. En effet la compacité granulaire s'oppose à la propagation des fissures qui nécessitera une énergie plus forte pour se propager. Couramment l'estimation de la résistance à la flexion du béton à partir de la résistance à la compression est déterminée par la relation suivante:

$$F_f = 0,6\sqrt{F_c}$$

Dans la quelle F_f est la résistance à la flexion et F_c est la résistance à la compression. Par contre, les travaux de recherche d'Ouellet ont permis d'établir la relation (6) qui est une relation empirique entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion des BCR à 28 jours [1, 26]:

$$F_f = (F_c)^{0.459}$$

16.4. Comportement à la fatigue

Agal et al. [27] ont montré, dans leurs études du comportement à la fatigue du BCR, que le BCR présente une résistance à la fatigue supérieure à celle du BC. Malgré cette différence, les méthodes de dimensionnement structural des pavages en BCR sont les mêmes que celles des pavages en BC. Ces études comportent une synthèse des structures types de chaussées en BCR. Le travail présente aussi le logiciel qui a été retenu pour le calcul des épaisseurs de pavage. Ce logiciel s'appuie sur les courbes de fatigue (Figure 21) d'un BCR et permet de configurer la majorité des véhicules pour dimensionner les épaisseurs de planchers industriels et de pavage supportant des charges importantes. Les quatre principaux facteurs de conception retenus dans l'obtention des structures types sont: la résistance en flexion du béton en termes de module de rupture, la capacité portante du sol support, les poids, les fréquences de passage et les caractéristiques des véhicules et enfin la période de conception. Pour comparer les divers types de fondation, Agal et al. [27] ont présenté dans leur travail deux structures caractérisées par deux valeurs de module de réaction du sol support soit 30 MPa/m et 60 MPa/m. Trois types de véhicules ont été pris en considération, soit les essieux de 8 tonnes et 14,5 tonnes pour les chaussées rurales et urbaines. Les véhicules lourds sont choisis pour les chemins industriels alors que les chariots élévateurs pour les planchers industriels. Dans cette étude, les auteurs ont fixé le nombre de passages autorisés pour tous les cas et ceci pour différentes épaisseurs de BCR. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du BCR se révèle une alternative très intéressante pour les chaussées à trafic lourd et particulièrement les réseaux artériels des villes. Les auteurs ont confirmé que les contraintes les plus critiques dans une dalle apparaissent quand la charge est appliquée en bordure ou près des rebords de la dalle. Ils ont pu déduire aussi que les effets s'amointrissent de façon significative au fur et à mesure que le point d'application de la charge se déplace vers l'intérieur de la dalle.

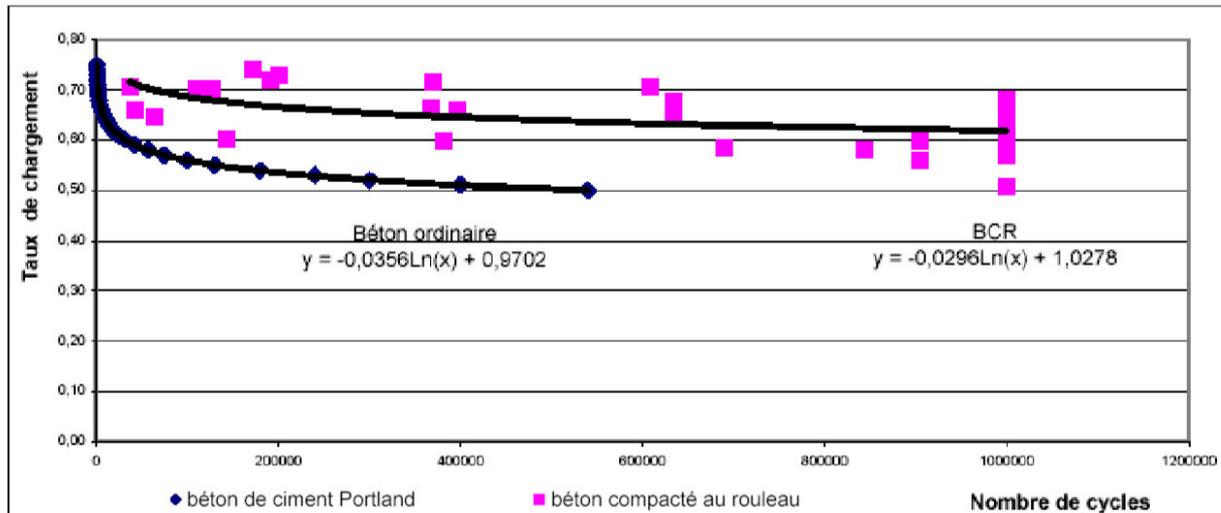


Figure I.21 : Courbe de fatigue du BCR et du BC (d'après Agal et al.).

17. Retrait du béton au laitier

Dans le béton préparés avec du laitier montrent un retrait au séchage plus élevé que le béton témoin. ILS ont attribué cela au plus grand volume de la pâte dans le béton (densité du laitier plus faible) si le remplacement du ciment se fait de manière massique, il est possible de compenser ce déséquilibre en augmentant le rapport G/S.

Le retrait plus élevé des bétons au laitier peut provenir de fait que les bétons au laitier durcissent plus tard que les bétons ordinaires. Alors le retrait du à la diminution des diamètres des pores du à l'hydratation peut simplement en être la cause. [27]

L'hydratation du ciment est une réaction complexe constituée de trois différents phénomènes, le développement des résistances, le dégagement la chaleur et la réduction du volume de la pâte du ciment hydrate.

Les Retrait :

Due aux :

- 1- changement de T° .
- 2- formation de glace ou produit expansif.

Cette diminution de volume provoque des fissurations [38]

- 1- Retrait plastiques : A jeune âge (pendant la prise) cause par une évaporation rapide de l'eau de surface
- 2- Retrait endogène : provoque par la contraction le Chatelier de fait que le volume des hydrate est largement < au volume des composants initiaux.
- 3- Retrait de séchage : provoque par l'assèchement progressif de la pâte de ciment

L'humidité :

100% L'eau libre dans les grands pores capillaire commence à s'échapper

90%-50% l'eau non libre qui s'évapore (retrait important). [39]

<50% L'eau absorbée sur les proies des pores s'évapore (diminution du volume de la pâte).

➤ 4. Retrait thermique :

Le retrait thermique qui est associé à la nature exothermique de la réaction d'hydratation du ciment qui résulte en une montée de la température et l'apparition de gradients thermique dans le béton la chaleur d'hydratation se dissipe plus au moins lentement selon l'épaisseur de l'élément de béton et la température ambiante . [40]

- Retrait de carbonatation :
- Résistance au gel-dégel des bétons au laitier :

18. Conclusion

Dans cette partie théorique, qui est une synthèse bibliographique, nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les bétons du (BCR) bétons compactés au rouleau. Les méthodes de formulation d'un BCR et la caractérisation à l'état frais et à l'état durci.

*Matériaux et
Procédures
Expérimentales*

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

1. INTRODUCTION

Cette partie expérimentale est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons mis en œuvre dans le cadre de cette étude et la description des méthodes d'essai usuelles.

2. MATERIAUX

2.1 LE CIMENT

Le ciment utilisé est un CRS-CEM I 42,5 N-SR3 produit par la société LAFARGE de Msila Ce ciment répond aux exigences des normes algériennes (NA 442) et européenne (EN 197-1), le CRS-CEM I 42,5 N-SR3 a un taux en $C_3A < 3\%$. Les propriétés chimiques et physico-mécaniques sont données dans les tableaux suivants :

Tableau II.1 : Certains citation des valeurs chimiques du ciment CRS-CEM I 42,5 N-SR3

Eléments	Valeur (%)
Perte au feu	0,5 à 3
Teneur en sulfates (SO_3)	1,8 à 3
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1,2 à 3
Teneur en chlorures	0,01 à 0,05
Résidus insolubles en	<0.7

Tableau II.2 : Composition minéralogique du ciment CRS-CEM I 42,5 N-SR3

Minéraux	Valeur (%)
C_3A	< 3
c_3S	60,90
C_2S	15,23
C_4AF	13,10

Tableau II.3 : Propriétés physico-mécaniques du ciment CRS-CEM I 42,5 N-SR3

propriétés	Valeur
Début de prise (min)	>60
Fin de prise (min)	240 à 400
Consistance normale (%)	25 à 28
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	3200 à 3800
Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
Expansion (mm)	≤2
Chaleur d'hydratation	<270 J/g
Compression à 2 jours (MPa)	≥10
Compression à 28 jours (MPa)	≥42.5

➤ **Avantage des ciments CRS- CEM I 42,5 N-SR3**

Tout en étant un ciment de haute performance Mokaouem protège les structures en béton armé contre les agressions chimiques de l'environnement externe.

2.2 LES GRANULATS

2.2.1 *Le sable*

Nous avons utilisé deux types de sable, un sable de la carrière de (Bouzegza) il est de couleur grise et de granulométries 0/3 et un sable de dunes de Boussaâda de granulométrie 0/1. Les caractéristiques principales requises pour les sables à bétons sont : la propreté, définie par l'essai d'équivalent de sable, la granularité et le module de finesse.

➤ **Analyse granulométrique :**

Tableau II.4 : Analyse granulométrique du sable 0/3.

Tamis (mm)	Poids cumulé (g)	Refus cumulé (g)	Passant (%)
5	0	0	100
4	25	3,62	96,4
2	245	35,5	64,5
1	419	60,72	39,28
0,5	518	75	25
0,25	578	83,8	16,2
0,125	614	89	11
0,063	630	91,3	8,7
F-T	630	91,3	8,7

Tableau II.5 : Analyse granulométrique du sable 0/1.

Tamis (mm)	Poids cumulé (g)	Refus cumulé (g)	Passant (%)
0,5	0	0	100
0,25	19	6,3	93,6
0,125	288	96	4
0,063	298	99,33	0,66
F-T	298	99,33	0,66

➤ **Sable corrigé**

Selon la loi D'Abram :

$$M_f = 2,89 \quad M_f(0/1) = 1,02 \quad M_f(0/3) = 3,48$$

$$\% S1 = (M_f - M_f(0/1)) / (M_f(0/3) - M_f(0/1)) = (2,89 - 1,02) / (3,48 - 1,02) = 76\%$$

$$\% S2 = 100 - S1 = 100 - 76 = 23\%$$

$$\text{Sable corrigé} = 76\% S1 + 23\% S2 = 100\% S$$

Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable corrigé.

Tamis (mm)	S1 (0/1)	S2 (0/3)	S
0,063	0,7	8,7	6,86
0,125	4	11	9,39
0,250	94	16	33,9
0,5	100	25	42,3
1	100	39	53
2	100	64,5	72,7
4	100	96	96,9
5	100	100	100

Tableau II.7 : Propriétés des sables.

	Sable 0/1	Sable 0/3	Sable corrigé
ESV %	73,55	74,50	74,03
Module de finesse	1,02	3,48	2,89
Masse volumique absolue	2.62 t/m³	2.73 t/m³	2.69
Masse volumique apparente	1.52t/m³	1.57 t/m³	1.55

2.2.2 Les graviers

Nous avons utilisé trois fraction de graviers : 3 /8 et 8/15 et 15/25

➤ **Analyse granulométrique :**

Tableau II.8 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis (mm)	Poids cumulé (g)	Refus cumulé (g)	Passant (%)
8	0	0	100
63	102,15	11,35	88,65
5	464	51,61	48,39
4	584	64,96	35,03
2	836	92,99	7,001
1	875	97,33	2,67
0,5	880	97,88	2,12
0,25	882	98,11	1,9
0,125	884	98,33	1,66
0,063	866	98,55	1,45
F-T	887	98,66	0,66

Tableau II.9 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

Tamis (mm)	Poids cumulé (g)	Refus cumulé (g)	Passant (%)
16	0	3,43	100
14	96	3,45	96,6
12,5	1147	41	59
10	2057	73,5	26,6
5	2284	99,5	0,5
4	3785	99,53	0,46
0,063	2787	99,6	0,4
F-T	2787	99,6	0

Tableau II.10: Analyse granulométrique du gravier 15/25

Tamis (mm)	Poids cumulé (g)	Refus cumulé (g)	Passant (%)
25	94	0	100
20	4022	55,9	44,1
16	6903	95,87	4,125
12,5	7148	99,28	0,72
0,063	7197	99,96	0,04
FT	7197	100	0

Tableau II.11: Caractéristiques des granulats

Essais	Masse volumique absolue	Masse volumique réelle	Module de finesse	Equivalent de sable	Teneur en fine	Valeur au bleu	Coeff. D'aplatissement	Los angeles	Coeff. d'absorption
abréviation	$P_a(t/m^3)$	$P_p(t/m^3)$	FM	SE(%)	F(%)	MB(g/kg)	FI(%)	LA(%)	WA₂₄(%)
Sable 0/1	2,62	1,52	1,02	73,55	0,5	0,84			0,15
Sable 0/3	2,73	1,57	3,48	74,5	11,65	0,74	-	-	0,25
Gravillon 3/8	2,75	1,15	-	-	1,71	-	11	(10/14) 24	0,40
Gravillon 81/5	2,75	1,15	-	-	0,87	-	15		0,43
Gravillon 15/25	2,75	1,15	-	-	0,50	-	8		0,46

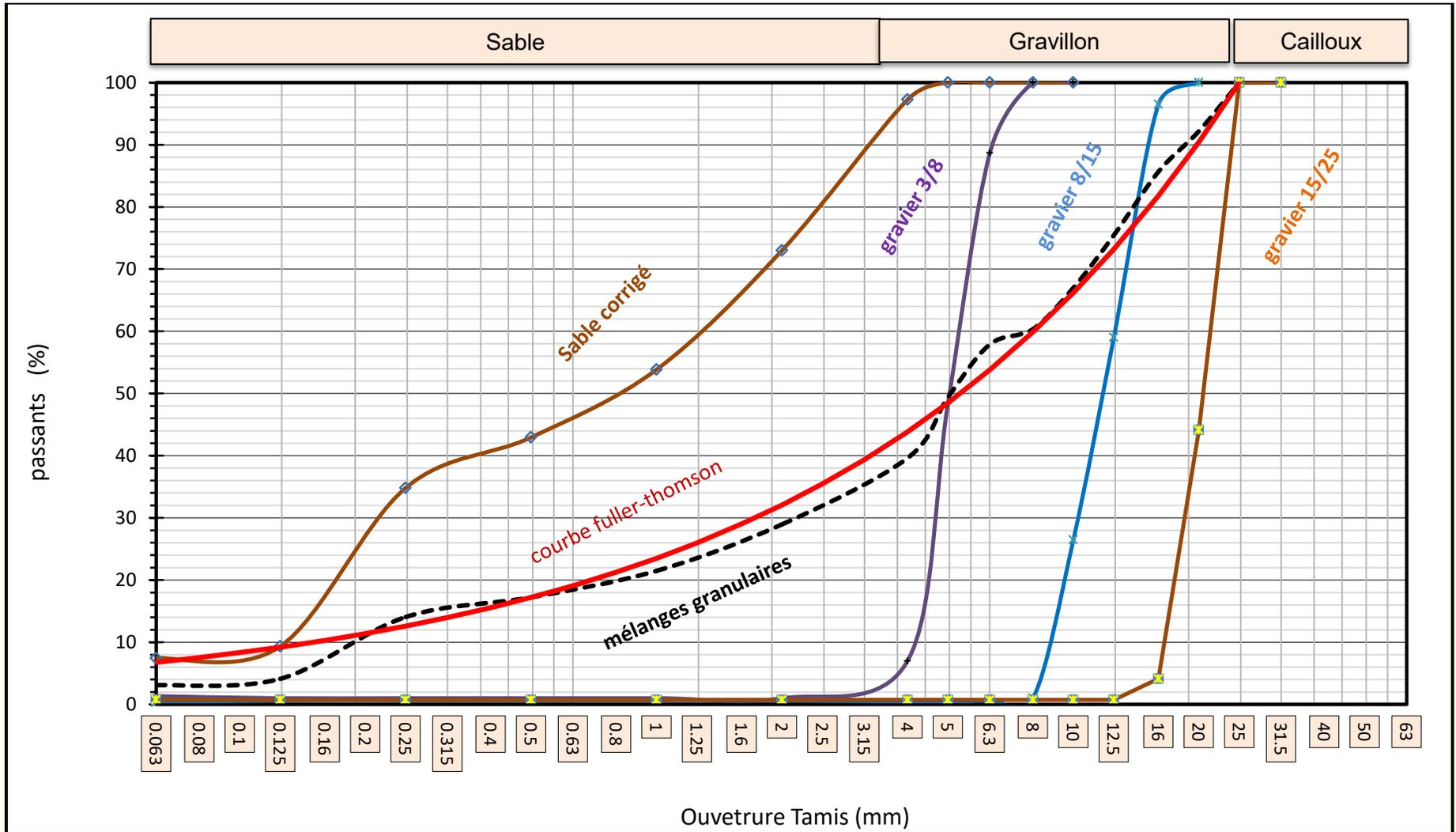


Figure II.1: Courbes d'analyse granulométrique des granulats (Méthode Fuller – Thomson).

