

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences - Département de Chimie

Domaine : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie inorganique

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté et soutenu par :

Tridi Soumia

Juillet 2019

Thème

*L'effet des ajouts sur les caractéristiques intrinsèques du Béton
Compacté Routier (BCR)*

Devant le jury composé :

IREKTI Amar	Maitre de conférences B- FS- UMBB	Président
OUALIT Mehena	Maitre de conférences A- FS- UMBB	Promoteur
HAMIDOUCHE Fahim	Maitre de conférences B - FS- UMBB	Examineur
BELAIDI Mourad	Maitre-assistant A – UMMTO	Examineur
BERKIA Billel	Responsable solutions routes et infrastructure	Invité

Remerciements

Avant tout, je dois remercier Dieu tout puissant qui m'a donné la force pour mener à terme ce travail

Je tiens à remercier Mon promoteur Mr OUALIT MEHENA pour son soutien tout au long de mon travail

Sans oublier Mr BERKIA BILLEL qui m'a soutenu durant mon stage pratique

Je tiens à remercier fortement l'équipe de laboratoire du Centre de Développement de Construction (C.D.L), Messieurs DAOUED Samir, GACI Toufik, DAHAKOUMINIA Rafik, et surtout KEFIF Nabil. Ainsi que Mr ZEROUAL Redouane et Amel. Et toute personne qui m'a aidé durant mon stage pratique

Je tiens à remercier le président de jury Mr IREKTI Amar, et les membres de jury HAMIDOUCHE Fahim et BELAIDI Mourad qui ont accepté de lire, d'évaluer, et de juger, ce modeste travail

Ainsi que toute l'équipe pédagogique de notre Faculté et surtout de Département de chimie

Dédicace

Je dédie ce travail

A l'âme de mon père, A ma chère mère qui m'a soutenu tout au long de mes études

A mon frère HAMZA

A mes sœurs, HOUDA, SARA et AMINA ainsi que mes beaux-frères SABER et HICHEM

Surtout à mes neveux ; AYHEM, FIRRAS, et mes nièces RIHEM et LAYAN

A toute la famille TRIDI et MEBARKI

A mes chères amies, Amina qui m'a poussée toujours pour donner mon mieux, Houda, et Fatiha qui ont été toujours avec moi dans les moments difficiles

A toutes mes amies

A tous ceux qui me sont chers, ainsi que toute personne qui m'a aidé de proche ou de loin

Et à toute personne qui consultera mon travail un jour

TRIDI SOUMIA

Sommaire

Liste des tableaux.	
Liste des figures.	
Liste des normes.	
Liste des abréviations.	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : synthèse bibliographique sur le BCR.	
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités	3
I.3. Historique	3
I.4. Définition du BCR	4
I.5. Constituants	5
I.5.1. Granulats	5
I.5.2. Les liants	6
I.5.3. L'eau de gâchage	7
I.5.4. Les ajouts	8
I.6. Domaine d'utilisation du BCR	8
I.6.1. Le BCR en corps des barrages	8
I.6.2. Le BCR en technique routière (Pavages)	9
I.7. Avantages du BCR	10
I.7.1. Avantages et inconvénients du BCR	10
I.7.2. Inconvénients du BCR	12
I.8. Les étapes de production des pavages en BCR	12
I.8.1. La formulation	12
I.8.2. La production	13
I.8.3. Transport	13
I.8.4. Confection et mise en place du BCR	14

I.8.5. La cure du BCR	14
I.8.6. L'exécution des joints	15
I.9. Les propriétés du BCR	15
I.9.1. Les propriétés à l'état frais	15
I.9.2. Les propriétés à l'état durci	17
I.10. Comparaison entre chaussée en BCR et béton Bitumineux	18

Chapitre II : Les ajouts.

II.1. Généralités sur les adjuvant.....	20
II.2. Les adjuvants	20
II.2.1. Définition	20
II.2.2. Classification	20
II.2.3. Application et utilisation des adjuvants	23
II.2.4. Contrôle et stockage des adjuvants	24
II.3. Les fibres	24

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales.

III.1. Introduction	27
III.2. Matériaux utilisés	27
III.3. Caractérisation des matériaux utilisés	27
III.3.1. Le sable	27
III.3.2. Les graviers	31
III.3.3. Caractérisation du ciment Chamil CPJ – CEM II/B 32,5 N	33
III.4. Formulation et confection du BCR	36
III.4.1. Formulation du BCR	36
III.4.2. Confection et conservation des éprouvettes	37
III.4.3. Procédures d'essais réalisés	38
III.5. Le délai de maniabilité	42

Chapitre IV : Résultats et discussion.

IV.1. Caractérisation des matériaux	43
IV.1.1. Caractérisation du sable	43
IV.1.2. Caractérisation des graviers	46
IV.1.3. Caractérisation du ciment	51
IV.2. Formulation du BCR et procédures d'essais réalisés	51
IV.2.1. Formulation témoin	51
IV.2.2. Formulation avec un entraîneur d'air	54
IV.2.3. Formulation avec un super plastifiant	56
IV.2.4. Formulation avec retardateur de prise	58
IV.2.5. Formulation avec les fibres métalliques	61
IV.3. Le délai de maniabilité	65
Conclusion générale	69

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau	5
Figure I.2 : Etat du BCR frais lors de son déversement (Chantier de Msila).	8
Figure I.3 : Compactage du BCR (Projet de route de Msila).	9
Figure I.4 : Mise en place du BCR en pavage par Lafarge à Msila.	10
Figure.I.5 : Cure du béton par arrosages ciblés et bâche de protection contre la pluie	14
Figure 1.6 : Application d'un produit de cure après compactage du BCR – aire Industriel – Montréal	15
Figure 1.7 : Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR – aire Industriel – Montréal.	15
Figure I.8. Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB.	18
Figure I.9. Orniérage des revêtements en Béton Bitumineux et Etat d'une chaussée en BCR après 11 ans de service.	19

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales

Figure III.1. Une balance hydrostatique et une série des tamis.	28
Figure III.2. Etuve à 105° C et bac replie de sable 0/4.	28
Figure III.3: Essai d'équivalent de sable.	29
Figure III.4. Echantillonneur du sable et une Machine d'agitation.	29
Figure III.5. Balance de pesé et deux Cylindre gradué.	29
Figure III.6. Papier-filtre et un Agitateur à ailettes.	30
Figure III.7. Pycnomètre remplie de sable (0/4) et une étuve ventilée.	31
Figure III.8. Séries des grilles à fentes.	32
Figure III.9. Balance, bac et une grille à fente.	32
Figure III.10. Panier en treillis remplie de gravier (3/8) et une balance hydrostatique.	33
Figure III.11. Chiffons absorbant, doux et secs.	33
Figure III.12. Malaxeur normalisé et Appareil de Vicat muni de sa sonde de consistance.	34

Figure III.13. Bassin de conservation à 20°C.	34
Figure III.14. Appareil de Blain et une balance sensible.	35
Figure III.15. Moules prismatiques de (4x4x16cm ³) et une Table à choc.	36
Figure III.16. Appareil de compression et de flexion.	36
Figure III.17. Machine de Proctor modifié.	38
Figure III.18. La chambre humide.	38
Figure III.19. Mesure de la masse volumique du BCR à l'état frais.	39
Figure III.20. Appareil d'essai Vébé.	39
Figure III.21. Mesure de la masse volumique du BCR à l'état durci.	40
Figure III.22. Presse hydraulique pour béton et mortier.	40
Figure III.23. Essai de traction par fendage.	41
Figure III.24. Eprouvette soumise à l'essai de fendage.	41
Figure III.25. Dispositif de calcul du module d'élasticité.	42

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : Courbe granulométrique du sable (0/4) utilisé.	44
Figure IV.2. Courbe granulométrique du gravier 3/8.	47
Figure IV.3 : Courbe granulométrique de la fraction du gravier 8/15.	48
Figure IV.4 : Résultats de la résistance à la compression de la formulation témoin.	54
Figure IV.5. Résistance à la traction indirecte de la formulation témoin.	55
Figure IV.6. Résultats de la résistance à la compression de la formulation contenant un entraîneur d'air.	56
Figure IV.7. Résistance à la traction indirecte de la formulation contenant un entraîneur d'air.	57
Figure IV.8. Résultats de la résistance à la compression de formulation contenant un super plastifiant.	59
Figure IV.9. Résistance à la traction indirecte de formulation contenant un super plastifiant.	59
Figure IV.10. Résultats de la résistance à la compression de la formulation contenant un retardateur de prise.	61

Figure IV.11. Résistance à la traction indirecte de la formulation contenant un retardateur de prise.	62
Figure IV.12. Résultats de la résistance à la compression de formulation contenant des fibres métalliques.	63
Figure IV.13 : Résistance à la traction indirecte de la formulation avec fibres métalliques.	64
Figure IV.14. Résistance à la compression à 7 et 28 jours.	65
Figure IV.15. Résistance à la traction indirecte à 7 et 28 jours.	66
Figure IV.16. Evolution du Module d'élasticité des échantillons selon l'ajout.	66
Figure IV.17. Courbe de délai de maniabilité du BCR témoin.	67
Figure IV.18. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant un entraîneur d'air.	68
Figure IV.19. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant un super plastifiant.	68
Figure IV.20. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant un retardateur de prise.	69
Figure IV.21. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant des fibres métalliques.	69
Figure IV.22. Les délais de maniabilité des formulations réalisées.	70

Liste des tableaux :

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le BCR

Tableau I.1 : Les intérêts du BCR	10
--	----

Chapitre II : les ajouts

Tableau II.1 : Quelques exemples d'utilisation de quelques adjuvants utilisés dans le BCR.	23
---	----

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1. Analyse granulométrique du sable (0/4) utilisé.	44
Tableau IV.2. Classification des sables en fonction du module de finesse.	45
Tableau IV.3. Résultats des essais d'équivalent de sable.	45
Tableau IV.4. Les résultats de l'essai au Bleu de Méthylène du sable 0/4.	46
Tableau IV.5. Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et coefficient d'absorption d'eau du sable 0/4.	46
Tableau IV.6. Analyse granulométrique du gravier 3/8.	47
Tableau IV.7. Analyse granulométrique de la fraction du gravier 8/15.	48
Tableau IV.8 : Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8.	49
Tableau IV.9 : Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.	50
Tableau IV.10. Masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 3/8.	51
Tableau IV.11. Masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 8/15.	51
Tableau IV.12 : Pourcentage des granulats utilisé dans la formulation.	52
Tableau IV.13. Dosage des autres constituants et les spécifications.	52
Tableau IV.14. Le mélange de la formulation témoin.	52
Tableau IV.15 : Les résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR Témoin.	53
Tableau IV.16. Les résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR Témoin.	53
Tableau IV.17. Valeurs du module d'élasticité de la formulation témoin.	54