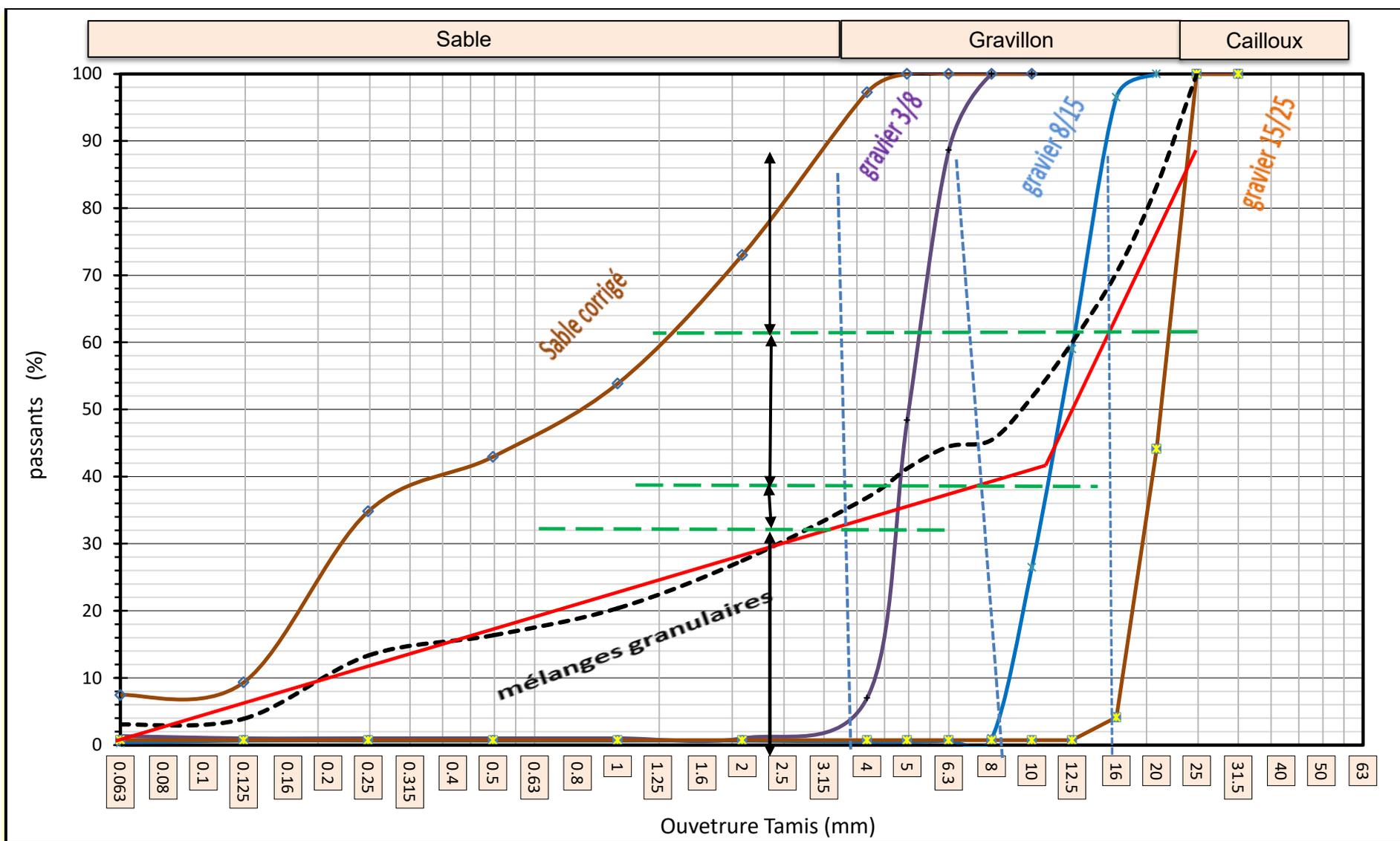


Figure II.2: Courbes d'analyse granulométrique des granulats (Méthode Dreux – Gorisse).

On remarque que les courbes granulométriques des sable et graviers 3/8 et 8/15 et 15/25 sont bien présentant une granulométrie continue.

2.3 L'ADJUVANT SUPER PLASTIFIANT

Nous avons utilisé un super plastifiant CHRYSO®Fluid Optima 220 A fabriqué par l'entrepris Granitex.

C'est un adjuvant de nouvelle génération, à base de poly carboxylate modifié. Est destiné à créer une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Est particulièrement adapté à la formulation de bétons auto-plaçant homogènes, avec des valeurs de résistances élevées.

Informations indicatives

- ❖ Nature : liquide
- ❖ Couleur : Brun vert
- ❖ Densité (20° C) : 1.050 ± 0.010
- ❖ pH : 5.0 ± 2.0
- ❖ Extrait sec (halogène) : $31.2 \% \pm 1.5 \%$
- ❖ Extrait sec (EN 480-8) : $31.2 \% \pm 1.5 \%$
- ❖ Durée de vie : 18 moi

Domaines d'application

- ❖ Tous types de ciment
- ❖ Béton auto-plaçant
- ❖ Béton auto-nivelant
- ❖ Béton de consistance supérieure à 100 mm au cône

Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,3 à 2,0 kg pour 100 kg de ciment. Le dosage optimum sera déterminé par des essais industriels. Il est courant de doser ce produit à 0,8 % du poids du ciment. Ce produit peut être incorporé dans l'eau de gâchage ou en différé sur le béton.

- ❖ Ce produit satisfait aux exigences de la norme NF EN 934-2 « ADJUVANTS DU BETON ».

2.4 ENTRAINEUR D'AIR

Le MEDA-AIR, est un entraîneur d'air sous forme liquide à diluer dans l'eau. Le MEDA-AIR permet d'augmenter la quantité d'air occlus dans le béton en y formant des micros bulle d'air uniformément réparties qui protègent le béton contre le cycle gel/dégel.

Domain application

- ❖ Béton soumis aux cycles de gel dégel
- ❖ Bétonnage par temps froid
- ❖ Ouvrages exigeant de hautes résistances aux digues.
- ❖ Béton extrudés
- ❖ Utilise Our les bétons en milieu agressifs.

Propriétés**a) sur béton frais:**

- ❖ augmentation de la cohésion
- ❖ diminution de la ségrégation
- ❖ amélioration de la maniabilité

b) sur béton durci :

- ❖ amélioration des résistances aux cules gel dégel
- ❖ amélioration de l'aspect au démoulage.

Caractéristiques

- ❖ former..... liquide
- ❖ densité..... 1,00 ($\pm 0,01$)
- ❖ pH.....7-8
- ❖ ions chlores..... <1%

Mode d'emploi

Mélanger le MEDA-AIR avant son utilisation afin de l'homogénéiser. MEDA-AIR est introduit dans le malaxeur mélangé à l'eau de gâchage.il est recommandé d'ajouter l'adjuvant au béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Ne pas introduire l'entraîneur d'air sur le composant sec du béton.

Le MEDA-AIR Peut être utilise en association avec les plastifiants et superplastifiant.

Dosage

Plage de dosage recommandée :

0,01% à 0,1% du poids de ciment, soit 0,01 litre à 0,1 litre par 100 kg de ciment.

Le dosage dépend de la quantité d'air occlus désirerais aussi de la composition de béton et de ses caractéristiques.

Il est recommandé de procéder à des essais préalables afin de déterminer le dosage optimal.

Tout sur dosage entrainera des pertes de résistance.

2.5 L'EAU DE GACHAGE

L'eau de gâchage utilisée est eau potable du robinet, exempte de toutes impuretés pouvant altérer la qualité du béton, elle convient parfaitement pour la confection de béton BCR.

Suivant les spécifications de la norme NF P 18-211, l'eau étant potable, elle est considérée comme appropriée pour la confection du béton et ne nécessite aucun essai, l'analyse n'est pas nécessaire.

2.6 LES AJOUTS MINERAUX :

On a utilisé un seul type d'ajout : le laitier de haut fourneau.

➤ le laitier de haut fourneau :

le laitier de haut fourneau utilisé est un laitier granulé, du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (W. d' Annaba), sa surface spécifique est 7000 cm² /g .

Tableau II.12 : Composition chimique du laitier.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	PF
45,90	17,10	10 ,60	10,20	3,40	1,50	1,80	9,1

Tableau II.13 : Autres caractéristiques du laitier.

Forme	Couleur	Densité absolue	Absorption
poudre	blanc	2, 90	10%

3. METHODES D'ESSAI

3.1 ESSAI DE VEBE : (NA 5103/2011)

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

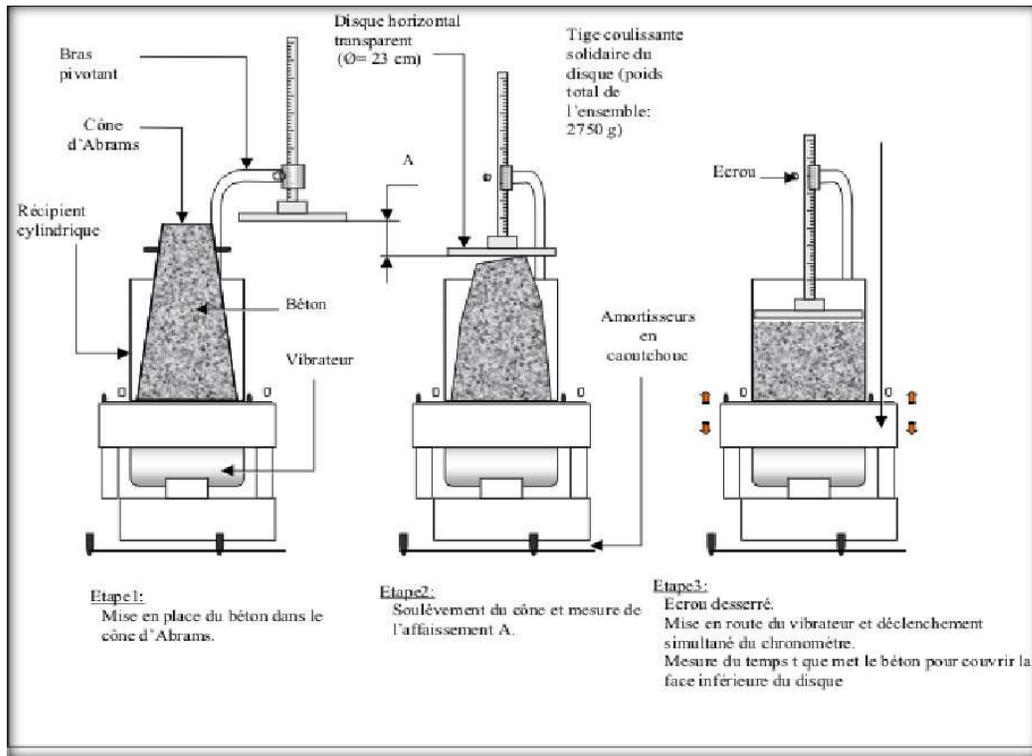


Figure II.3: Mesure de la consistance (Essai Vébé).



Figure II.4: Appareil d'Essai Vébé

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

3.2 PROCTOR NORMAL ET MODIFIE (NA 5262 : 2007)

Machine conçue pour le compactage automatique d'éprouvettes PROCTOR et CBR. Elle garantit un degré de compactage parfait et la répétitivité des résultats.

La base du compacteur incorpore un système qui fait tourner le moule tandis que le mouton compacte l'échantillon, le mouvement horizontal de la base permet que les coups soient distribués uniformément sur toute la surface de l'échantillon.

Le but de cette essai et de définir les quel de mélange a la masse volumique la plus grande.



Figure II.5: Machine Proctor normal et modifié

- D'abord On a pesé deux mélange (sable-gravie3/8-gravie8/15-gravie15/25 à l'état sec) pour chacune des méthodes du (Dreux Gorise) et (Fuller et Thomson) .



Figure II.6: Eprouvette d'une partie de mélange.

❖ Pour **Dreux Gorisse** :

$$M_{\text{moy}} = 15380 \text{ g}$$

$$m_{\text{moul}} = 10480 \text{ g}$$

$$m_{\text{final}} = 4900 \text{ g}$$

$$\text{La masse volumique} = 4900/2100 = 2,33 \text{ g/m}^3$$

❖ Pour **Fuller et Thomson** :

$$M_{\text{moy}} = 15521 \text{ g}$$

$$m_{\text{moul}} = 10480 \text{ g}$$

$$m_{\text{final}} = 5041 \text{ g}$$

$$\text{La masse volumique} = 5041/2100 = 2,4 \text{ g/m}^3$$

3.3. Formulation des mélanges de béton compacté au rouleau

On à déterminer la masse de chaque constituant pour le beton compacte au rouleau avec la curve fuller-thomson permettra de avoir une squelette granulaire plus dense possible .

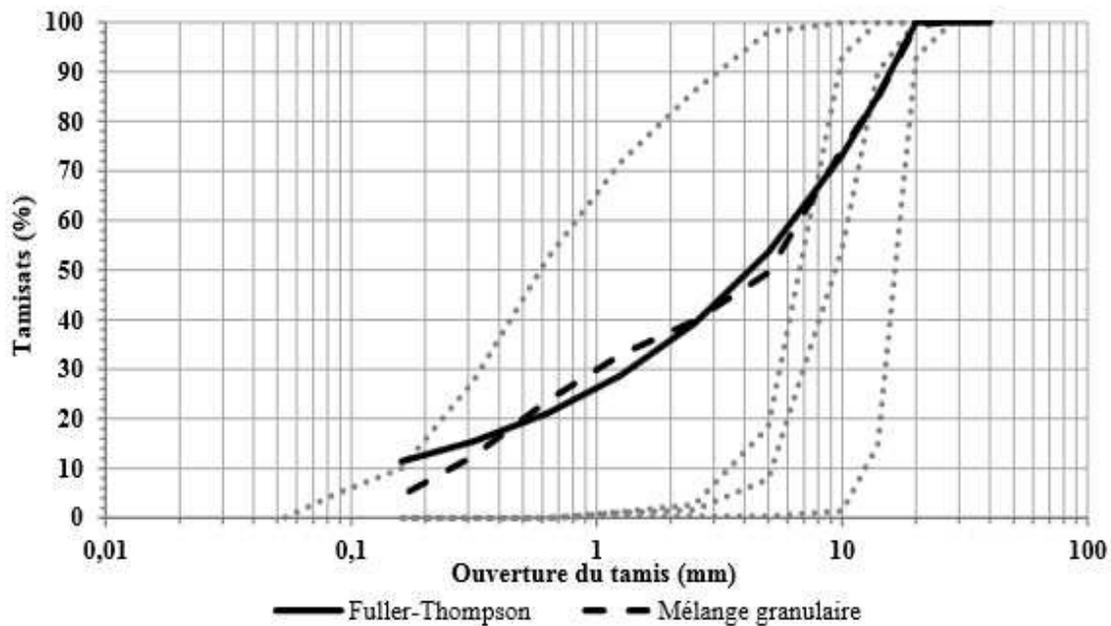


Figure II.7 : optimisation des mélanges granulaires

Ainsi, plus la courbe du mélange granulaire se rapproche de la courbe de Fuller-Thompson, plus la compacité du mélange est optimale. Pour ce faire, la somme des écarts au carré des chacun des tamis est calculé. Un mélange granulaire présentant une somme des écarts au carré de zéro a donc une compacité optimale. Aux alentours de 100, elle est considérée comme très bonne et elle est acceptable jusqu'à 200. La figure

ci-dessus présente des exemples typiques d'écart au carré provenant de certains mélanges granulaires effectués dans le cadre de ce projet. Ceci permet de mieux illustrer ce que représentent une bonne optimisation granulaire et une moins bonne.

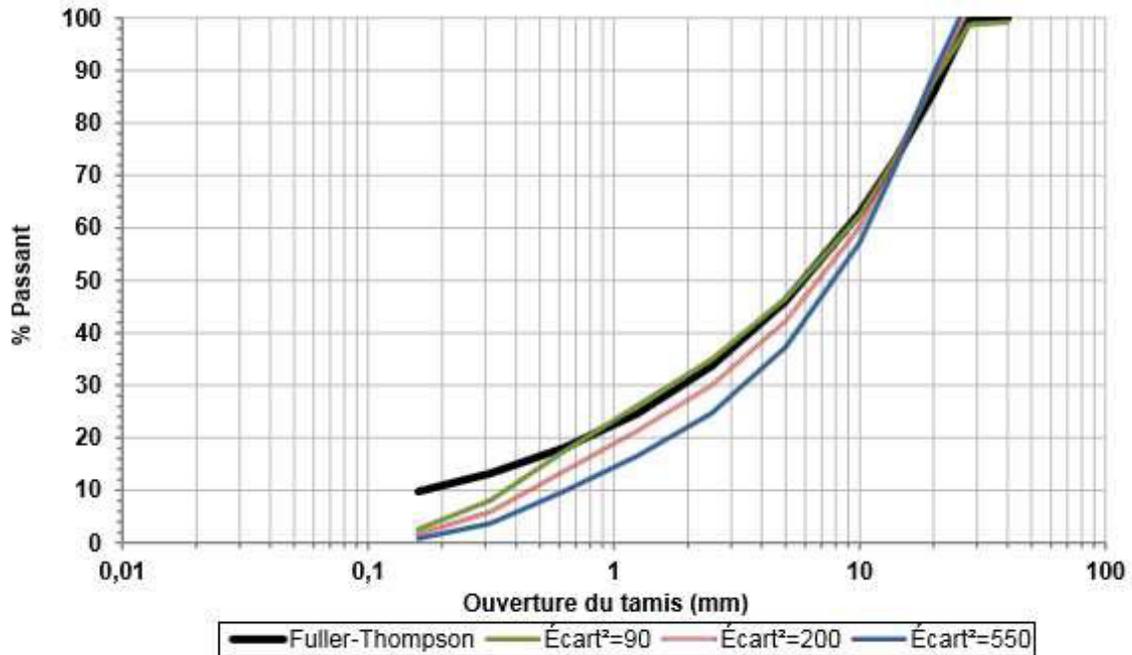


Figure II.8 : exmples d'ecarts au carrée obtenus lors d'une optimisation granulaire .