Tableau IV.18. Le mélange de formulation avec un entraîneur d'air.	55
Tableau IV.19. Résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR contenant un entraîneur d'air.	55
Tableau IV.20. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR contenant un entraîneur d'air.	56
Tableau IV.21 : Le module E de formulation d'entraîneur d'air.	56
Tableau IV.22. Le mélange de formulation avec super plastifiant.	57
Tableau IV.23. Résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR formulé avec super plastifiant.	57
Tableau IV.24. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR contenant un super plastifiant.	58
Tableau IV.25. Valeurs du module d'élasticité du BCR contenant un super plastifiant.	59
Tableau IV.26. Le mélange de la formulation avec Retardateur de prise.	59
Tableau IV.27. Les résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR contenant un retardateur de prise.	59
Tableau IV.28. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR contenant un retardateur de prise.	60
Tableau IV.29. Valeurs du module d'élasticité de la formulation contenant un retardateur de prise.	61
Tableau IV.30. Le mélange de formulation contenant des fibres métalliques.	62
Tableau IV.31. Résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR contenant des fibres métalliques.	62
Tableau IV.32. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR avec fibres métalliques.	63
Tableau IV.33. Le module d'élasticité de formulation avec fibres métalliques.	63

Liste des normes

NA 2607 : Analyse granulométrique

NA 455 : Equivalent de sable selon la norme

NA 1984 : Essai au bleu de méthylène

NF EN 1097-6 : Masse volumique réelle, masse volumique apparente et coefficient d'absorption d'eau selon la norme

NF EN 933-3 : Coefficient d'aplatissement

NA 442-2013 : performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques de ciment

EN 196-3 : La consistance normale

EN 196-6 : La finesse de mouture (Blaine)

EN 196-1 : Essai de mortier normalisé

NF P 49 093 : Proctor modifié

NF EN 12350-6 : La masse volumique

NF EN 12390-7 : La masse volumique sur béton durci

NFP18-411 : La résistance à la compression

NF.P 18 408 : La résistance à la traction par fendage

Liste des abréviations

BCR : Béton Compacté routier / au rouleau

BB : Béton Bitumineux

MB : Bleu de Méthylène

D_i : diamètre maximale

d_i : diamètre minimale

σ_{28} : La résistance moyenne à la compression à 28 jours.

σ_c : La classe du ciment qu'on a utilisé.

C : Le dosage du ciment qu'on a choisis.

G : car la qualité des granulats qu'on a utilisé est courante et le D_{\max} et ≤ 20 mm.

E/C : eau / ciment

G/S : gravier / sable

DxH : diamètre x la hauteur

Présentation de LAFARGE

Lafarge est un groupe français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur.

La société produit et vend dans le monde entier principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi. Lafarge Holcim a développé des ciments spéciaux et des bétons innovants de renommée internationale.

Le 10 juillet 2015, Lafarge fusionne avec le n°2 mondial du secteur, le groupe suisse **Holcim**. Le nouveau groupe est officiellement lancé le 15 juillet 2015 sous le nom de **LafargeHolcim**.

Présent dans 82 pays, le groupe emploie environ 63 000 personnes sur 1 612 sites de production. En 2014, le chiffre d'affaires de Lafarge s'est élevé à 12,843 milliards d'euros, dont 66,5 % dans le ciment et 33,1 % dans le béton et les granulats.

2- Lafarge en Algérie :

L'Algérie est un marché stratégique pour le Groupe **LafargeHolcim**. Le secteur de la construction est en croissance depuis 2000, avec d'importants besoins en matériaux de construction et de solutions constructives.

LafargeHolcim Algérie est présent sur toute la chaîne de valeur des matériaux de construction « ciments, liants routiers, ciments spéciaux pour les puits d'hydrocarbures, mortiers, granulats, bétons, plâtres, sacs et distribution » au travers de différents modèles d'affaires.

LafargeHolcim Algérie emploie 5500 collaborateurs et est fortement engagé dans le développement économique, social et environnemental du pays.

3- Réalisations :

Les dates clés et produits innovants qui ont fait de **LafargeHolcim Algérie** le leader des matériaux de construction. De nombreux édifices, infrastructures, ponts et autres bâtiments d'architectes utilisent les produits innovants du Groupe.

- En 2002 :
 - Partenariat COLPA « Lafarge & Cosider », usine de production de plâtre à Bouira.
- En 2003 :
 - Construction de la cimenterie de M'Sila, la plus importante en Algérie.
- En 2007 :
 - Construction de la 1ère ligne de ciment blanc à Oggaz et lancement de l'activité Béton & Granulats.
- En 2008 :
 - Partenariat Lafarge GICA pour l'usine de SCMI Meftah.

- Démarrage nouvelle ligne de Ciment gris à Oggaz.
- En 2010 :
 - Lancement de la gamme produits « Chamil, Matine, Mokaouem, Malaki ».
- En 2013 :
 - Lancement de la 1ère enseigne de vente de matériaux de construction BATISTORE
 - Inauguration du premier laboratoire de la construction « CDL » en Afrique.
 - Démarrage à M'Sila du 5ème broyeur Ciment.
- En 2014 :
 - Partenariat CILAS: Lancement de la construction d'une nouvelle cimenterie à Biskra en partenariat avec le Groupe Souakri.
- En 2015 :
 - Lancement du ciment à haute performance SARIE.
 - Fusion des Groupes Lafarge et Holcim pour former le nouveau Groupe Leader des matériaux de construction LafargeHolcim.
- En 2016 :
 - Démarrage CILAS Biskra.
 - Démarrage de l'activité ciment et mortiers - CMA Meftah.
 - Démarrage de la carrière de granulats à Kef Azrou.
 - Démarrage du 3ème four de plâtre COLPA.
 - 6 nouveaux Batistore.
- En 2017 :
 - Lancement d'un liant pour tous travaux de maçonnerie et finition « MOUKAMIL ».
 - Lancement d'une nouvelle gamme Mortier : « ciment colle blanc, mortier multi-usages, enduit monocouche ».
 - Lancement de la solution Route liant routier Ardia 600.
 - 7 nouveaux Batistore.

4- Laboratoire de développement de la construction (CDL) :

Depuis longtemps, **Lafarge Algérie** place l'innovation au cœur de ses métiers. Facteur-clé de croissance du groupe, Pour cela, nous nous appuyons sur une structure centrale puissante et des laboratoires de développement implantés au plus près des marchés.

Le **CDL** est 1^{er} laboratoire dédié au développement de nouveaux produits et solutions dans la construction, en Algérie et en Afrique, permettant de tester toutes les innovations du groupe

LafargeHolcim pour l'Algérie, et développer de nouvelles solutions pour l'ensemble des besoins de la construction.

En Algérie, Lafarge a implanté en 2013 son premier laboratoire de développement de la construction.

Ce pôle de recherche, premier du genre en Afrique, se veut être une plate-forme centralisant le développement de toutes les innovations du groupe Lafarge pour l'Algérie. Une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs, d'architectes et de techniciens y sont installés pour mettre au point les futurs produits, systèmes et solutions à base béton pour l'ensemble de la construction.

5- Collaborations et partenariats :

LafargeHolcim Algérie possède deux cimenteries [M'Sila et Oggaz] et la cimenterie Cilas à Biskra en partenariat avec le Groupe Souakri pour une capacité totale de production de 11.5 Mt/an. L'activité Béton Prêt à l'Emploi opère 19 centrales à travers le pays pour une capacité de 1 mt/an. LafargeHolcim Algérie emploie 4500 collaborateurs et est fortement engagée dans le développement économique, social et environnemental en Algérie.

➤ 4500 COLLABORATEURS

- 3 Cimenteries « Msila, Oggaz, Biskra » 11.5 MT/an
- 19 Stations de BPE 1 M M³/an
- 1 Usine de sacs cap 130 M/an
- 1 Laboratoire de la Construction
- 2 Centres de Distribution
- 1 Entreprise de logistique

➤ PARTENARIAT PRIVÉ PUBLIC

- SCMI Meftah avec le Groupe GICA ciment 1.5 MT/an
- COLPA Bouira JV avec Cosider plâtres 450 KT/an

➤ PARTENARIAT PRIVÉ

- CILAS Biskra avec le Groupe Souakri ciment 2.7 MT/an
- CMA Meftah avec le Groupe Souakri, mortiers & ciments spéciaux 100 KT/an
- Ceralg avec le Groupe Zani Importation ciment
- Station Agrégats Azrou, granulats 1.2 MT/an

➤ FRANCHISES

- BATISTORE 1ère enseigne des matériaux de construction

➤ 30 points de vente

➤ Objectif 100 magasins en 2020

Introduction Générale

Introduction générale

1. Préambule

Depuis l'antiquité, l'homme a cherché à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. De nos jours, le secteur de la construction et travaux publics nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux. Ce qui a rendu le béton de toutes ses sortes le matériau le plus fabriqué et utilisé dans le monde. Ce sujet entre dans le cadre des travaux de recherche que nous avons effectué sur une technologie considérée comme évolutive en utilisant un nouveau matériau qui est le Béton Compacté au Rouleau (BCR).

Le BCR, comme tout béton, est constitué de granulats (représentent la matière première principale avec 60 à 70 % de son volume), du ciment, d'eau, et des ajouts (adjuvants, fibre,...), il est caractérisé par son affaissement nul et son délai de réalisation réduit, Il peut être considéré comme un matériau économique, rentable et non polluant.

Le BCR s'est développé selon deux axes différents: le BCR pour barrages et ouvrages massifs et le BCR pour routes (pavages), A l'état frais, il se comporte comme un sol légèrement humide mais, en passant à l'état durci, il se comporte comme un béton. Pour cela, il est compacté en place en utilisant un matériel spécifique tel que les rouleaux compacteurs.

De point de vue énergie, les études montrent que la chaussée souple fléchit davantage par rapport à la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce phénomène mène à conclure, d'après ces études, qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple et que la rigidité de la chaussée en BCR réduit la déflexion et peut diminuer ainsi la consommation de carburant jusqu'à 20 % [1]. En effet, l'utilisation de ce matériau en revêtement ou aussi en couche de base est une alternative pour la résolution des problèmes de fortes déformations et dégradations enregistrées sur les rues, les intersections et les routes fortement sollicitées ainsi que pour les stations portuaires, les aéroports, les parcs et les aires de stationnement

Malgré que l'utilisation du BCR revienne aux années 1930 et que plusieurs projets ont été réalisés en utilisant ce matériau en pavage aux USA, en Espagne, en France, en Australie et dans d'autres pays, son influence sur certaines propriétés est encore mal connue c'est pourquoi son utilisation n'est pas très répandue jusqu'à maintenant en Algérie et en Afrique.

2. Objectif

Dans ce travail, on cherche à étudier l'effet de quelques ajouts sur les caractéristiques intrinsèques du BCR en technologie routière avec une composition à base de granulats de gisement locaux et un faible dosage en ciment. Afin de montrer les nombreux avantages qu'offrent les chaussées en BCR tant du point de vue résistance mécanique plutôt qu'économique. Sans oublier la durée de vie de ce dernier.

3. Structure du mémoire

Ce mémoire est devisé en deux parties. Une partie théorique qui contient deux chapitres à savoir un chapitre comme synthèse bibliographique sur le béton compacté au rouleau (BCR) et un aperçu sur les ajouts.

La deuxième partie qui contient la partie expérimentale, est devisée en deux chapitres : le chapitre III présente les caractérisations des matériaux utilisés, la formulation du béton compacté au rouleau et la maniabilité des différents mélanges du BCR avec ajouts, alors que le quatrième chapitre présente les résultats et les discussions obtenus.