- La méthode du volume optimal de pâte a été adaptée au cas des BCR avec air entraîné
 - fOn doit viser approximativement $4 \pm 1\%$ d'air dans le BCR frais (pressiomètre)
 - Résistance mécanique peu ou pas pénalisée • Gain de maniabilité • Bonne durabilité
 - fOn tire profit du gain de maniabilité pour diminuer le dosage volumique du liant :
 - **$V_{pa} = V_{liant} + V_{eau} + V_{air\text{pressiomètre}}$**

4. METHODE MATRICIELLE (MODELE DE REGRESSION)

Dans le but d'optimiser la composition des bétons d'étude, on a utilisé ainsi la méthode de planification d'expérience, pour ce faire on se sert du diagramme suivant :

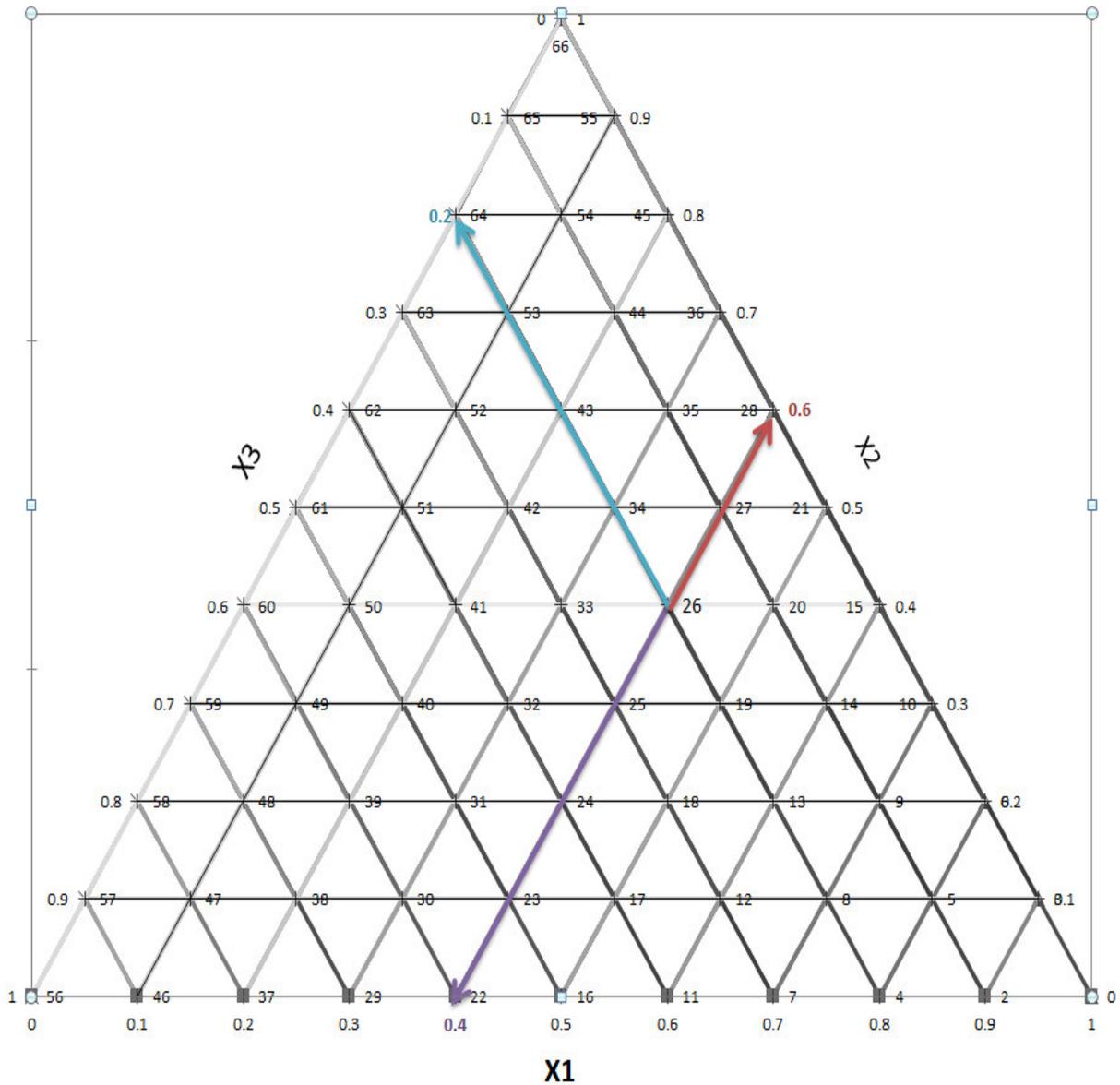


Figure II.9: Diagramme ternaire type.

X1 : Super plastifiant = 0.4

X2 : Entraîneur d'air = 0.6

X3 : le laitier = 0.2

- **Formule de régression :**

-

$$Y=F(X_1, X_2, X_3 \dots\dots\dots,X_n).$$

$$Y=a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + b_{12}X_1X_2 (X_1 - X_2) + b_{13}X_1X_3 (X_1 - X_3) + b_{23}X_2X_3 (X_2 - X_3) + a_{123}X_1X_2X_3$$

- **Avec:**

$$\sum_{i=1}^n X=1 \quad \text{et} \quad 0 \leq X \leq 1$$

- **Les coefficients sont :**

$$a_1 = y_1;$$

$$a_2 = y_2;$$

$$a_3 = y_3;$$

$$a_{12} = 9/4 (y_4 + y_5 - y_1 - y_2);$$

$$a_{13} = 9/4 (y_6 + y_7 - y_1 - y_3) ;$$

$$a_{23} = 9/4 (y_8 + y_9 - y_2 - y_3) ;$$

$$b_{12} = 9/4 (3y_4 - 3y_5 - y_1 + y_2) ;$$

$$b_{13} = 9/4 (3y_6 - 3y_7 - y_1 + y_3) ;$$

$$b_{23} = 9/4 (3y_8 - 3y_9 - y_2 + y_3) ;$$

$$a_{123} = 27y_{10} - 27/4 (y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9) + 9/2 (y_1 + y_2 + y_3) ;$$

Tableau II.14 : Valeurs conventionnelles.

Béton	Composants			Propriétés
	X1	X2	X3	Y1
1	1	0	0	Y1
2	0	1	0	Y2
3	0	0	1	Y3
4	2/3	1/3	0	Y4
5	2/3	0	1/3	Y5
6	1/3	2/3	0	Y6
7	1/3	0	2/3	Y7
8	0	2/3	1/3	Y8
9	0	1/3	2/3	Y9
10	1/3	1/3	1/3	Y10
11	Béton de référence			

Où :

VR : valeur réelles déterminée à partir de l'équation suivante :

$$\mathbf{VR} = \mathbf{min} + (\mathbf{max} - \mathbf{min}) * \mathbf{VC}$$

min : Le minimale de chaque composant.

max : le maximale de chaque composant.

VC : valeur conventionnelles (donne).

Tableau II.15 : Valeur réelles.

Béton	Laitier		SP		EA	
	VC	VR	VC	VR	VC	VR
1	1	20	0	0,3	0	0,01
2	0	10	1	2	0	0,01
3	0	10	0	0,3	1	0,1
4	2/3	16,67	1/3	0,87	0	0,01
5	2/3	13,33	0	1,43	1/3	0,01
6	1/3	16,67	2/3	0,3	0	0,04
7	1/3	13,33	0	0,3	2/3	0,07
8	0	10	2/3	1,43	1/3	0,04
9	0	10	1/3	0,87	2/3	0,07
10	1/3	13,33	1/3	0,87	1/3	0,04
11	Béton de référence					

On a 10 bétons d'étude le 11^{ème} béton de contrôle (sans : Laitier, Super Plastifiant et Entraîneur d'Air).

- Proportion de laitier (LHF) : 10 à 20% de la masse totale du ciment.

- Super plastifiant (SP) : 0,3 à 2% de la masse totale du ciment.
- Entraîneur d'air (EA) : 0,01 à 0,1% de la masse totale du ciment.

Le dosage de ciment = 300 Kg.

Tableau II.16 : Composition des bétons (1 m³).

Gâchée	Ciment	Sable 0/3	Sable 0/1	Gr 3/8	Gr 8/15	Gr 15/25	Eau	SP	EA	LHF
1	239,07	635	157	424	537	288	105	0,9	0,03	60
2	263,97	635	157	424	537	288	105	6	0,03	30
3	268,8	635	157	424	537	288	105	0,9	0,3	30
4	247,35	635	157	424	537	288	105	2,61	0,03	50,01
5	255,68	635	157	424	537	288	105	4,29	0,03	40
6	248,97	635	157	424	537	288	105	0,9	0,12	50,01
7	258,89	635	157	424	537	288	105	0,9	0,21	40
8	265,59	635	157	424	537	288	105	4,29	0,12	30
9	267,18	635	157	424	537	288	105	2,61	0,21	30
10	257,27	635	157	424	537	288	105	2,61	0,12	40
11	300	635	157	424	537	288	105			

5. PREPARATION DES EPROUVETTES

Toutes les formulations étudiées ont été confectionnées avec des moyens matériels identiques et dans des conditions similaires suivant le même mode opératoire comme suit :

❖ malaxage :

Le béton a été malaxé dans une bétonnière de capacité de 60l, selon la séquence de malaxage suivante :

1. introduction dans l'ordre des fractions de gravies 15/25, 8/15, 3/8, puis le sable (mélange) ensuite le ciment et l'ajout minéral.
2. Malaxage à sec des ingrédients pendant 2min.
3. Introduction de 90% d'eau de gâchage et malaxage pendant 1 min.
4. Ajoute du super plastifiant.
5. Ajout le entraîneur d'air avec du reste de l'eau de gâchage.
6. Malaxage pendant 2 min.



Figure II.10: Malaxage du béton.

❖ **Moulage :**

A la fin du malaxage le béton est déverser dans deux types moules :

1. Cubiques (15×15×15cm) nécessaires pour essais de la compression à 2 ,7 et 28 j et de perméabilité à 28 j.
2. Cylindrique (16×32cm) nécessaires pour les essais de fendage à 7 et 28 j et d'ultrason à 28 j.



Figure II.11: Eprouvette Cylindrique (16×32 cm)

3. Les parois des moules sont graissées avec un produit huileux facilitant le démoulage.

Le béton compacté au rouleau (BCR) est mis en place dans les moules en deux couches. Chaque couche est piquée à la tige métallique 25 coups puis compactée 90 secondes sous charges de 13 kg à la table vibrante.



Figure II.12: Préparation des moules du BCR.

Cette pratique vise à compacter le béton pour assurer une homogénéité du béton. A la fin on procède au surfaçage de chaque moule par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure de celui-ci, pour enlever l'excès de pâte et avoir une surface bien plane.

❖ **Conservation des éprouvettes :**

Les éprouvettes seront alors marquées convenablement avec un marqueur résistant à l'eau. La légende suivante a été adoptée :

Tableau II.17 : Notation des éprouvettes.

N°	Laitier	SP	EA
1	20	0,3	0,01
2	10	2	0,01
3	10	0,3	0,1
4	16,67	0,87	0,01
5	13,33	1,43	0,01
6	16,67	0,3	0,04
7	13,33	0,3	0,07
8	10	1,43	0,04
9	10	0,87	0,07
10	13,33	0,87	0,04
11	Béton de contrôle		

❖ Démoulage et cure du béton durci

Le démoulage est effectuée 24h après le moulage, il sera fait grâce à un appareil à air comprimé en appliquant une pression d'air à travers un tuyau dans les trous des moules cubiques et cylindriques sera manuellement avec les clés 18, cette force nous permettra de démouler notre béton, encoure fragile, en préservant sa forme et sans l'endommager.



Figure II.13: Appareil à air comprimé pour démoulage.

Ces éprouvettes marquées seront alors immergées dans l'eau à $24\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, pour être conservées convenablement jusqu'au moment de l'essai.



Figure II.14: Conservation des éprouvettes.

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié les caractéristiques des matériaux utilisés dans les différentes formulations de béton (BCR), que nous avons optimisé leur composition pour avoir des résultats répondants à leur caractéristiques requises conformément aux normes respective

*Présentation et analyse
des Résultats expérimentaux*

PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on a étudié les différents résultats des essais rhéologiques et mécaniques sur le béton compact au rouleau à base de trois d'ajout (laitier, super plastifiant) à partir de ces résultat des interprétations seront également présentés.

2. FORMULATION DES BETONS

Etudier la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles projetées.

Application de la méthode Fuller Thomson

On a choisi :

- Résistance projetée pour le béton 20 MPa
- Utiliser un seul ciment CEM I – 42,5 N (300 kg/m^3)
- $D_{\max} = 25 \text{ mm}$
- Le rapport E/L = 0,35

Facteurs à prendre en considération

- $V_p/V_{vc} = 1,00$
- Rapport pâte/mortier = 0,39
- pourcentage de mortier excède celui des vides par 5 à 10 %.
- Le pourcentage de gros granulats est calculé par la soustraction de la proportion de mortier de 1m^3 de béton.
- Le pourcentage d'air entrainé est estimé 1,5%.
- Le laitier avec une finesse sur tamis $80\mu\text{m} = 0$.

- Détermination du temps **Vébé** à l'aide d'une gâchée d'essai. Si la maniabilité n'est pas satisfaisante, la quantité d'eau doit être corrigée.

Composition du BCR :

- 300 kg/m^3 du ciment
- $E/L = 0,35$
- Les ajouts cimenteries ;
 - ✓ Laitier du 10 à 20 %
 - ✓ Super plastifiant du 0,3 à 2 %
 - ✓ Entraîneur d'air du 0,01 à 0,1 %

Détermination de la masse de chaque constituant :

$$V_{pa} = V_{liant} + V_{eau} + V_{air} \text{ pression mètre}$$

À l'aide du pression mètre, on a trouvé $V_{air} = 48 \text{ l/m}^3$

$$E/L = 0,35 \text{ donc } E = 105 \text{ l/m}^3 \quad C = 300 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{pa} = 105 + (300/3.1) + 48 = 249 \text{ l/m}^3$$

$$G+S = 1000 - 249 = 750.53 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Sable } 0/1 = 750.53 * (8/100) * 2.62 = 157 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Sable } 0/3 = 750.53 * (31/100) * 2.73 = 635 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Gravier } 3/8 = 750.53 * (21/100) * 2.75 = 424 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Gravier } 8/15 = 750.53 * (26/100) * 2.75 = 537 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Gravier } 15/25 = 750.53 * (14/100) * 2.75 = 288 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

3. BETON A L'ETAT FRAIS

3.1 MASSE VOLUMIQUE

Dans l'ensemble, les masses volumiques des bétons à l'état frais sont presque identique, sauf pour les bétons **6** (LHF = 16.67, SP = 0.3 et EA = 0.04) ; **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et **9** (LHF = 10, SP = 0.87 et EA = 0.07).

Tableau III.1: Masse volumique à l'état frais des différents bétons.

Béton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MV (kg/m ³)	2478	2549	2488	2541	2508	2400	2491	2219	2288	2480	2525

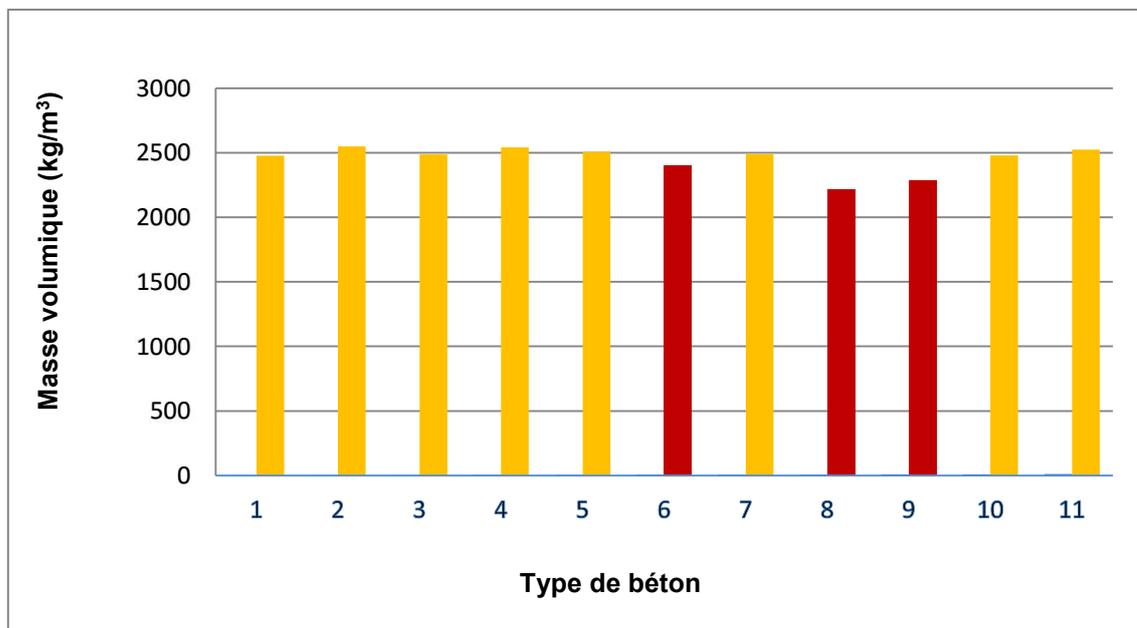


Figure III.1 : Masse volumique à l'état frais des différents bétons.

3.2 AFFAISSEMENT AU CONE D'ABRAMS

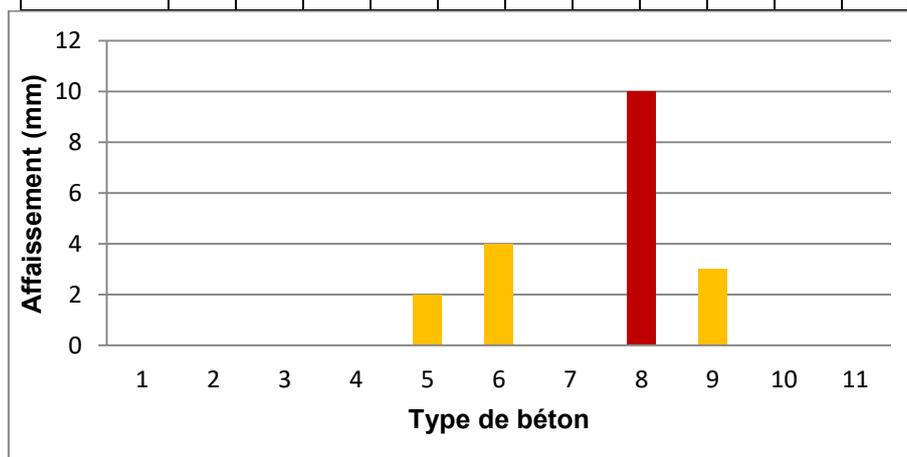
Dans l'ensemble, l'affaissement des bétons à l'état frais nuls ou presque, sauf pour le **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) où l'affaissement est 10 mm, ce qui permet de le classer parmi les bétons ferme très secs et peu maniable, destiné à la fabrication de routes fondations à armature légère.

Tableau 2 : Classification des bétons selon l'affaissement.

Classe	Affaissement en mm	Propriété du béton frais	Utilisations
S1	10 – 40	Ferme très secs et peu maniable	Fabrication de routes fondations à armature légère
S2	50 – 90	Plastique à humidité moyenne et à maniabilité moyenne	Béton armé normal placé avec vibration

Tableau III.3- Affaissement des différents bétons (mm).

Béton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ac (mm)	0	0	0	0	2	4	0	10	3	0	0

**Figure III.2** : Evolution de l'affaissement des différents bétons (mm).

3.3 TEMPS VEBE

Dans l'ensemble, le temps Vébé des bétons sont différents, le béton **8** (LHF = 10, SP = 1,43 et EA = 0,04) enregistre la plus faible valeur (8 s) ; **2** (LHF = 10, SP = 2 et EA = 0,01) et **4** (LHF = 16,67 SP = 0,87 et EA = 0,01) ont la plus grande valeur (40 s).

Tableau III.4 : Temps Vébé des différents bétons (s).

Bétons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temps Vébé (s)	22	40	25	40	18	15	30	8	19	25	35

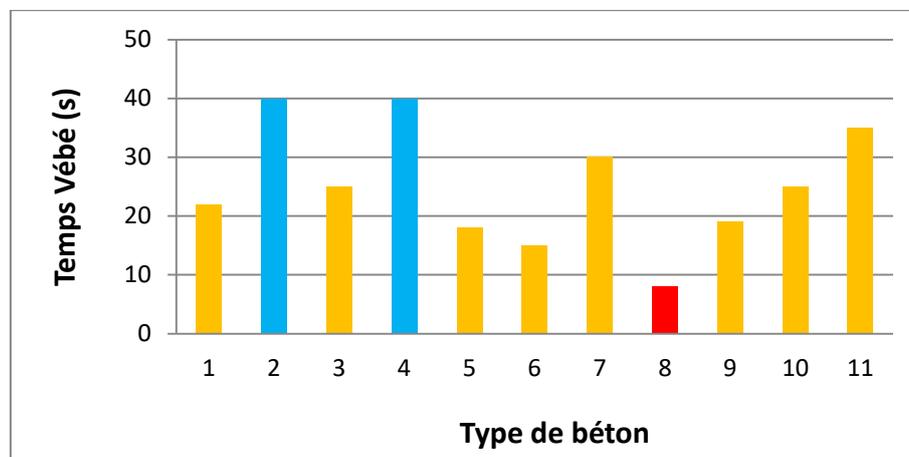


Figure III.3: Temps Vébé des différents bétons.

4. BETON A L'ETAT DURCI

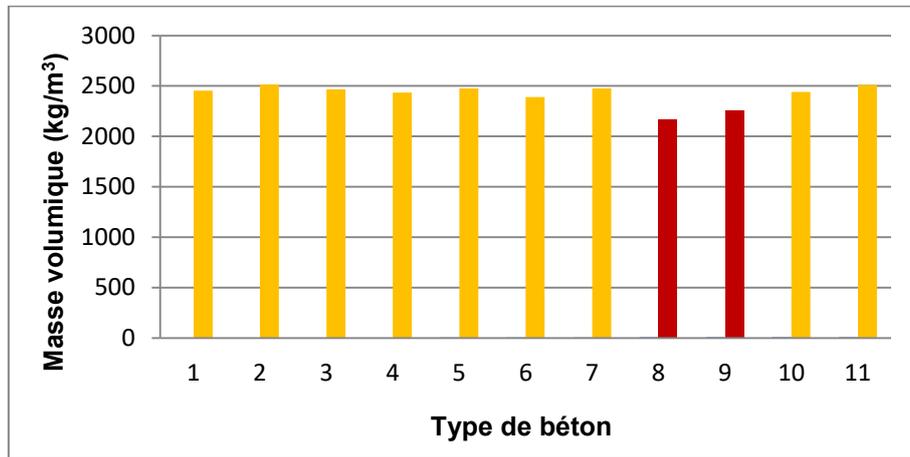
Les essais mécaniques sont des expériences destructifs dont le but est de caractéristique les lois de comportement des bétons, dans notre mémoire nous avons réalisé deux essais mécaniques, résistance à la compression et à la traction par fendage (essai brésilienne).

4.1 MASSE VOLUMIQUE

Les masses volumiques des bétons à l'état durci sont proches, sauf pour les bétons 8 (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et 9 (LHF = 10, SP = 0.87 et EA = 0.07), lesquels enregistrent les plus faibles valeurs, environ 2200 kg/m³.

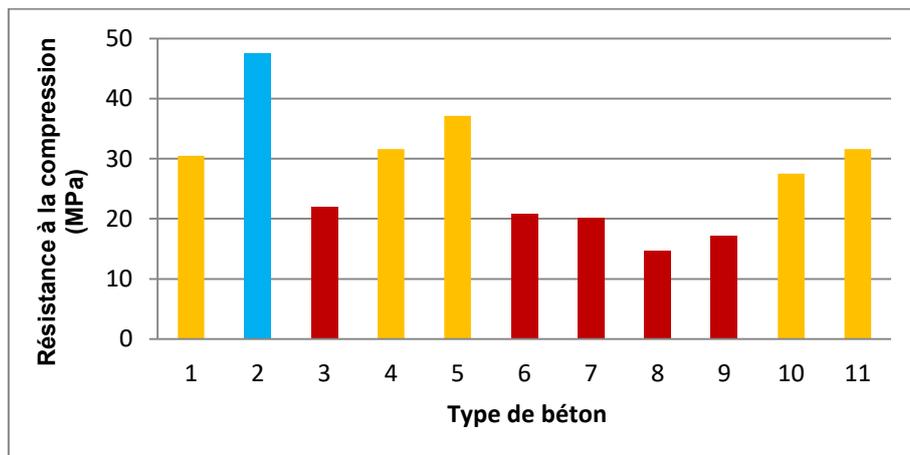
Tableau III.5: Masse volumique à l'état durci des différents bétons.

Bétons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MV (kg/m ³)	2453	2514	2466	2436	2476	2389	2475	2171	2255	2442	2510

**Figure III.4:** Masse volumique à l'état durci des différents bétons.

4.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION

A deux jours on note la résistance à la compression la plus faible (14,7 MPa) celle de la composition **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et la élevée (47,5 MPa) celle de la composition **2** (LHF = 10, SP = 0.3 et EA = 0.1).

**Figure III.5:** Résistance à la compression à 2j des différents bétons.

A sept jours on a la résistance à la compression la plus faible (15,0 MPa) celle de la composition **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et la élevée (61,9 MPa) celle de la composition **4** (LHF = 16,67 , SP = 0,87 et EA = 0,01)

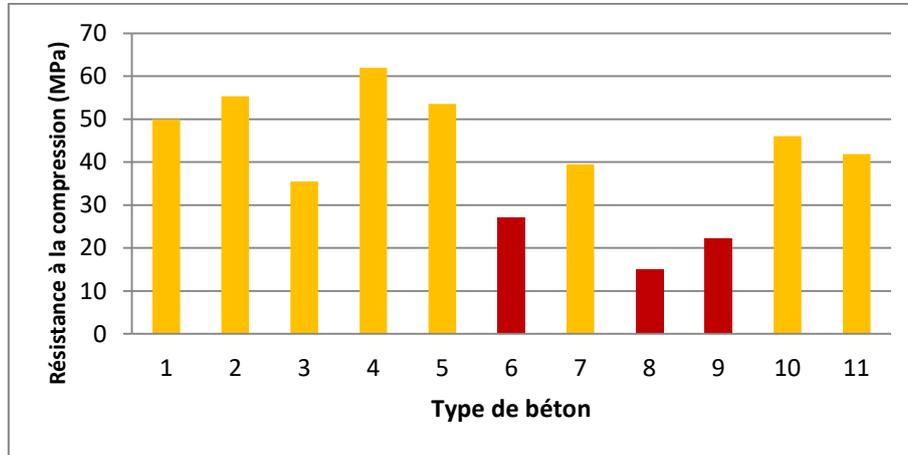


Figure III.6: Résistance à la compression à 7j des différents bétons.

A 28 jours les résistances à la compression évoluent dans les mêmes intervalles que celles observées à 2 j. La plus faible (24,53 MPa) est celle de la composition **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et la élevée (82,64 MPa) est celle de la composition **2** (LHF = 10, SP = 0.3 et EA = 0.1).

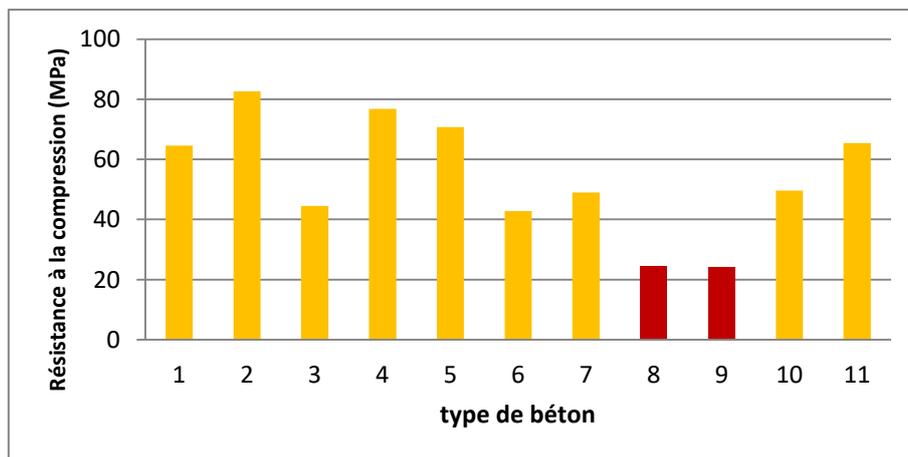


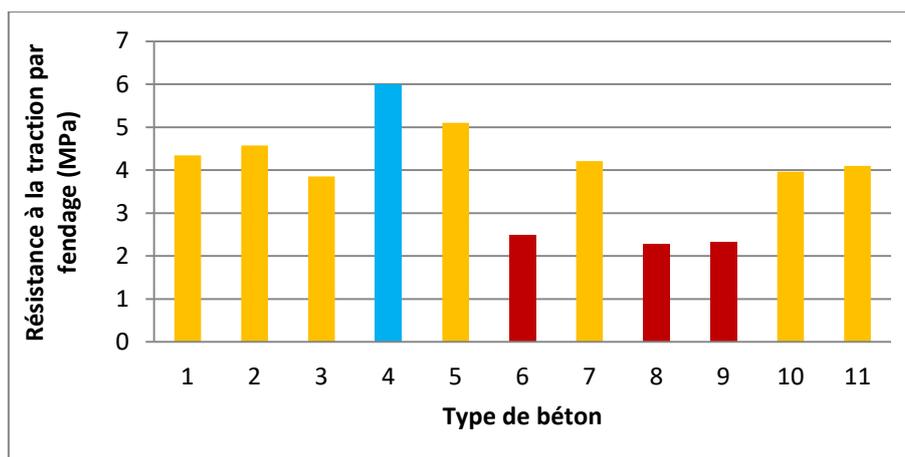
Figure III.7: Résistance à la compression à 28j des différents bétons.

Tableau III.6: Récapitulatif des résistances à la compression des différents bétons (MPa).

Béton	2j	7j	28j
1	30,5	50,0	64,6
2	47,5	55,3	82,64
3	22,0	35,5	44,47
4	31,6	61,9	76,82
5	37,1	53,5	70,78
6	20,9	27,1	42,79
7	20,2	39,5	48,96
8	14,7	15,0	24,53
9	17,1	22,2	24,25
10	27,5	46,0	49,61
11	31,6	41,9	65,39

4.3 RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE

Les compositions de béton : **6** (LHF = 16,67 SP = 0,3 et EA = 0.04) ; **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) ; **9** (LHF = 10, SP = 0.87 et EA = 0.07) présentent les plus faibles résistances à la traction par fendage à 7 j et la composition **4** (LHF = 16,67 , SP = 0,87 et EA = 0,01) a la plus grande résistance (6 MPa).

**Figure III.8 :** Résistance à la traction par fendage à 7j des différents bétons.

À 28 jours, la meilleure résistance à la traction par fendage (7,25 MPa) est celle de la composition **2** (LHF = 10 , SP = 2 et EA = 0,01) alors que les plus faibles ce sont les compositions **6** (LHF = 16.67, SP = 0.3 et EA=0.04) **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et **9** (LHF = 10, SP = 0.87 et EA = 0.07).

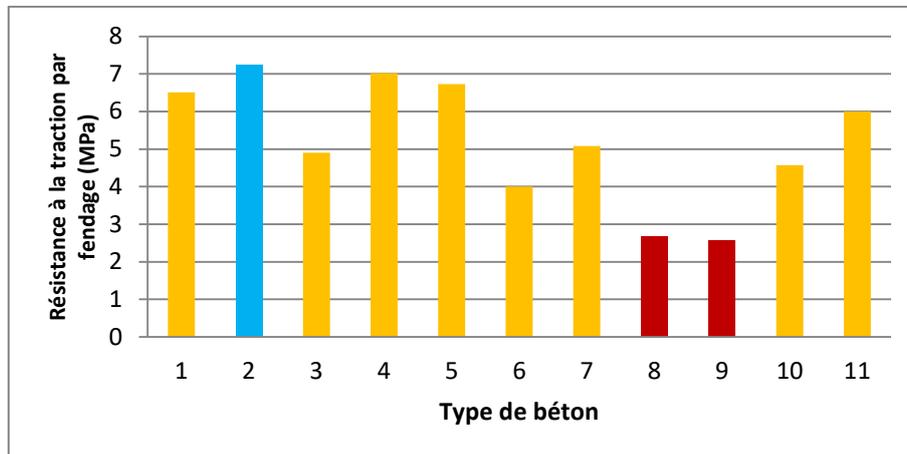


Figure III.9 : Résistance à la traction par fendage à 28j des différents bétons.

Tableau III.7: Récapitulatif des résistances à la traction par fendage des différents bétons (MPa).

Bétons	7j	28j
1	4,34	6,51
2	4,57	7,25
3	3,85	4,9
4	6	7,02
5	5,1	6,73
6	2,49	4
7	4,21	5,08
8	2,28	2,68
9	2,32	2,56
10	3,96	4,57
11	4,1	6

4.4 PENETRATION DE L'EAU SOUS PRESSION

Une forte pénétration d'eau sous pression (38.6 mm) est obtenue pour la composition **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04). Par contre, la plus faible c'est celle de la composition **4** (LHF = 16.67, SP = 0.87 et EA = 0.01).

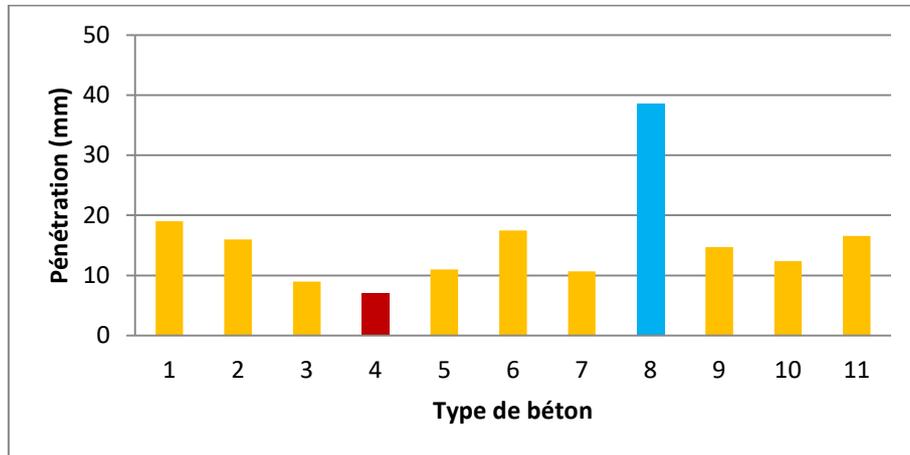


Figure III.10: Pénétration de l'eau sous pression des différents bétons.

Tableau III.8 : Pénétration de l'eau sous pression des différents bétons (mm).

Bétons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pénétration	19	16	9	7	11	17,5	10,7	38,6	14,7	12,4	16,6

4.5 MODULE D'ELASTICITE INSTANTANE

Le module d'élasticité instantané E_i au jour j d'un béton BCR est lié à sa résistance en compression au même âge par une relation empirique telle que :

$$E_i = 11\,000 \sqrt[3]{R_{cj}} \text{ (en MPa)}$$

R_{cj} = résistance à la compression au jour j .

Les plus faibles modules d'élasticité instantanés sont obtenus pour les compositions de béton **8** (LHF = 10, SP = 1.43 et EA = 0.04) et **9** (LHF = 10, SP = 0.87 et EA = 0.07), respectivement : 31,6 et 31,5 GPa.

Tabelle III.9: Module d'élasticité instantané des différents bétons (GPa).

Béton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E_i (GPa).	44,1	47,9	38,4	46,0	44,8	37,9	39,7	31,6	31,5	39,8	43,7

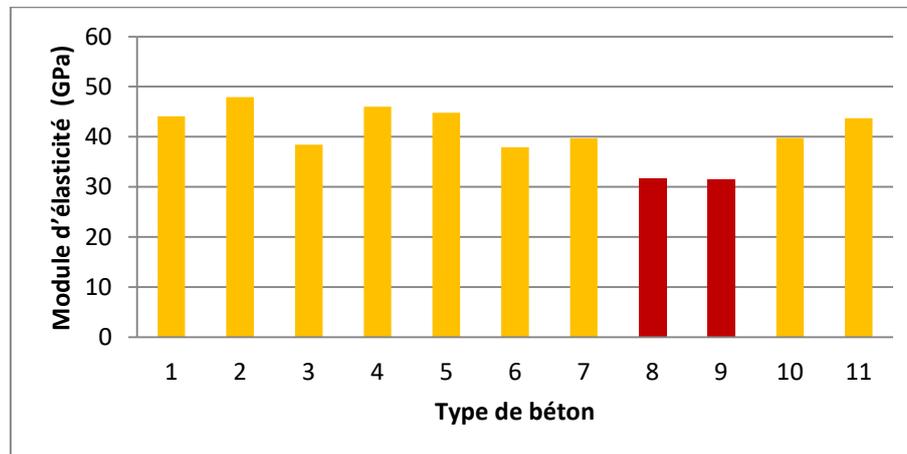


Figure III.11 : Module d'élasticité instantané des différents bétons (GPa).