Partie théorique

Chapitre I :
Synthèse
bibliographique sur le
BCR.

I.1. Introduction

La partie théorique est divisée en deux chapitres, le premier consiste à donner une idée générale sur le BCR (sa définition, ses composants, ses caractéristiques, ses avantages et inconvénients,... etc.) et un deuxième chapitre où on parle des différents ajouts (adjuvants et fibre) qui peut être employés dans ce genre de béton.

I.2. Généralités

Les deux types du béton en générale sont :

- 1- Béton de construction : comme le béton armé.
- 2- béton pour chaussée : le plus fréquent est le béton bitumineux (BB) et le plus récent le béton compacté au rouleau (BCR), connu par le béton des pavages et des barrages. Le béton compacté routier (le cas de notre étude) peut être utilisé comme couche support ou autant que couche de roulement.

I.3. Historique

Le BCR a connu un énorme succès dans les domaines de routes et de barrages grâce aux avantages qu'il apporte aux concepteurs et producteurs, sur les plans technique et économique; son faible coût, sa rapidité de mise en place et sa performance mécanique.

Des chercheurs tel que Jeuffroy et Sauterey [2] ont considéré que l'emploi des liants hydrauliques ou pouzzolaniques dans les structures de chaussées a commencé dès le 1^{er} siècle avant J-C par les Romains, puisqu'une proportion de liant (deux parties de pouzzolane naturelle plus une 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.

Au Canada, la première utilisation d'une technique sol-ciment semblable au BCR dans les projets routiers fut en 1976 avec la réalisation d'un revêtement de voies d'accès et des cours de triage pour des entreposages forestières de surface de 52000 m² en Colombie-Britannique sur l'île de Vancouver (Figure I.1). Son but est de faire un remblai qui avait une capacité portante plus élevée qu'un remblai granulaire compacté.

Suite au succès du projet de Caycuse, d'autres surfaces de stockage de billes de bois ont été réalisées.

Après 1980, au moins dix autres pays (France, USA, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon) ont construit chacun plus de 10 000 m² de revêtement en BCR [3].

Le premier projet d'importance a eu lieu en 1995 avec la construction d'un revêtement de 25000 m² à la fonderie Home de métallurgie pour l'entreprise des scories de laitier concassé (Québec). Il s'agissait d'un BCR à haute performance de 350 mm d'épaisseur avec une résistance en compression à 7 jours de 55 MPA et une résistance en flexion de 5 MPA.

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

En Afrique, le Béton Compacté au Rouleau reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est développée que pour la construction des barrages et son utilisation dans le domaine des routes n'est pas encore répandue [4] [5].

I.4. Définition du BCR

Il n'existe pas de définition du Béton Compacté au Rouleau (BCR) à la fois simple et rigoureuse.

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) est un béton raide, non armé, d'affaissement nul composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. Du point de vue structural, le BCR est un ouvrage rigide présentant le même comportement qu'une dalle de béton et est soumis aux mêmes critères de conception [6].

Certains définissent le BCR comme étant un matériau intermédiaire entre le sol et le béton. Dans les premières heures de son malaxage, il se comporte comme un sol (techniques de mise en place et compactage) et après quelques jours, il devient un béton indéformable; par contre d'autres la considère comme une mauvaise définition car elle évoque immédiatement l'idée d'un « sous-béton » [7].

Le béton compacté au rouleau se différencie d'un béton traditionnel ; son utilité, sa formulation et sa mise en place sont distinctes. C'est un béton sec utilisé pour la construction de pavages et de barrages. Les matériaux utilisés lors de la confection d'un BCR sont les mêmes que ceux utilisés dans un béton classique, mais on les retrouve en proportion différente. La principale caractéristique du BCR est son faible volume de pâte, autrement dit, il contient peu d'eau et peu de matériaux cimentaires [8].

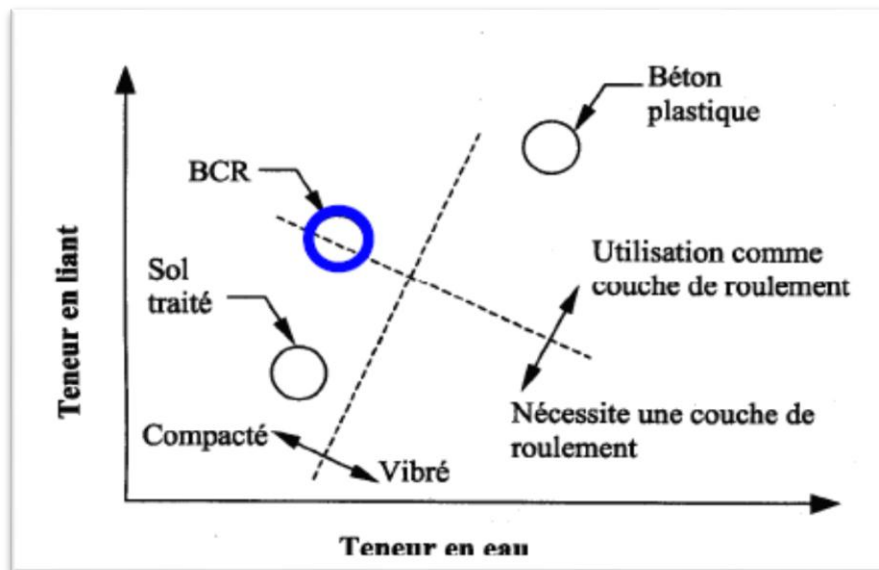


Figure I.1 : Définition du BCR selon la teneur en liant et en eau [8].

I.5. Constituants

I.5.1. 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 [9] 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 car ils représentent approximativement 75 à 85% de son volume total.

En effet, le concepteur doit accorder une attention particulière au choix des granulats employés car ils affectent sa propriété physico-mécanique aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

- A l'état frais, la maniabilité, le potentiel à ségréguer et la souplesse du mélange sous les rouleaux compacteur sont largement influencés par la nature et le type des granulats utilisés.
- A l'état durci, la résistance mécanique, le module d'élasticité et les propriétés thermiques sont grandement affectés par les propriétés intrinsèques des granulats. La compactibilité, la densité in situ et conséquemment l'état final de la surface de chaussée (surface de l'usure) sont également influencés par la gradation des granulats [10].

Le squelette granulaire d'un mélange du BCR se compose; des granulats fins (80 μ m- 5mm) constitués de sable naturel ou artificiel, ou d'un mélange des deux; de granulats grossiers (>5 mm) concassés ou roulés, ou un mélange des deux. Les différentes fractions granulaires peuvent être pré-malaxées et stockées comme une seule fraction dans le cas des grands projets.

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

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

Mais il est important de limiter le diamètre maximal nominal de granulats grossiers afin de minimiser le risque de ségrégation et de faciliter les conditions de mise en œuvre. Selon la destination du projet, le diamètre maximal de granulats est limité généralement, à 20 mm pour les projets routiers et à 50 mm pour les barrages.

Les granulats fins permettent de remplir les vides inter-granulaires et facilitent donc le compactage, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc une bonne compacité à l'état durci [11], Toutefois, un pourcentage élevé de fins entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place.

Les différentes proportions de granulats doivent être choisies dans le but de réaliser les objectifs suivants : (1) assurer une consistance appréciable, (2) aboutir une bonne compactibilité, (3) satisfaire les spécifications techniques exigées (4) obtenir un fini de surface appréciable [12].

I.5.2. Les liants

Par définition simple, le liant est un produit qui sert à agglomérer en masse solide des particules solides sous forme de poudre ou de granulats appelés aussi agrégats; Les liants rentrent dans la fabrication des peintures, des colles, des mastics, des mortiers, etc... Il est utilisé dans la construction et dans l'industrie routière afin de répartir la pression uniformément sur toute la surface des particules.

Son utilisation répond à pas mal d'exigences parmi lesquelles la résistance mécanique, les critères de durabilité exigées ainsi que les contraintes économiques telles que : la disponibilité et le coût des ajouts, le coût du transport, etc. Le liant est de type hydraulique, fin, pulvérulent, et peut être :

- Le ciment Portland : CPA-CEM I, CPJ-CEM II dont la classe varie en fonction des performances voulues.

- Les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre : CHF-CEM III, CLK-CEM III, CPZ CEM IV, CLC-CEM V. Ces ciments présentent un début de prise plus lent et un durcissement plus progressif et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du BCR [13], ils permettent d'obtenir une plus faible exothermie et un délai de maniabilité beaucoup plus long. 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.

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 C_3A 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 [14].

Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 200 à 350 kg/m³, soit une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs, Il faut noter qu'une teneur trop élevée de ciment favorise les fissures, augmente le coût de production et ne permet pas nécessairement une augmentation des performances [13]. Par contre, il augmente le phénomène de retrait.

Le choix du type et du dosage de ciment pour la confection du BCR est fonction des exigences requises et de la destination du projet. Pour un BCR routier, la quantité de ciment est plus grande par rapport à un BCR d'ouvrage massif comme le barrage, puisque les sollicitations mécaniques sont plus grandes. En revanche, il est important de minimiser la quantité de ciment pour un BCR destiné aux barrages afin de réduire la chaleur dégagée pendant l'hydratation [15].

I.5.3. L'eau de gâchage

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

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

Il faut noter qu'un excès d'eau entraîne une instabilité rendant l'uni défectueux tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de prise localisés [16].

I.5.4. Les ajouts

Dans un béton, La plupart du temps des ajouts sont employés afin de modifier ou améliorer certaines caractéristiques avec une faible teneur. (On abordera les détails dans le chapitre suivant).

I.6. Domaine d'utilisation du BCR

Le BCR est un béton utilisé pour la construction des barrages ou en technique routière.

I.6.1. Le BCR en corps des barrages

Pour faire des économies et résoudre le problème d'utilisation des grandes quantités de terre dans les digues de retenue, le BCR en tant que matériau est utilisé dans l'ensemble du corps du barrage ou comme un recouvrement pour la protection des deux faces. L'avantage de cette technique est que ce matériau permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval. L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du barrage.

La dimension maximale du granulat varie de 60 à 150 mm ; Pour ces ouvrages, les résistances à la compression varient de 7 à 20 MPA. Pratiquement et après être déversé, le mélange de BCR est étalé au moyen de niveleuses ou de bulldozers mécaniques puis il est compacté au moyen de rouleaux compacteurs vibrants. 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 [17]. On emploie, dans la construction de barrages en BCR, les mêmes techniques de réalisation utilisées pour les remblais en terre comme c'est montré sur les Figures I.2 et I.3.



Figure I.2 : Etat du BCR frais lors de son déversement (Chantier de Msila).



Figure I.3 : Compaction du BCR (projet de route de msila).

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. En Algérie, Le barrage de Beni Haroun est considéré comme le plus grand barrage en Afrique avec 710 m de longueur et 120 m de hauteur.