5. PLANIFICATION DE L'EXPERIENCE

Les résultats obtenus, montrent que les compositions des bétons présentent des propriétés très variables d'une composition à l'autre selon l'ajout de laitier, la teneur en superplastifiant et le pourcentage d'entraîneur d'air.

Ce qui nécessite beaucoup d'expérience et de matériaux, afin de cerner les différentes variations. Pour ce faire, nous avons utilisé un plan d'expérience (méthode matricielle) ce qui nous permet de déterminer la composition optimale de mélange des matériaux avec un nombre minimum de gâchées et de matériaux.

Le principe consiste à tracer un diagramme ternaire (triangle équilatérale) avec trois variables : X1, X2 et X3 représentant successivement le dosage de laitier ; la teneur de super plastifiant et le pourcentage d'entraîneur d'air.

- ✓ Laitier du 30 à 60 kg/m³
- ✓ Super plastifiant du 0.9 à 4.29 kg/m³
- ✓ Entraîneur d'air du 0.03 à 0.21 kg/m³

Ensuite on met en évidence les propriétés des composants sous l'aspect de chiffres conventionnels de 0 à 1.

Pour déterminer les compositions correspondantes en chaque point, il suffit de tracer les parallèles aux trois axes.

Dans le tableau suivant, nous portons les propriétés des bétons : la résistance à la compression à 2 et 7 et 28 j, la résistance à la traction par fendage à 2 et 7 et 28 j, l'affaissement, le temps Vébé, la perméabilité de l'eau sous pression, la masse volumique à l'état frais et durci, le module d'élasticité instantané, pour les 10 compositions de béton et la 11^{ième} c'est celle du béton référence (Témoin).

En combinant les trois composants (X1, X2 et X3) on obtient 66 points qui correspondent à 66 valeurs pour chaque propriété étudiée.

Tableau III.10 : Récapitulatif des caractéristiques des bétons frais.

Béton	Ac (mm)	Temps Vébé (s)	Mv Kg/m³
1	0	22	2478
2	0	40	2549
3	0	25	2488
4	0	40	2541
5	2	18	2508
6	4	15	2400
7	0	30	2491
8	10	8	2219
9	3	19	2288
10	0	25	2480
11	0	35	2525

Tableau III.11: Récapitulatif des caractéristiques des bétons durci

Béton	Rc (MPa)			Rt (MPa)		Mv Kg/m ³	Pénétration (mm)	Ei (GPa)
	2j	7j	28j	7j	28j			
1	30,5	50,0	64,6	4,34	6,51	2453	19	44,1
2	47,5	55,3	82,64	4,57	7,25	2514	16	47,9
3	22,0	35,5	44,47	3,85	4,9	2466	9	38,4
4	31,6	61,9	76,82	6	7,02	2436	7	46,0
5	37,1	53,5	70,78	5,1	6,73	2476	11	44,8
6	20,9	27,1	42,79	2,49	4	2389	17,5	37,9
7	20,2	39,5	48,96	4,21	5,08	2475	10,66	39,7
8	14,7	15,0	24,53	2,28	2,68	2171	38,6	31,6
9	17,1	22,2	24,25	2,32	2,56	2255	14,66	31,5
10	27,5	46,0	49,61	3,96	4,57	2442	12,35	39,8
11	31,6	41,9	65,39	4,1	6	2510	16,6	43,7

5.1 CALCUL DES COEFFICIENTS

Pour chaque propriété il faut calculer les coefficients d'influence.

Tableau III.12 : Les coefficients d'influence.

	Compression			Traction		Masse volumique		Temps $t_{V_{\text{ébé}}}$	Ac	Pénét.	Ei
	$R_{c\ 2j}$	$R_{c\ 7j}$	$R_{c\ 28j}$	$R_{t\ 7j}$	$R_{t\ 28j}$	M_{VF}	M_{VD}				
a₁	30,5	50,0	64,6	4,34	6,51	2478,9	2453,3	22	0	19	44,1
a₂	47,5	55,0	82,64	4,44	7,25	2548,1	2513,5	40	0	16	47,9
a₃	22,0	35,5	44,47	3,85	4,9	2488,8	2466,1	25	0	9	38,4
a₁₂	-20,9	23,4	0,95	3,195	-0,02	49,5	-122	-9	4,5	-38,3	46,0
a₁₃	-25,8	-42,6	-38,9	-3,0825	-5,24	-169	-124	-4,5	9	-5,72	44,8
a₂₃	-85,3	-120,4	-176	-4,455	-15,5	-1193	-1244	-85,5	29,3	4,52	37,9
b₁₂	1,1	68,0	81,1	0,225	3,62	383	-135	189	-13,5	-33,8	39,7
b₁₃	-14,7	-116,5	-87,1	-10,14	-10,9	-592	-551	-94,5	27	41,4	31,6
b₂₃	-74,9	-91,1	-84,4	8,145	-4,48	-603	-673	-108	47,3	-4,34	31,5
b₁₂₃	243,8	390,8	257	3,847	17,9	3260	3515	189	-128	-88,7	39,8
a₁₂	-20,9	23,4	0,95	3,195	-0,02	49,5	-122	-9	4,5	-38,3	46,09

5.2 EQUATIONS GENERALES (MODELE REGRESSION)

Après avoir calculé les coefficients on compose les équations générale (module régression) :

1-résistance a compression

$$R_C (2j) = 30,5*x_1 + 47,5*x_2 + 22*x_3 - 20,9*x_1*x_2 - 25,8*x_1*x_3 - 85,3*x_2*x_3 + 1,1*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 14,7*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 74,9*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 243,8 (x_1*x_2*x_3)$$

$$R_C (7 j) = 50*x_1 + 55*x_2 + 35.5*x_3 + 23.4*x_1*x_2 - 42.6*x_1*x_3 - 12.4*x_2*x_3 + 68*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 116.5*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 91.1*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 390.8 (x_1*x_2*x_3)$$

$$R_C (28 j) = 64.6*x_1 + 82.64*x_2 + 44.47*x_3 + 0.95*x_1*x_2 - 38.9*x_1*x_3 - 176*x_2*x_3 + 81.1*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 87.1*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 84.4*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 257 (x_1*x_2*x_3)$$

2-Traction par fendage

$$R_t (7 j) = 4.34*x_1 + 4.44*x_2 + 3.85*x_3 + 3.195*x_1*x_2 - 3.08*x_1*x_3 - 4.455*x_2*x_3 + 0.225*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 10.14*x_1*x_3 (x_1-x_3) + 8.14*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 3.84 (x_1*x_2*x_3)$$

$$R_t (28 j) = 6.51*x_1 + 7.25*x_2 + 4.9*x_3 - 1.02*x_1*x_2 - 5.24*x_1*x_3 - 15.5*x_2*x_3 + 3.62*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 10.9*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 4.48*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 17.9 (x_1*x_2*x_3)$$

3- Masse volumique frais

$$Mv_f = 2478.9*x_1 + 2548.1*x_2 + 2488.8*x_3 + 49.5*x_1*x_2 - 169*x_1*x_3 - 1193*x_2*x_3 + 383*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 592*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 603*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 3260 (x_1*x_2*x_3)$$

4-Masse volumique durci

$$Mv_d = 2453.3*x_1 + 2513.5*x_2 + 2466.1*x_3 - 122*x_1*x_2 - 124*x_1*x_3 - 1244*x_2*x_3 - 135*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 554*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 673*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 3515 (x_1*x_2*x_3)$$

5-Temps Vébé

$$\text{Temps} = 22*x_1 + 40*x_2 + 25*x_3 - 9*x_1*x_2 - 4,9*x_1*x_3 - 85,5*x_2*x_3 + 189*x_1*x_2 (x_1-x_2) - 94,5*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 108*x_2*x_3 (x_2-x_3) + 189 (x_1*x_2*x_3)$$

6- l'affaissement du béton :

$$\text{Aff} = 0*x_1 + 0*x_2 + 0*x_3 + 4,5*x_1*x_2 + 9*x_1*x_3 + 29,3*x_2*x_3 - 13,5*x_1*x_2 (x_1-x_2) + 27*x_1*x_3 (x_1-x_3) - 47,3*x_2*x_3 (x_2-x_3) - 47,3 (x_1*x_2*x_3)$$

7-Pénétration d'eau

$$\mathbf{Pénét.} = 19 *x_1+16*x_2+9*x_3-38,3*x_1*x_2-5,72*x_1*x_3+4,52*x_2*x_3-33,8*x_1*x_2(x_1-x_2)+41,4*x_1*x_3(x_1-x_3)-41,4*x_2*x_3(x_2-x_3)-4,34(x_1*x_2*x_3)$$

8- Module d'élasticité instantané

$$\mathbf{E_i} = 44.1*x_1+47.9*x_2+38.4*x_3+46.0*x_2+44.8*x_1*x_3+37.9*x_2*x_3+39.7*x_1*x_2(x_1-x_2)+31.6*x_1*x_3(x_1-x_3)+31.5*x_2*x_3(x_2-x_3)+39.8(x_1*x_2*x_3)$$

5.3 DIAGRAMMES TERNAIRES

5.3.1 Masse volumique de béton frais

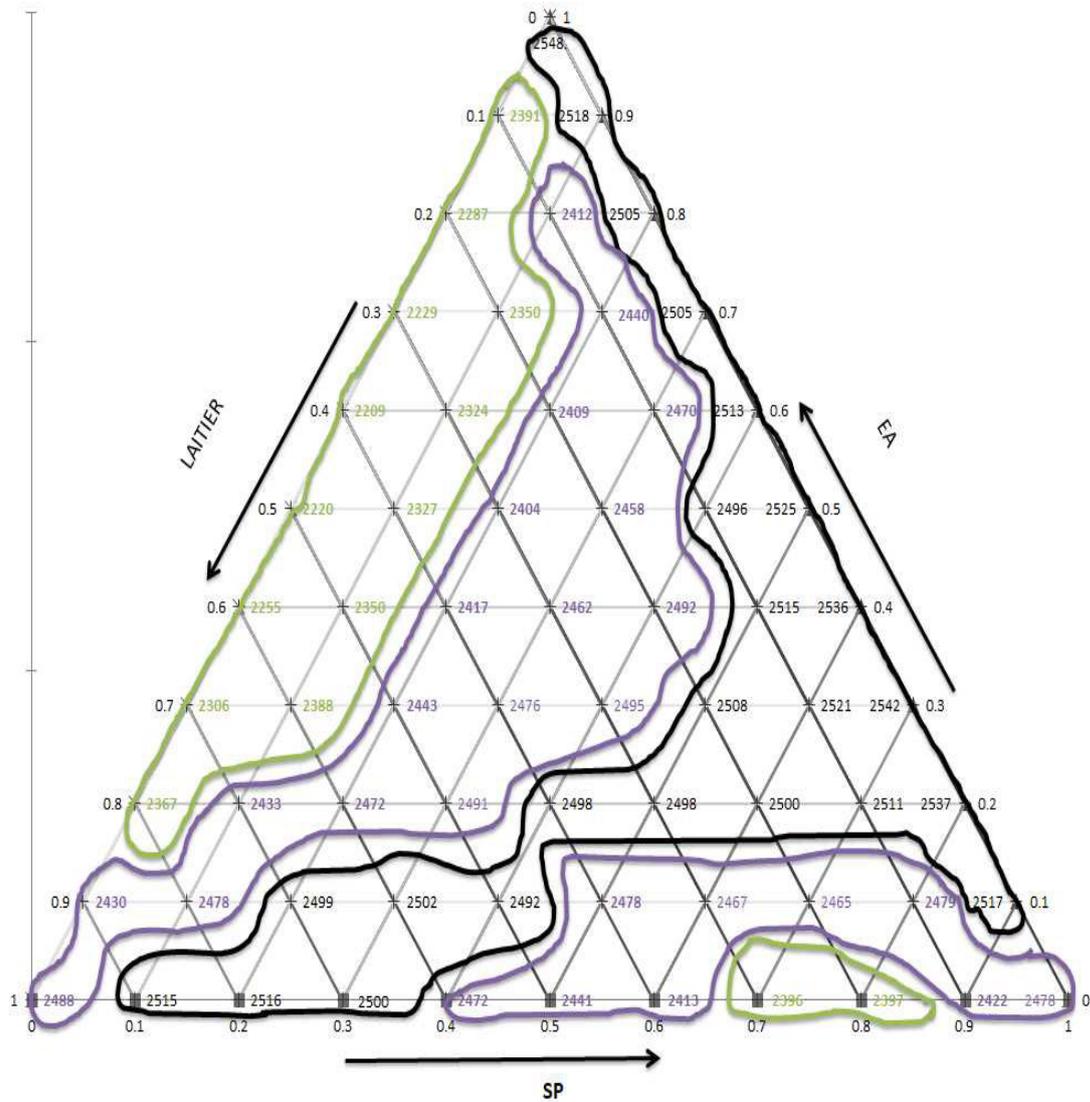


Figure III.12: Diagramme ternaire de la masse volumique des bétons frais.

D’après le diagramme ternaire (Figure 12) on déduit les domaines de variation de la Masse volumique des bétons frais comme suit :

Domaine I (vert) : Mv entre 2209 et 2397 kg/m³

Domaine II (violet) : Mv entre 2409 et 2495 kg/m³

Domaine III (noir) : Mv entre 2499 et 2584 kg/m³

5.3.2 Affaissement

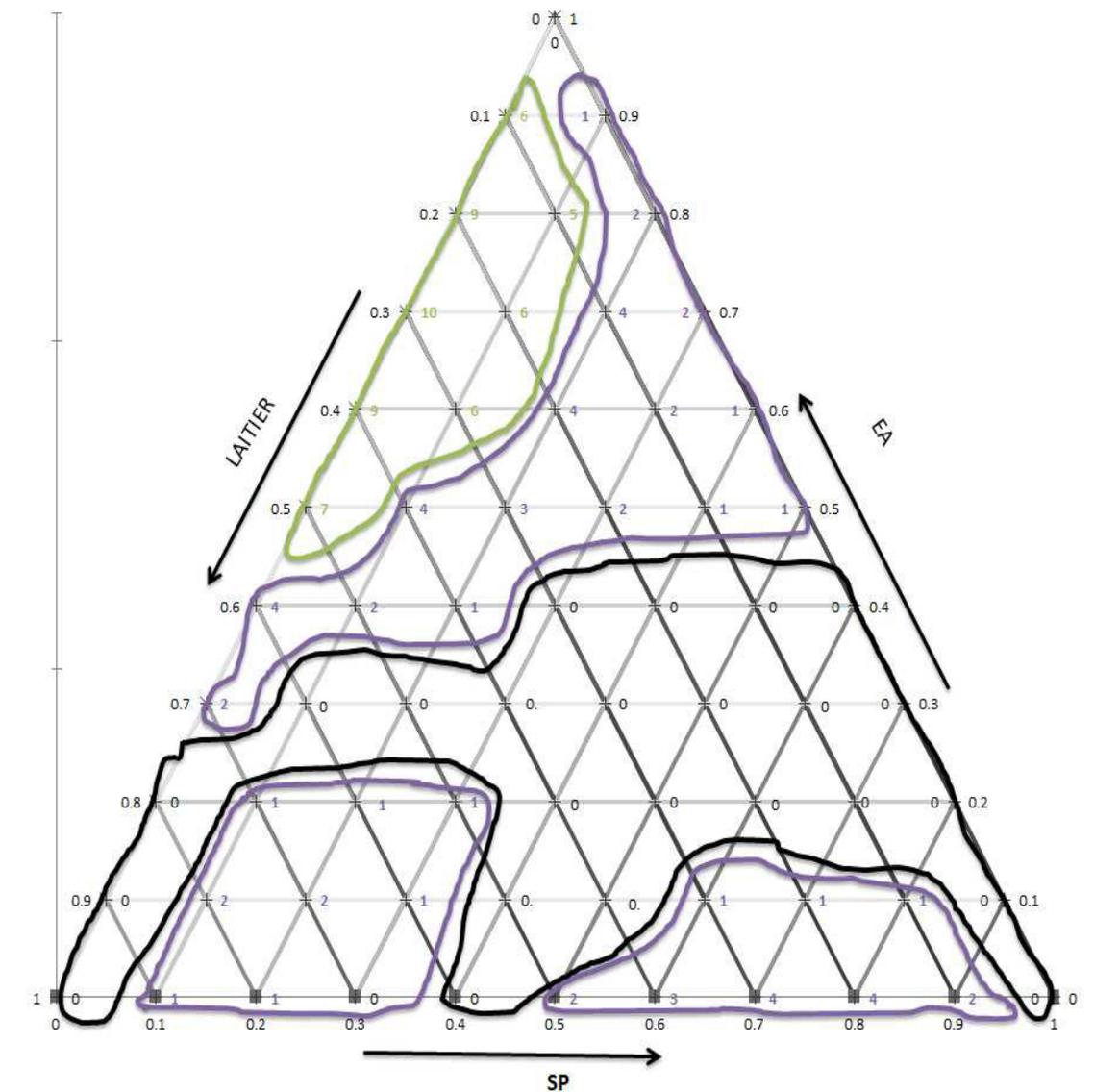


Figure III.13: Diagramme ternaire de l'affaissement des bétons frais.

D'après le diagramme ternaire (Figure 13) on déduit les domaines de variation de l'affaissement des bétons frais comme suit :

Domaine I (vert) : Ac varie entre 5 et 10 cm ; béton ferme

Domaine II (violet) : Ac varie entre 1 et 4 cm ; béton très ferme

Domaine III (noir) : Ac (0 cm) ; béton très secs

5.3.3 Le Temps Vébé

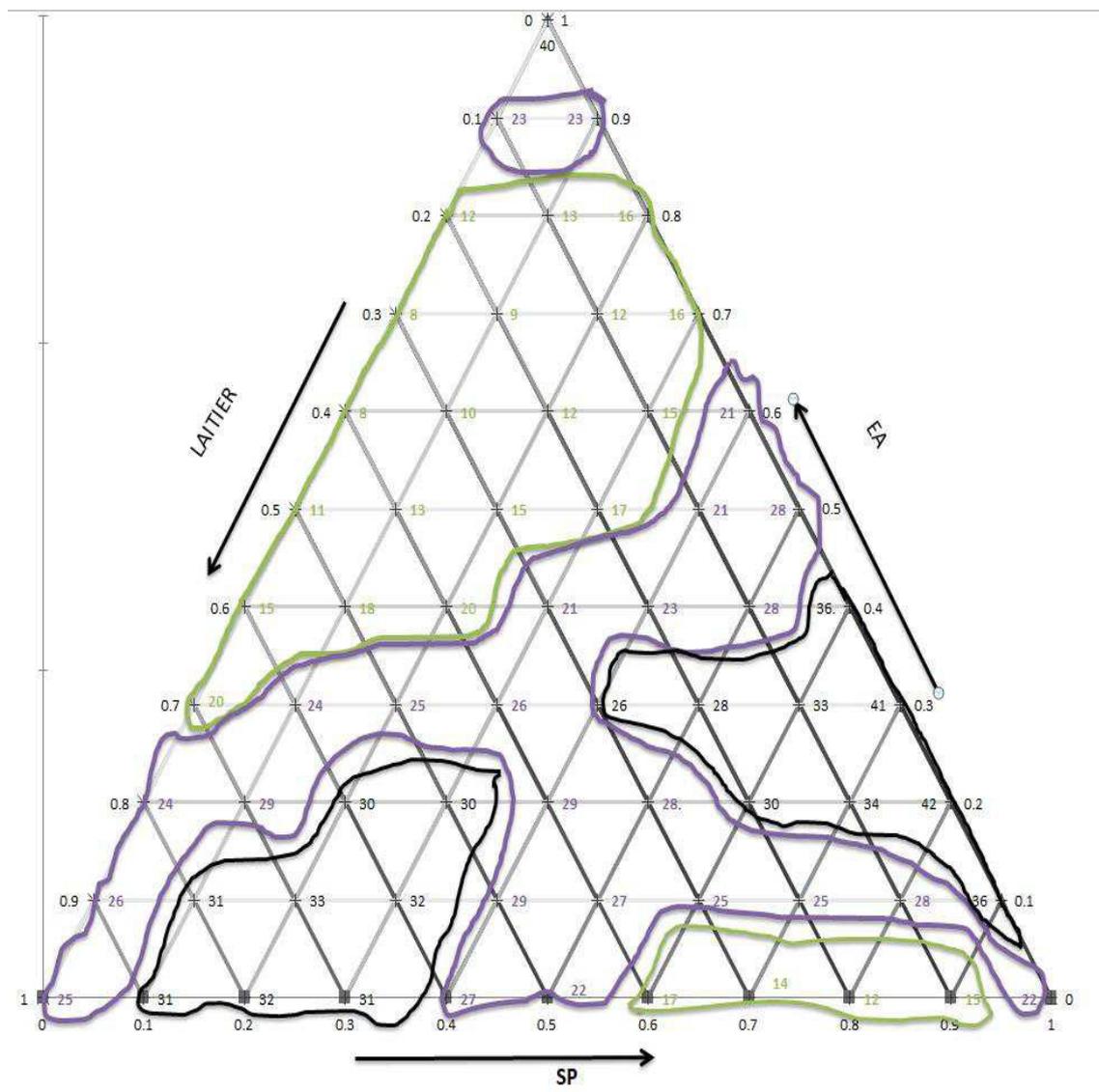


Figure III.14: Diagramme ternaire du temps Vébé des bétons frais.

D'après le diagramme ternaire (Figure14) on déduit les domaines de variation de Temps Vébé des bétons frais comme suit :

Domaine I (vert) : temps varie entre 8 et 20 s ; BCR pour pavage

Domaine II (violet) : temps varie entre 21 et 29 s ; BCR pour router

Domaine III (noir) : temps varie entre 30 et 40 s ; BCR pour barrage

5.3.4 Masse volumique des bétons durcis

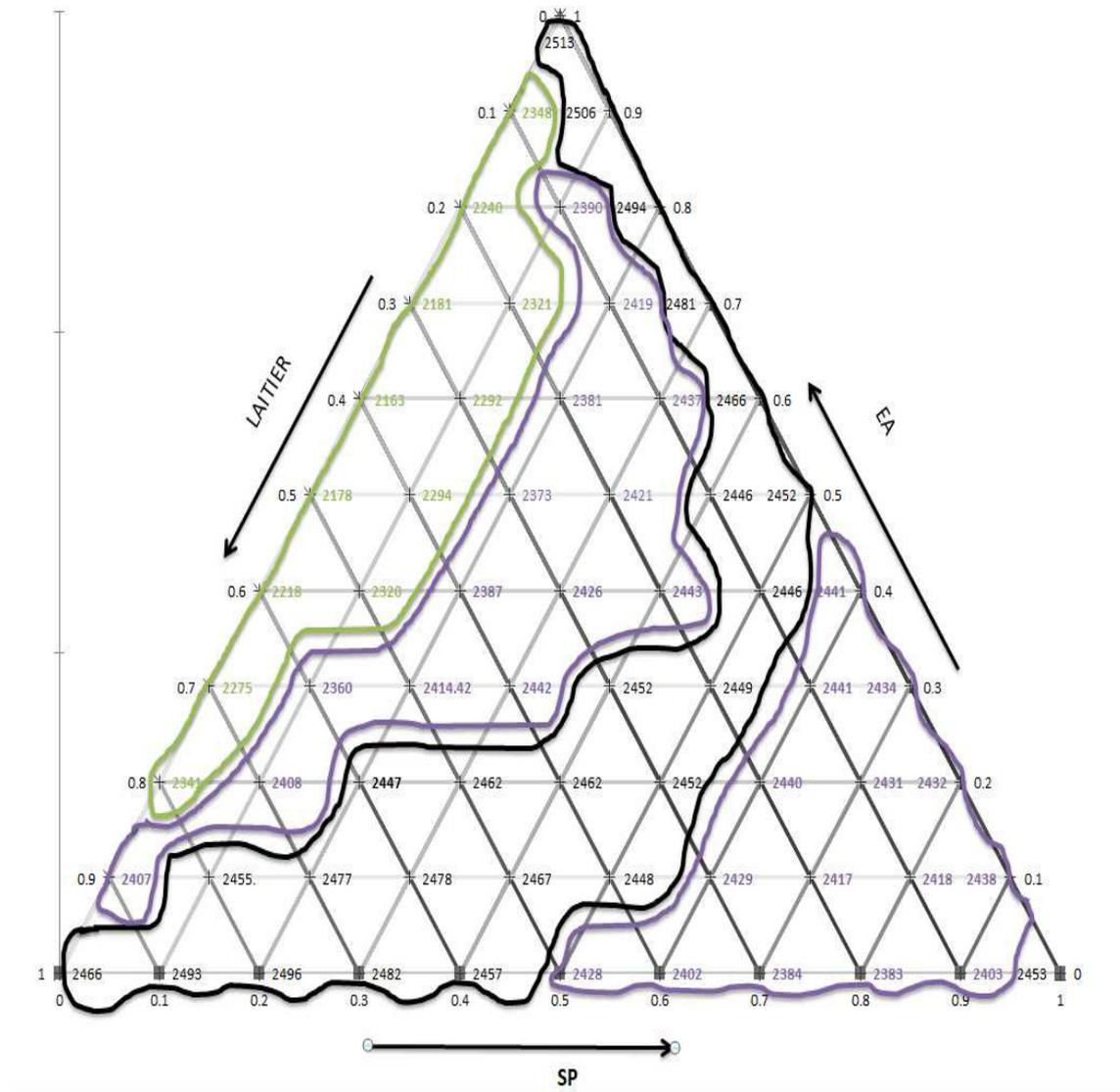


Figure III.15: Diagramme ternaire de la masse volumique des bétons durcis.

D'après le diagramme ternaire (Figure 15) on déduit les domaines de variation de la masse volumique des bétons durcis comme suit :

Domaine I (vert) : Mv entre 2163 et 2348 (kg/m^3) ; Béton lourd

Domaine II (violet) : Mv entre 2360 et 2443 (kg/m^3) ; Béton lourd

Domaine III (noir) : Mv entre 2446 et 2513 (kg/m^3) ; Béton très lourd

5.3.5 Résistance à la compression à 2j

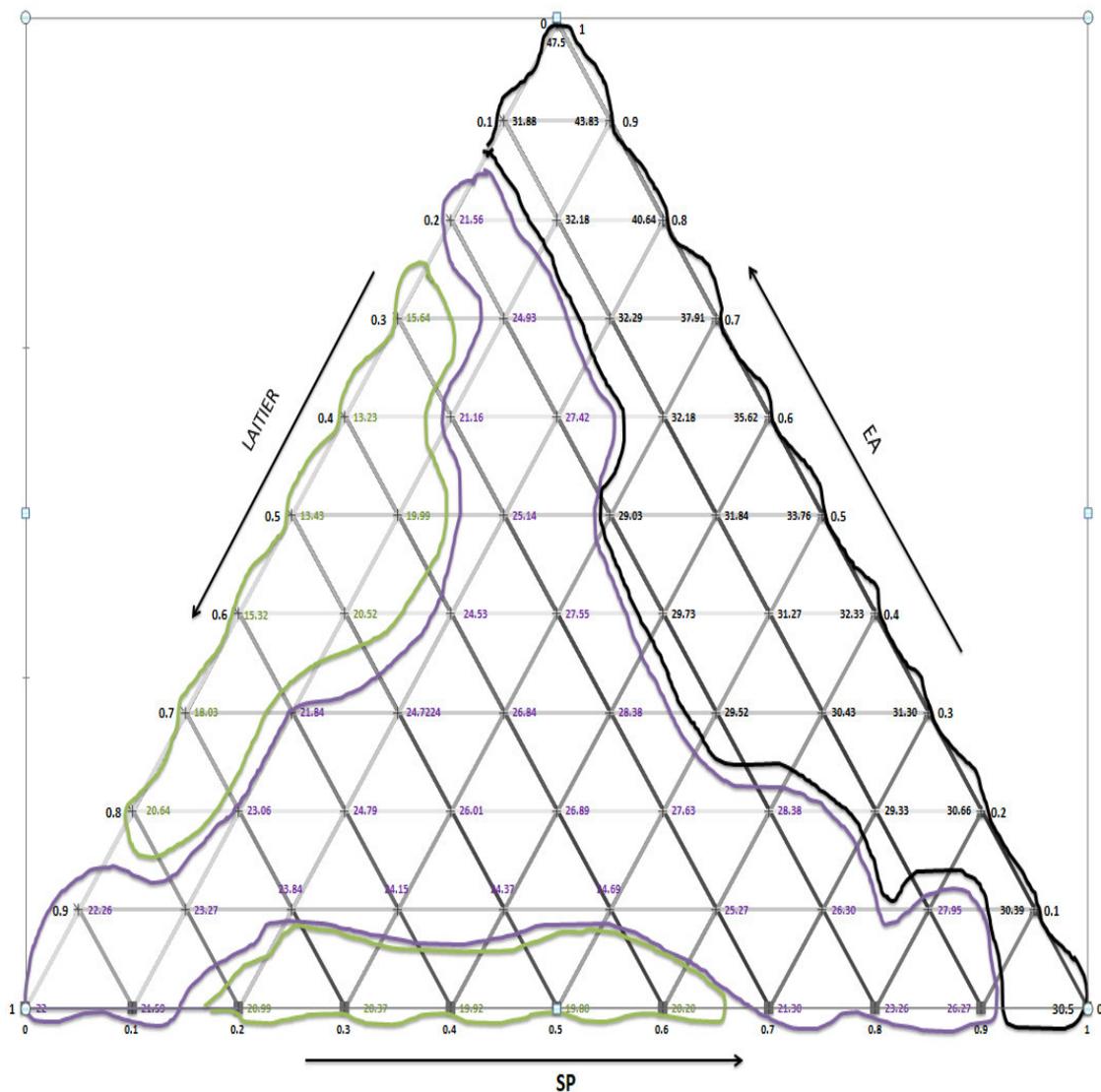


Figure III.16: Diagramme ternaire de la résistance à la compression à 2 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure 16) on déduit les domaines de variation de la résistance à la compression à 2 j comme suit :

Domaine I (vert) : R_{c2j} varie entre 13.23 et 20.64 MPa résistance faible

Domaine II (violet) : R_{c2j} varie entre 21.3 et 27.95MPa résistance moyenne

Domaine III (noir) : R_{c2j} varie entre 29.03 et 47.5 MPa résistance élevée

5.3.6 Résistance à la compression à 7j

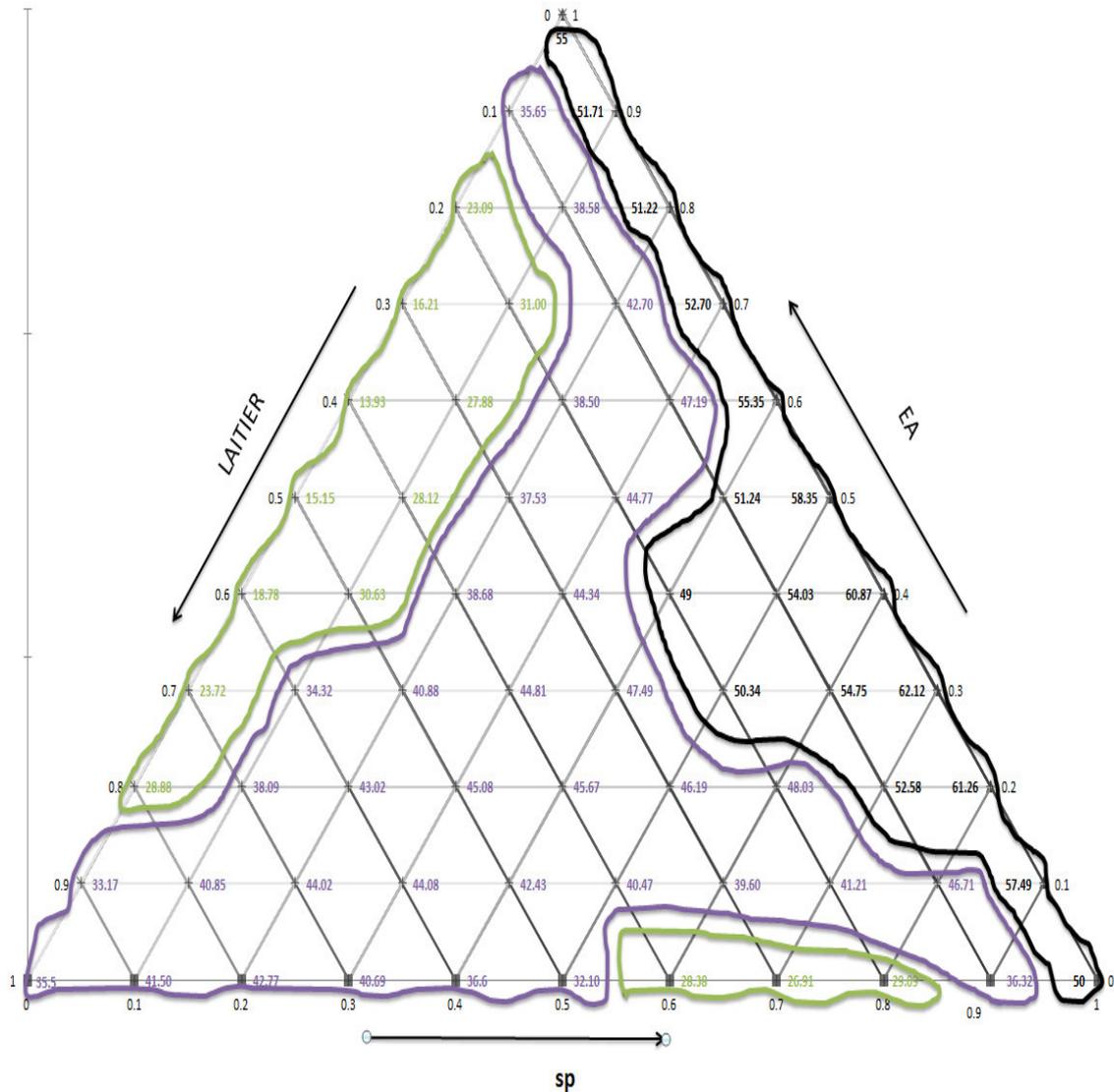


Figure III.17: Diagramme ternaire de la résistance à la compression à 7 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure17) on déduit les domaines de variation de la résistance à la compression à 7 j comme suit :