I.6.2. Le BCR en technique routière (Pavages)

Par définition, le BCR pour pavages tient son nom de la technique de compactage employée pour son serrage et sa densification. Les chercheurs expliquent la différence entre les techniques de BCR en barrage et pavages par le fait que les procédures pour la construction d'un pavage en BCR exigent des contrôles plus rigoureux que dans le cas des barrages. Ce matériau contient les mêmes constituants de base que ceux employés pour le BC tel que ciment, granulats (sable et gravier) et eau. Les techniques de mise en œuvre utilisent, pour l'épandage, le même matériel utilisé pour les revêtements en Béton Bitumineux (BB) à haute densité. Le mélange employé est raide et ferme et il faut le compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques. De plus, une fois durci, La résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPa. L'utilisation du BCR pour les pavages varie d'une épaisseur de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts (Figure I.5). Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulats est limitée à 20 mm [17].

Du point de vue durabilité, le revêtement en BCR a montré des bonnes performances. Ces meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en œuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voie d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi

que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telle que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes [17, 18].



Figure I.4 : Mise en place du BCR en pavage par lafarge à Msila.

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 [17].

I.7. Avantages et inconvénients du BCR

I.7.1. Avantages du BCR

Il s'agit d'un revêtement en béton, donc d'un revêtement robuste et durable, même sous l'action de très lourdes charges dans des conditions défavorables. De plus, c'est un revêtement dont la mise en place s'exécute rapidement selon des techniques appropriées. Combinés à un coût de réalisation peu élevé, sa longévité et le peu d'entretien qu'il exige en font une solution économique de bonne valeur [2].

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

Tableau I.1 : Les intérêts du BCR [2, 19, 20, 21].

Atouts	Conséquences
Forte résistance à la compression et la flexion.	Supporte les charges concentrées lourdes et l'impact de matériel minier, industriel et militaire lourd.
Forte résistance au cisaillement	Elimine l'orniérage et les réparations qui s'ensuivent.

Haute densité, Faible absorption	Garantit une excellente durabilité en dépit des gels dégelés et élimine les infiltrations à travers le revêtement.
Faible teneur en eau, Faible rapport E/C	Augmente la résistance, réduit la perméabilité et accroît la durabilité et la résistance aux attaques chimiques.
Ni armature d'acier, ni goujons	Accélère et simplifie la mise en place, réduit le coût et élimine le besoin de mesures destinées à limiter la corrosion de l'armature d'acier.
Ni coffrages, ni finition	Accélère les travaux, réduit le coût et la main d'œuvre.
Surface rigide, durable et claire.	Résiste à l'abrasion, élimine la couche de roulement et réduit donc le coût. La clarté de la surface réduit les besoins d'éclairage dans les parcs de stationnement et aires de stockage.
Emboîtement solidaire des granulats	Assure une forte résistance au cisaillement au niveau des joints et des fissures désordonnées, ce qui empêche les déplacements verticaux ou les cassures.
La durabilité	L'un des avantages les mieux connus du béton est sa durabilité. Cette durabilité mène à une réduction des travaux de construction et d'entretien qui entravent la circulation.
Moins de travaux d'entretien	ERES indique en outre dans son rapport que les routes asphaltées exigent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contraste, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton qu'après 12 ans.
Moins de déformation	Vu la souplesse du revêtement en asphalte, les véhicules de fort tonnage peuvent finir par y creuser des ornières. La poussée qu'ils exercent sur le revêtement peut aussi, à long terme, le faire plisser et lui donner l'apparence d'une tôle ondulée. La rigidité du béton empêche toutefois ce genre de déformations de se produire. D'autre part le béton ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur.
Des économies de carburant (jusqu'à 20 %)	La chaussée souple fléchit d'avantage que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à supposer qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple. La rigidité de la chaussée en béton réduit la déflexion et diminue ainsi la consommation de carburant.

I.7.2. Inconvénients du BCR

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

- **La texture rugueuse :** La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être adaptés selon les différents types d'applications visées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique.
- L'uni d'une chaussée est exprimé par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a resté toujours un problème limitant relativement les applications du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage [22].
- Qualité des parements.
- Difficulté d'entraîner de l'aire.
- Coût de transport des matières cimentaire en régions éloignées. Dans les grands projets de construction en BCR. On utilise de plus en plus des installations de production en continu (similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux) qui ont des taux de production beaucoup plus importants [23].

I.8. Les étapes de production des pavages en BCR

Pour la construction des routes secondaires à circulation légère, il est possible, selon Coquand [24] et Smith et al. [25], que la dalle puisse reposer directement sur le terrain. Par contre, les routes à chaussées en BCR sont destinées le plus souvent aux forts trafics et à la circulation lourde.

Les techniques de mise en œuvre des pavages en BCR, d'après Gauthier et al. [4], sont semblables à celles du BB puisqu'elles sont effectuées à l'aide des mêmes équipements employés pour la construction des revêtements en BB. Dont les étapes sont les suivants :

I.8.1. La formulation

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

I.8.1.1. Les méthodes de formulation

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

- **Méthode basée sur les limites de maniabilité**

Elle consiste à déterminer les proportions du mélange de telle sorte à atteindre une maniabilité optimale qui peut satisfaire aux exigences techniques.

- **Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique**

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

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

- **Autres méthodes**

Outre les méthodes présentées précédemment, on y présente d'autres procédures, qui permettent de formuler le BCR. Mais il semble qu'elles sont plus appropriées aux mélanges de BCR destinés aux barrages.

I.8.2. La production

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

Le malaxage du BCR doit assurer une dispersion efficace de la faible quantité d'eau de gâchage et du ciment dans le mélange et peut être produit en centrale fixe ou par une centrale mobile, cela dépend de la proximité et de la disponibilité des unités de production, de la quantité de béton à mettre en place et du budget à investir.

I.8.3. Transport

Le BCR est transporté de la centrale (fixe ou mobile) au chantier à l'aide de camions à bennes basculantes. Les camions doivent être munis de toiles de protection pour réduire l'évaporation de l'eau causée par l'action du soleil et du vent.