Domaine I (vert) : R_{c7j} varie entre 13.93 et 31 MPa résistance faible

Domaine II (violet) : R_{c7j} varie entre 32.1 et 48.03 MPa résistance moyenne

Domaine III (noir) : R_{c7j} varie entre 49 et 62.12 MPa résistance élevée

5.3.7 Résistance à la compression à 28j

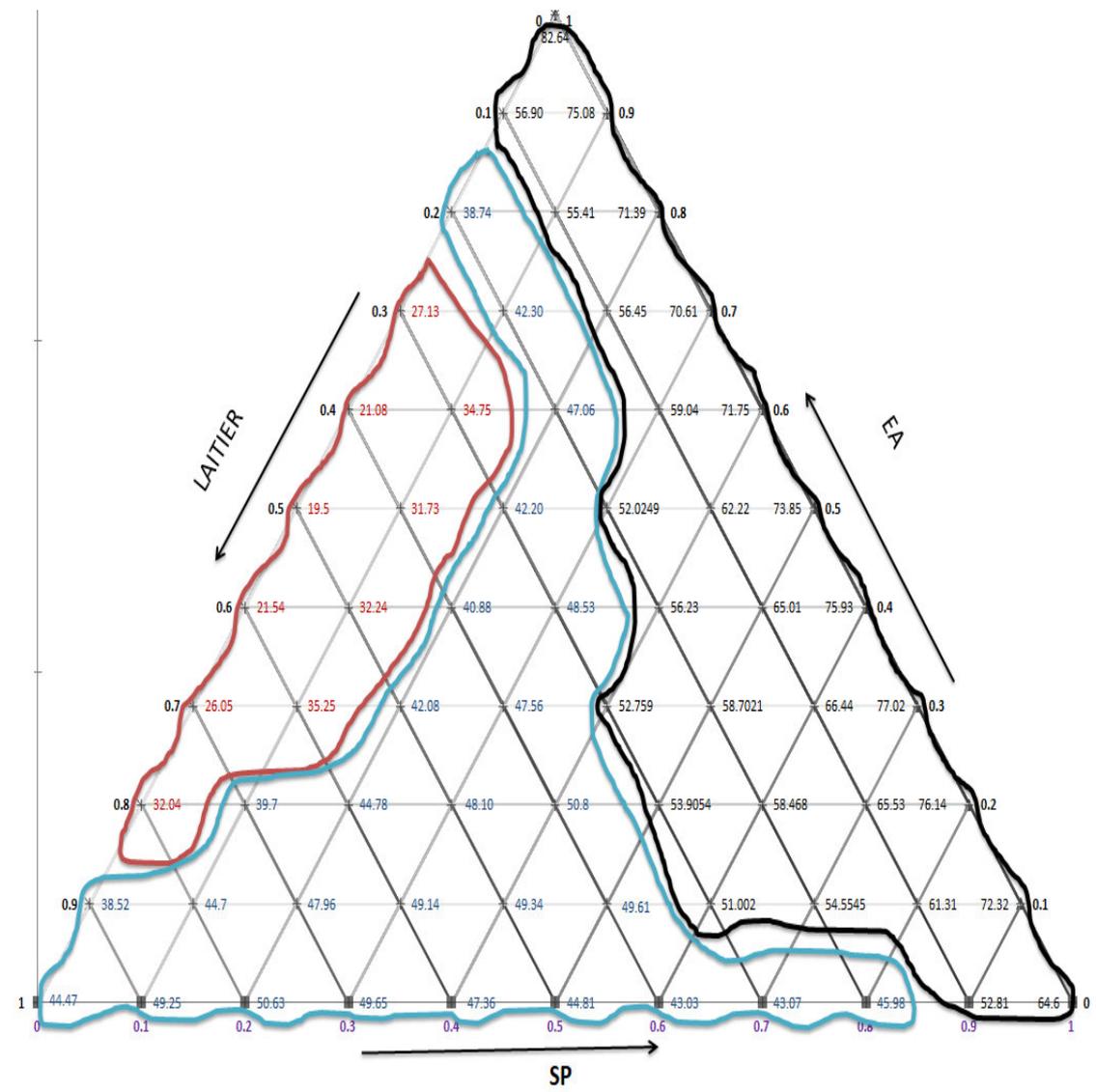


Figure III.18: Diagramme ternaire de la résistance à la compression à 28 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure 18) on déduit les domaines de variation de la résistance à la compressio à 28 j comme suit :

Domaine I (rouge) : R_{c28j} varie entre 19.5 et 35.25 MPa ; béton de classe 25.

Domaine II (Blue) : R_{c28j} varie entre 38.52 et 50.63 MPa ; béton de classe 45.

Domaine III (noir) : R_{c28j} varie entre 51 et 82.64 MPa ; béton de classe 65.

5.3.8 Résistance à la traction par fendage à 7j

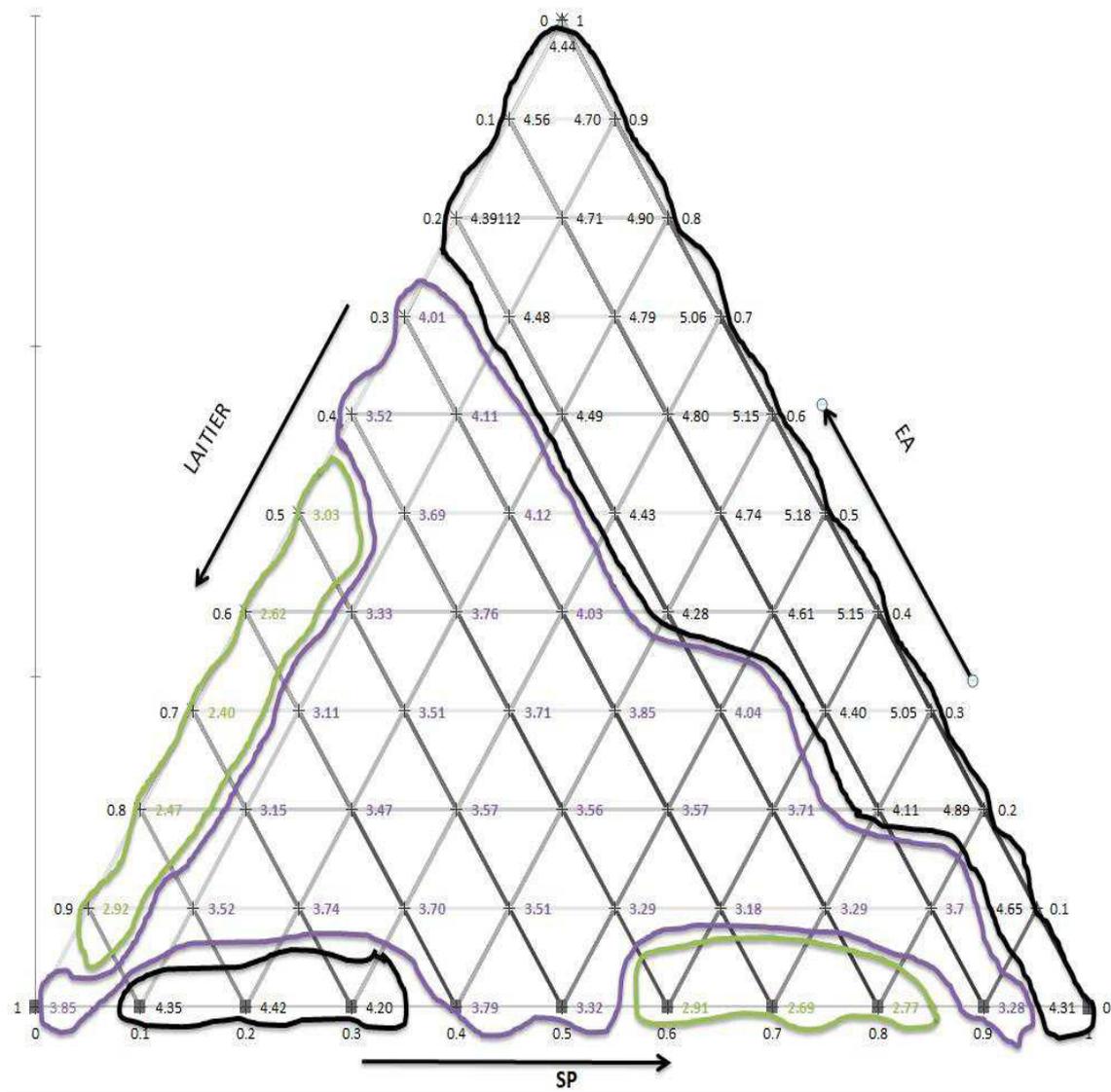


Figure III.19: Diagramme ternaire de la résistance à la traction par fendage à 7 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure 19) on déduit les domaines de variation de la résistance à la traction par fendage à 7 j comme suit :

Domaine I (vert) : R_{t7j} varie entre 2.40 et 3.03 MPa ; résistance faible

Domaine II (violet) : R_{t7j} varie entre 3.11 et 4.12 MPa ; résistance moyenne

Domaine III (noir) : R_{t7j} varie entre 4.20 et 5.18 MPa ; résistance élevée

5.3.9 Résistance à la traction par fendage à 28j

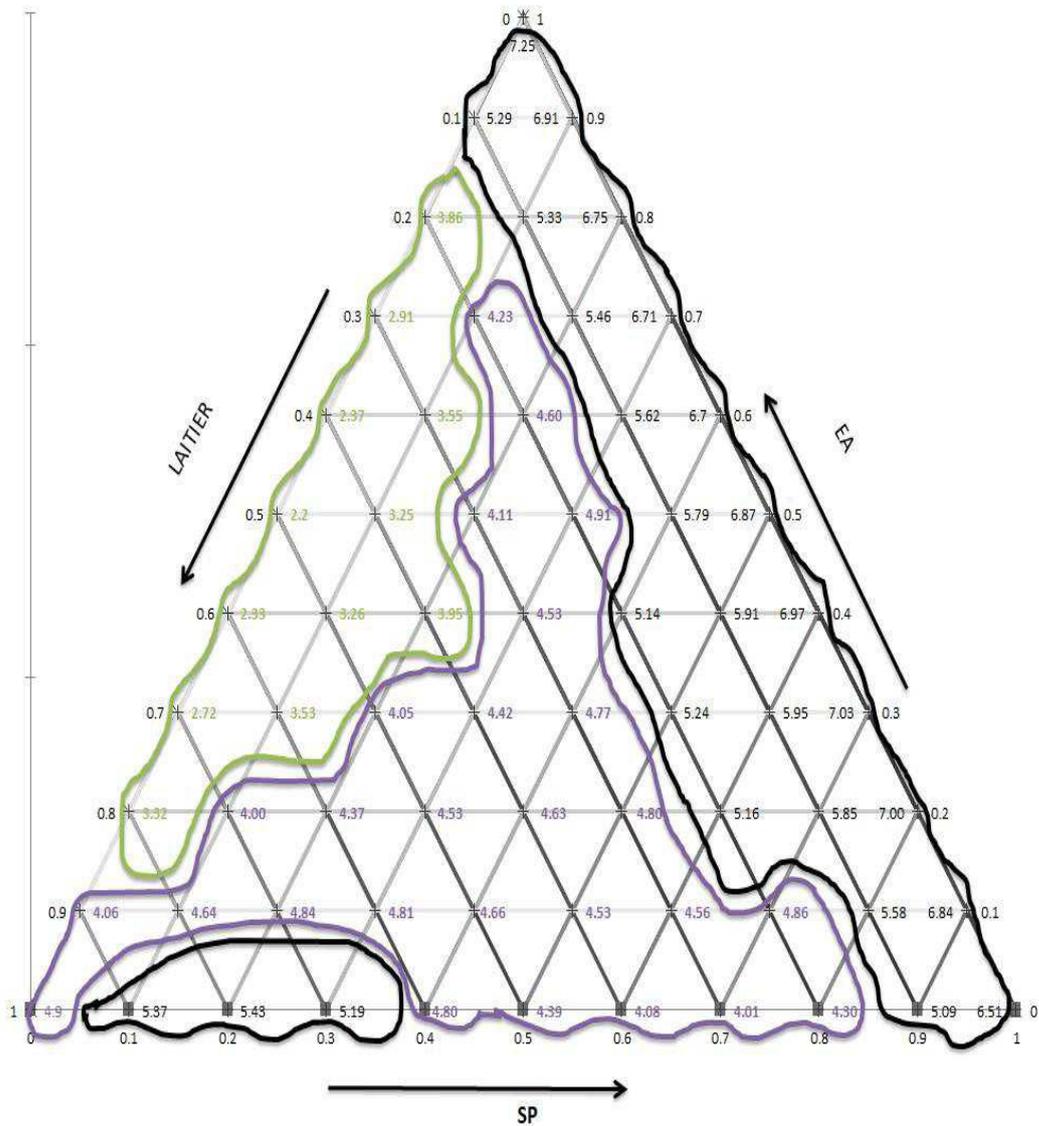


Figure III.20 : Diagramme ternaire de la résistance à la traction par fendage à 28 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure 20) on déduit les domaines de variation de la résistance à la traction par fendage à 28 j comme suit :

Domaine I (vert) : R_{t28j} varie entre 2.2 et 3.95 MPa ; résistance faible

Domaine II (violet) : R_{t28j} varie entre 4.00 et 4.91MPa ; résistance moyenne

Domaine III (noir) : R_{t28j} varie entre 5.09 et 7.25 MPa ; résistance élevée

5.3.10 Pénétration d'eau sous pression à 28j

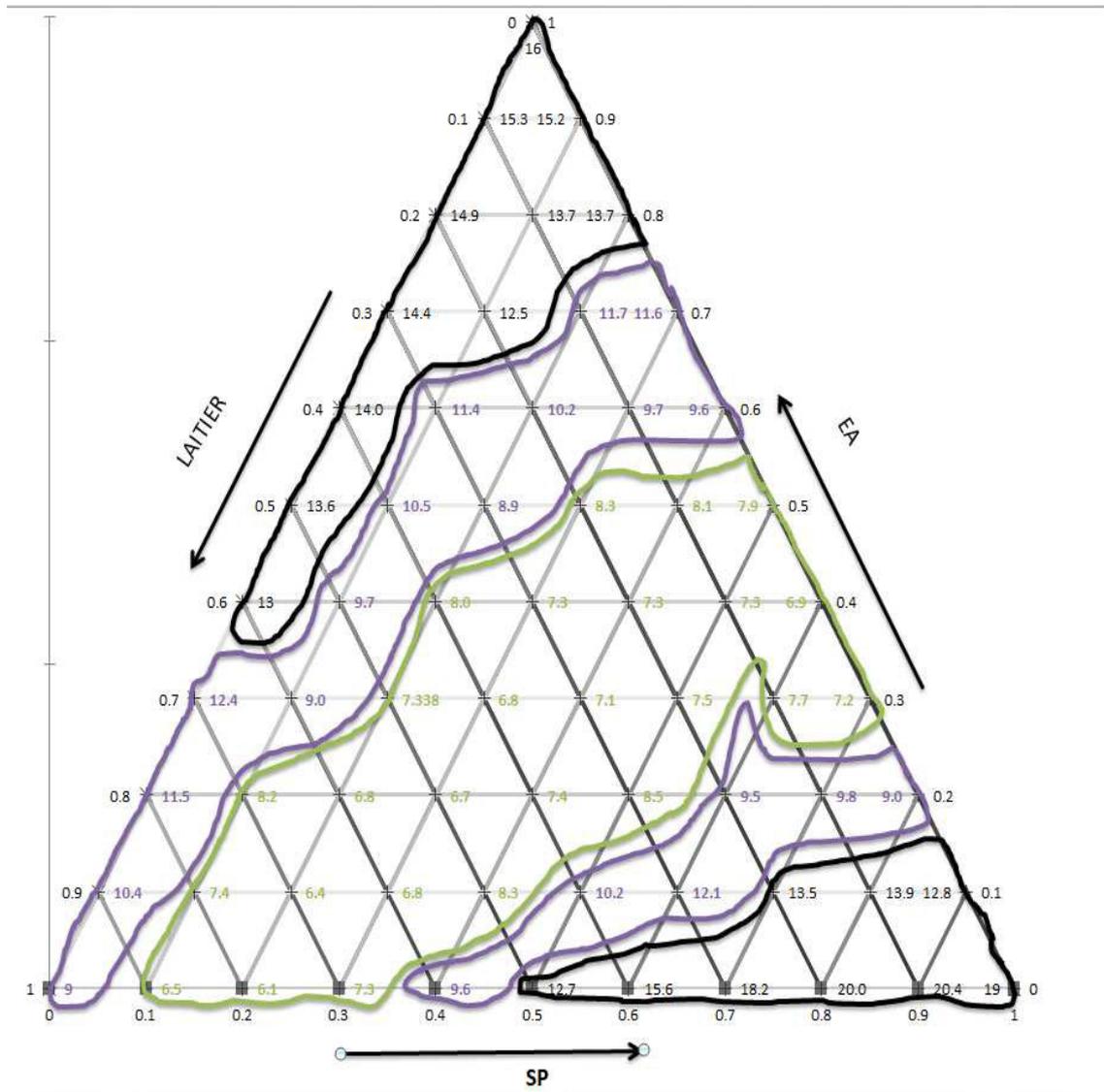


Figure III.21 : Diagramme ternaire de la pénétration d'eau sous pression à 28 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure 21) on déduit les domaines de variation de la pénétration d'eau sous pression à 28 j comme suit :

Domaine I (vert) : pénétration varie entre 6.1 et 8.5 mm ; bonne perméabilité

Domaine II (violet) : pénétration varie entre 9 et 12.4 mm ; faible perméabilité

Domaine III (noir) : pénétration varie entre 12.5 et 20.4 mm ; très faible perméabilité

5.3.11 Module d'élasticité instantané à 28j

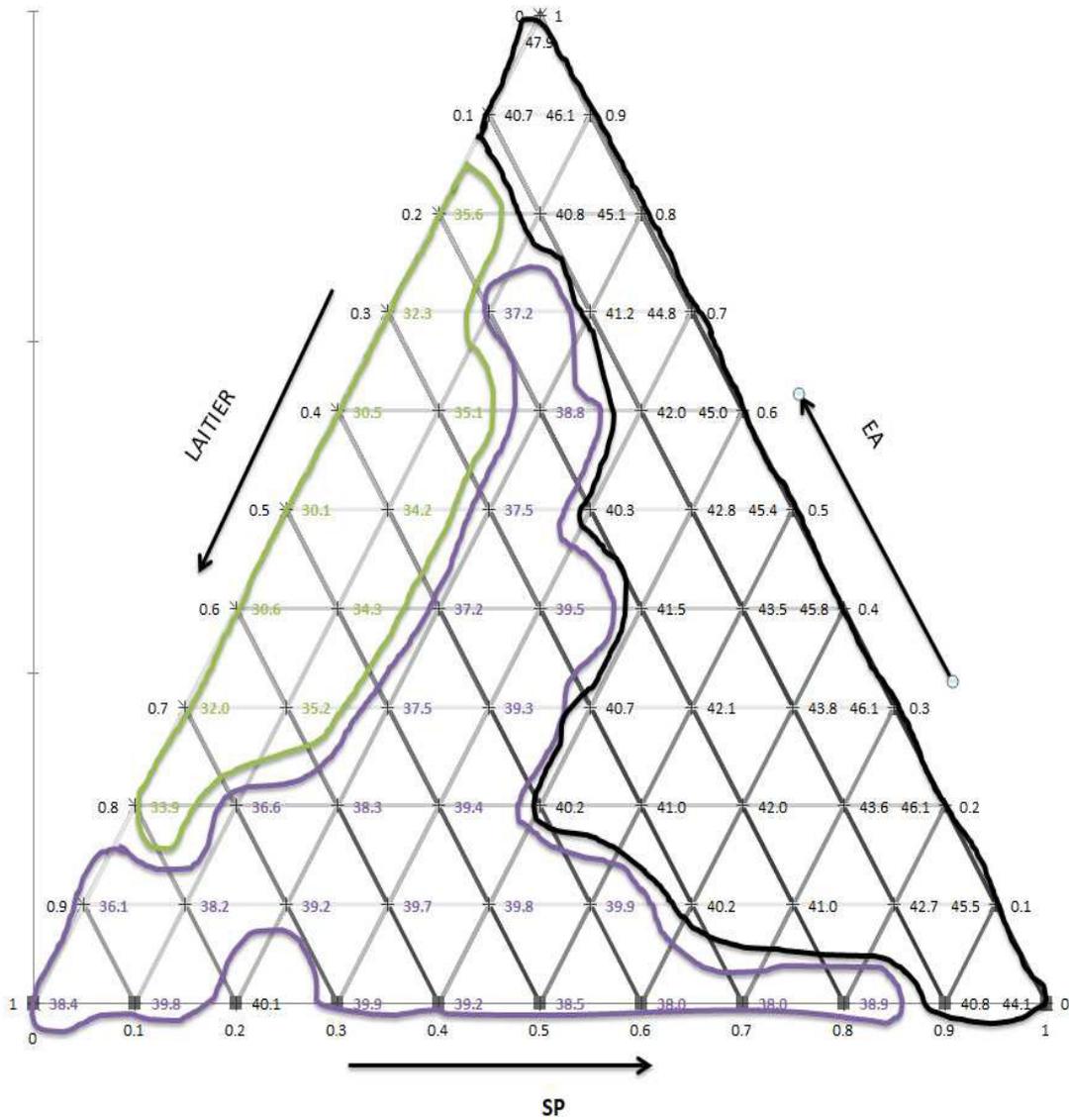


Figure III.22: Diagramme ternaire du module d'élasticité instantané à 28 j.

D'après le diagramme ternaire (Figure 22) on déduit les domaines de variation du module d'élasticité instantané à 28 j comme suit :

Domaine I (vert) : E_i varie entre 30.1 et 35.6 GPa ; module faible

Domaine II (violet) : E_i varie entre 36.1 et 39.9 GPa ; module moyen

Domaine III (noir) : E_i varie entre 40.2 et 47.5 GPa ; module fort

6. CONCLUSION

D'après les résultats obtenus on conclut que le BCR à plusier proprietes et grase à PLANIFICATION DE L'EXPERIENCE ON à l'élaboration d'une base de données utile sur le comportement des BCR

les ajouts cimentaires utilisés n'ont affectés que très légèrement les propriétés du BCR à l'état frais.

Quant à l'état on a pu noter que l'utilisation les trois ajouts cimentaires avec un taux différent nous a permis d'avoir des résistances mécanique élevées et moyennes et faibles par rapport au béton BCR témoin.

Par conséquent, sur la base de ces résultats on classer les BCR étudiés en trois domaines :

- ✓ BCR pour pavage.
- ✓ BCR pour routier.
- ✓ BCR pour barrage.

Conclusion générale

Ce sujet d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances sur la technologie des bétons type BCR composés en plus des constituants de base, de laitier, de super plastifiant et d'entraîneur d'air.

L'obtention d'un BCR de bonne qualité consiste à optimiser sa formulation en se basant sur la méthode fuller-thomson ; pour avoir une compacité désirée, sans ségrégation ni ressassage, une stabilité suffisante et une bonne résistance mécanique.

Le béton compacté au rouleau est un béton très ferme (d'affaissement nul composé de ciment, de granulats, d'eau et des ajouts cimentaire, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. Ce béton BCR, n'est pas armé et sa compacité très élevée, le BCR présente une grande résistance et une bonne durabilité, il est bien adapté aux charges des équipements lourds.

L'étude expérimentale sur les bétons BCR avec les ajouts cimentaires à l'état frais et durci, nous a permis d'optimiser leur formulation et de les caractériser en mettant en valeur l'influence des constituants complémentaires (laitier, superplastifiant et entraîneur d'air) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques .

Les résultats de ces travaux nous mènent aux conclusions suivantes :

- les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation, répondent aux spécifications des normes sur les BCR.
- l'utilisation de la méthode fuller-thomson pour la formulation des BCR s'est avérée efficace pour l'obtention de propriétés rhéologiques et physico-mécaniques souhaitées par ses avantages (volume de la pâte, compacités ...).
- l'emploi du laitier, le super plastifiant et l'entraîneur d'air dans des proportions optimisées, nous ont fournis de bonnes caractéristiques à l'état frais et durci que celui du béton témoin.
- La méthode matricielle a pour but d'économiser de la matière et du temps, on a utilisé ainsi la méthode de planification d'expérience de régression pour déterminer les domaines des compositions optimaux, chaque composition obtenue à travers cette méthode, peut répondre aux exigences mécaniques et rhéologiques des BCR selon le cahier de charge.

- l'utilisation des ajouts cimentaire est un moyen économique pour les propriétés des BCR et écologique pour diminuer la pollution et protéger l'environnement.

Perspectives

Ce travail de mémoire de fin d'étude a conduit à l'élaboration d'une base de données utile sur le comportement des BCR, l'intérêt de valoriser des matériaux comme le laitier de haut fourneau d'El Hadjar et la possibilité d'exploiter la synergie de plusieurs matériaux combinés (entraîneur d'air, super plastifiant et laitier). Il ouvre en outre des perspectives et des voies d'investigations supplémentaires afin de préciser les mécanismes à l'origine de certains phénomènes observés.

- Faire une étude approfondie sur les propriétés physico-mécaniques des BCR optimisés ou donnant les meilleurs résultats.
- Mettre en œuvre les trois types de bétons dégagés :
 - Béton pour barrage
 - Béton pour pavage
 - Béton pour route
- Faire une étude technico-économique sur ce type de béton mis en œuvre.

Annexe

Tableau III.14: Valeur des résultats calculés à l'état frais.

N°	MvF	Temps Vébé	Ac
1	2479	22	0,00
2	2422	15	2,75
3	2518	37	0,57
4	2397	13	4,03
5	2480	29	1,11
6	2537	42	0,58
7	2397	14	4,16
8	2465	26	1,60
9	2511	34	0,34
10	2542	41	0,19
11	2414	18	3,46
12	2467	25	1,23
13	2501	30	0,37
14	2522	33	0,29
15	2537	36	0,43
16	2442	22	2,25
17	2479	27	0,34
18	2499	29	0,16
19	2508	29	0,18
20	2515	28	0,80
21	2526	29	1,13
22	2473	27	0,86
23	2493	30	0,76
24	2498	29	0,92
25	2496	27	0,19
26	2493	24	0,88
27	2496	22	1,71
28	2514	22	1,73
29	2500	31	0,38
30	2502	32	1,75

31	2492	30	1,60
32	2476	26	0,50
33	2463	22	0,99
34	2458	18	2,29
35	2470	16	2,84
36	2506	17	2,08
37	2517	33	1,15
38	2500	33	2,29
39	2473	30	1,86
40	2443	26	0,42
41	2418	20	1,46
42	2404	15	3,21
43	2409	12	4,26
44	2441	12	4,05
45	2505	17	2,02
46	2515	31	1,13
47	2478	32	2,08
48	2434	29	1,39
49	2389	24	0,36
50	2351	19	2,61
51	2327	13	4,78
52	2325	10	6,31
53	2351	10	6,63
54	2413	14	5,17
55	2518	24	1,38
56	2489	25	0,00
57	2431	27	0,77
58	2368	25	0,15
59	2307	21	2,18
60	2255	16	4,76
61	2220	11	7,33
62	2209	8	9,30
63	2229	8	10,13
64	2287	13	9,23
65	2391	23	6,04
66	2548	40	0,00

Tableau III.15: Valeur des résultats de calcul pour les bétons à l'état durci.

	Rc (MPa)			Rt (MPa)		Ei	Pénét. (mm)	Mv _D Kg/m ³
	R _{c 2j}	R _{c 7j}	R _{c 28j}	R _{t 7j}	R _{t 28j}			
1	30,5	50,0	64,6	4,31	6,51	44,1	19,0	2453
2	26,27	36,33	52,81	3,28	5,09	40,8	20,5	2404
3	30,40	57,50	72,33	4,65	6,84	45,5	12,8	2439
4	23,26	29,10	45,99	2,78	4,30	38,9	20,1	2383
5	27,95	46,72	61,32	3,74	5,58	42,7	13,9	2418
6	30,66	61,27	76,15	4,89	7,00	46,1	9,0	2433
7	21,30	26,92	43,08	2,69	4,01	38,0	18,3	2385
8	26,30	41,22	54,55	3,29	4,87	41,0	13,6	2417
9	29,34	52,59	65,53	4,11	5,85	43,6	9,9	2431
10	31,30	62,12	77,02	5,06	7,03	46,1	7,2	2434
11	20,21	28,39	43,03	2,92	4,09	38,0	15,6	2402
12	25,27	39,60	51,00	3,19	4,56	40,2	12,2	2430
13	28,38	48,03	58,47	3,71	5,16	42,0	9,5	2440
14	30,44	54,76	66,44	4,40	5,95	43,8	7,8	2441
15	32,33	60,88	75,94	5,16	6,97	45,8	7,0	2442
16	19,81	32,1	44,81	3,32	4,40	38,5	12,6	2429
17	24,69	40,5	49,61	3,30	4,54	39,9	10,3	2448
18	27,63	46,2	53,91	3,57	4,80	41,0	8,6	2453
19	29,52	50,3	58,70	4,04	5,24	42,1	7,6	2449
20	31,27	54,0	65,02	4,61	5,92	43,5	7,4	2447
21	33,77	58,4	73,86	5,19	6,88	45,4	7,9	2453
22	19,92	36,7	47,37	3,79	4,81	39,2	9,6	2458
23	24,38	42,4	49,34	3,51	4,66	39,8	8,3	2467
24	26,90	45,7	50,80	3,57	4,64	40,2	7,5	2462
25	28,39	47,5	52,76	3,86	4,78	40,7	7,1	2452
26	29,74	49,0	56,23	4,28	5,15	41,5	7,3	2444
27	31,85	51,2	62,23	4,75	5,80	42,8	8,1	2446
28	35,62	55,4	71,76	5,16	6,78	45,0	9,6	2467

29	20,38	40,7	49,66	4,20	5,20	39,9	7,3	2483
30	24,16	44,1	49,14	3,70	4,81	39,7	6,9	2479
31	26,01	45,1	48,11	3,58	4,54	39,4	6,7	2463
32	26,84	44,8	47,57	3,72	4,43	39,3	6,9	2443
33	27,55	44,3	48,54	4,04	4,54	39,5	7,4	2426
34	29,03	44,8	52,02	4,43	4,92	40,3	8,3	2422
35	32,19	47,2	59,05	4,81	5,63	42,0	9,8	2437
36	37,91	52,7	70,62	5,06	6,72	44,8	11,7	2481
37	20,99	42,8	50,63	4,43	5,43	40,1	6,1	2497
38	23,85	44,0	47,97	3,75	4,85	39,2	6,4	2477
39	24,79	43,0	44,78	3,48	4,37	38,3	6,8	2447
40	24,72	40,9	42,08	3,51	4,05	37,5	7,3	2414
41	24,54	38,7	40,89	3,76	3,95	37,2	8,0	2387
42	25,14	37,5	42,21	4,12	4,12	37,5	9,0	2374
43	27,43	38,5	47,06	4,50	4,60	38,8	10,2	2382
44	32,29	42,7	56,45	4,79	5,46	41,2	11,8	2419
45	40,64	51,2	71,40	4,91	6,75	45,1	13,7	2495
46	21,59	41,5	49,25	4,35	5,37	39,8	6,5	2493
47	23,28	40,9	44,78	3,53	4,64	38,2	7,4	2456
48	23,06	38,1	39,78	3,15	4,01	36,6	8,3	2409
49	21,84	34,3	35,26	3,12	3,53	35,2	9,0	2361
50	20,52	30,6	32,24	3,33	3,26	34,3	9,8	2320
51	20,00	28,1	31,73	3,70	3,25	34,2	10,6	2295
52	21,17	27,9	34,75	4,11	3,56	35,1	11,5	2293
53	24,93	31,0	42,31	4,49	4,24	37,2	12,5	2322
54	32,19	38,6	55,41	4,71	5,34	40,8	13,8	2390
55	43,84	51,7	75,08	4,70	6,91	46,1	15,3	2506
56	22,00	35,5	44,47	3,85	4,90	38,4	9,0	2466
57	22,27	33,2	38,52	2,92	4,06	36,1	10,4	2407
58	20,65	28,9	32,05	2,47	3,32	33,9	11,5	2341
59	18,03	23,7	26,05	2,41	2,73	32,0	12,4	2276
60	15,33	18,8	21,55	2,63	2,34	30,6	13,1	2219
61	13,43	15,2	19,56	3,03	2,20	30,1	13,6	2179
62	13,24	13,9	21,08	3,53	2,37	30,5	14,1	2164
63	15,65	16,2	27,14	4,01	2,91	32,3	14,5	2182
64	21,56	23,1	38,74	4,39	3,87	35,6	14,9	2240

65	31,88	35,7	56,91	4,57	5,30	40,7	15,4	2348
66	47,50	55,0	82,64	4,44	7,25	47,9	16,0	2514

Les norme

Los Angeles NA5130

Essai de perméabilité a l'eau NF EN 12390-8

Essai VEBE NA 5103/2011

ESSAI DE RESISTANCE A LA TRACTION PAR FONDAGE NA 5108

COMPRESSION DES EPROUVETTES NF EN 12390-3

DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE EN VRAC ET LA POROSITE INTER GRANULAIRE APPARENTE NA 5089

MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE REELLE ET DU COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DES DABLES ET GRAVILLONS NA 255

EQUIVALENT DE SABLE NA455

ANALYSE GRANULOMETRIQUE NA 2607-1

ESSAI PROCTOR NORMAL – MODIFIE NA 5262 :2007

RÉSUMÉ

Le béton compacté au rouleau mélangé et compacté, placé et mise à la cure peut avoir une résistance initiale à court terme très élevée, constitue des granulats dur de diverses démontions collées entre eux par un liant.

Ce mémoire, résume un travail porte sur l'étude d'Effet des ajouts cimentaires (entraîneurs d'air et Les super plastifiants et Les laitiers de haut fourneau) sur les propriétés des BCR.

L'objectif de cette étude de recherche est d'étudier et d'évaluer l'analyse des propriétés des ciment quaternaire, et plus particulièrement de l'effet des différents types et différents parts d'ajouts cimentaires les propriétés des BCR en utilisant la planification de l'expérience, les résultats montrent que certaines combinaisons d'ajouts cimentaires dont plus synergiques que d'autres. Est La différente formulation de béton BCR, et faire une optimisation de mélange pour avoir des résultats optimal

L'étude expérimentale sur les béton BCR avec les ajouts cimentaire à l'état frais et durci, nous a permis d'optimiser leur formulation et de les caractériser en mettant en valeur l'influence des ajouts dur les propretés rhéologique et mécaniques

Finalement, des analyses sommaires ont été réalisées afin de démontrer l'impact d'un remplacement des ajouts cimentaires (entraîneurs d'air et Les super plastifiants et Les laitiers de haut fourneau) sur les propriétés physique et mécanique des BCR.

Mots-clés : BCR, état frais, état durci, affaissement, temps Vebe, résistance.

ABSTRACT

Compacted roller compacted and compacted concrete, placed and cured can have a very high initial short-term strength, is hard aggregates of various demontions bonded together by a binder.

This thesis, summarizes a work on the study of Effect of Cementitious Additions (Air Drippers and Superplasticizers and Blast Furnace Slags) on the Properties of BCRs.

The objective of this research study is to study and evaluate the analysis of the properties of quaternary cement, and more particularly the effect of different types and different parts of cementitious additions properties of BCR using planning. From experience, the results show that some combinations of cement additions of which more synergistic than others. Is the different concrete formulation BCR, and make a mixing optimization to have optimal results. The experimental study on BCR concrete with cementitious additions in the fresh and hardened state, allowed us to optimize their formulation and to characterize them by highlighting the influence of the additions dur the rheological and mechanical cleanliness.

Finally, summary analyzes were carried out to demonstrate the impact of a replacement of cementitious additions (air entrainers and superplasticizers and blast furnace slags) on the physical and mechanical properties of BCRs.

Keywords: BCR, fresh state, hardened state, sagging, Vebe time, resistance.

ملخص

مكن أن يكون للخرسانة المدمجة المضغوطة و الخرسانية المدمجة و المعالجة و الشفاء قوة أولية قصيرة الأمد عالية جدا ، و هي عبارة عن ركامات صلبة من مختلف الأطياف المستعبدين معا بواسطة الموثق.

تلخص هذه الأطروحة عملاً حول دراسة تأثير الإضافات الإسمنتية (Air Drippers و Superplasticizers و Shilling Furnace Slags) على خصائص الـ BCRs.

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة وتقييم تحليل خصائص الأسمنت الرباعي ، وعلى الأخص تأثير أنواع مختلفة وأجزاء مختلفة من خصائص الإضافات الإسمنتية لـ BCR باستخدام التخطيط. من التجربة ، تظهر النتائج أن بعض تركيبات إضافات الأسمنت التي أكثر تآزرا من غيرها. هو صياغة ملموسة مختلفة BCR ، وجعل الأمثل الاختلاط لتحقيق نتائج مثالية. سمحت لنا الدراسة التجريبية على الخرسانة BCR مع الإضافات الإسمنتية في الحالة الطازجة والمقسمة ، بتحسين صيغتها وتوصيفها من خلال تسليط الضوء على تأثير الإضافات في النظافة الانسيابية والميكانيكية.

وأخيراً ، أجريت تحليلات موجزة لإثبات تأثير استبدال الإضافات الإسمنتية (موانع الهواء والمفلزات الفانقة والخبث في الأفران العالقة) على الخواص الفيزيائية والميكانيكية لـ BCRs.

الكلمات المفتاحية: BCR ، حالة جديدة ، حالة صلبة ، ترهل ، وقت Vebe ، مقاومة.