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). Il est 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.

I.8.4. Confection et mise en place du BCR

I.8.5. La cure du BCR

Pour minimiser les retraits de séchage pendant la mise en place, il est important de maintenir l'humidité superficielle des surfaces exposées afin de ralentir le phénomène de séchage (Figure 1.18) par les procédés suivants:

- Retardateur d'évaporation.
- Vaporisation d'eau en bruine.
- Application d'un produit de cure pigmenté blanc juste après le compactage final du BCR.

En raison de la faible teneur en eau du BCR, une cure soignée s'impose, immédiatement après le compactage. Afin d'éviter un délavage à la surface fraîchement compactée, l'eau ne doit être, au début, que finement vaporisée. La cure par aspersion d'eau doit durer au moins trois jours [26].



Figure.I.5 : Cure du béton par arrosages ciblés et bâche de protection contre la pluie [26].



Figure 1.6 : Application d'un produit de cure après compactage du BCR - aire Industriel - montréal [17].

I.8.6. L'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. En général, ces joints doivent être sciés après durcissement du béton afin d'obtenir un bon uni de chaussée (Figure 1.7). On distingue des joints de construction disposés longitudinalement et parallèles à l'axe de la chaussée.



Figure 1.7 : Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR - aire Industriel - montréal [25]

I.9. Les propriétés du BCR

I.9.1. Les propriétés à l'état frais

I.9.1.1. Masse volumique

Elle permet de déterminer la masse d'un volume donnée et sert de moyen de vérification de l'uniformité du BCR. Sa connaissance est importante pour un bon compactage du matériau puisqu'elle nous renseigne sur le degré de compactage sur le terrain. Elle est déterminée au laboratoire au cours de l'essai Proctor modifié.

I.9.1.2. Ségrégation

C'est la ségrégation des différents composants lors de la mise en place et elle a pour conséquence une perte d'homogénéité et de résistance. A cause du faible volume d'eau, le BCR est très sensible à la ségrégation. Cette dernière est fonction de la granulométrie, de la grosseur maximale du gros granulat et des caractéristiques de la pâte.

Le passage des équipements de compactage sur les zones de ségrégation doit être précédé de l'ajout de matériaux de dimension inférieure à 5 mm tamisés à partir du BCR frais.

I.9.1.3. La maniabilité

Elle désigne la facilité de mise en place et renseigne sur l'uniformité du BCR.

Elle est influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels nous pouvons citer:

- **Le volume et la fluidité de la pâte:** la maniabilité augmente avec ces facteurs;
- **La forme, la texture et l'absorptivité des granulats:** la maniabilité est plus importante dans le cas de particules rondes que plates. Les granulats poreux absorbent l'eau et réduisent la maniabilité, tandis que les granulats rugueux exigent une plus grande quantité de pâte de ciment.

La qualité du BCR est étroitement liée à sa maniabilité à l'état frais; elle ne doit être ni trop faible, ni trop élevée.

- Une maniabilité trop élevée, donc une augmentation du rapport E/C, a pour effet une diminution des propriétés mécaniques du BCR et de la durabilité.
- Une maniabilité trop faible a comme conséquence une augmentation importante du volume des vides de compactage d'où une diminution des propriétés mécaniques et de la durabilité du BCR. Et une augmentation de la ségrégation, une diminution de l'adhérence entre les couches et une mauvaise qualité de surface due à un uni grossier ouvert.

La maniabilité du BCR est déterminée à l'aide de l'appareil Vebe. Elle est exprimée en seconde.

I.9.2. Les propriétés à l'état durci

I.9.2.1. Résistance à la compression

En effet, la capacité du BCR à supporter des charges lourdes concentrées résulte de sa forte résistance en compression.

Cette résistance s'explique par deux raisons:

- le faible rapport E/C entraîne une diminution de la porosité de la pâte donc une augmentation de la résistance à la compression.
- la forte compacité du squelette granulaire a pour conséquence une meilleure disposition des granulats qui s'opposent ainsi à la propagation des micro-fissures provoquées dans la pâte par le retrait; ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la compression.

I.9.2.2. Module d'élasticité (Module de Young)

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

Elle est influencée par la propriété de la pâte de ciment hydratée ainsi que celle des granulats. Le module d'élasticité moyen du BCR est supérieur à 20 GPa après 28 jours de mûrissement et est indépendant des variations de température contrairement au béton bitumineux.

I.9.2.3. Le retrait et le gonflement

Le retrait correspond à une diminution apparente du volume de béton. On distingue principalement trois types de retraits:

- le retrait avant prise causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton;
- le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment ;
- le retrait hydraulique qui est une conséquence de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment.

I.9.2.4. La durabilité

Un béton est d'autant plus durable qu'il a la capacité de résister à la pénétration d'agents agressifs dans les pores. Le compactage permettra ainsi de minimiser cette porosité d'où le caractère durable du BCR.

I.9.2.5. L'état de surface

L'état de surface constitue une des limites d'un revêtement en BCR. En effet, elle n'est pas trop adaptée aux vitesses de circulation élevées. Toutefois, lors de la mise en place, beaucoup de précautions peuvent être prises tel que la cure.

I.10. Comparaison entre chaussée en BCR et 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 principalement dans leurs rigidités et leurs souplesses.

- La rigidité structurelle du premier est plus forte que celle de la seconde.
- Grâce à ces bonnes rigidités et raideur, le BCR tend à bien répartir la charge sur une grande surface de la couche de forme. (Figure I.9). Par contre, le revêtement en BB se compose de matériaux plus souples et moins raides, permettant une répartition moins efficace de la charge.
- Selon Saucier et al [19] et d'après une étude faite en 1998 par ERES Consultants [27], 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.

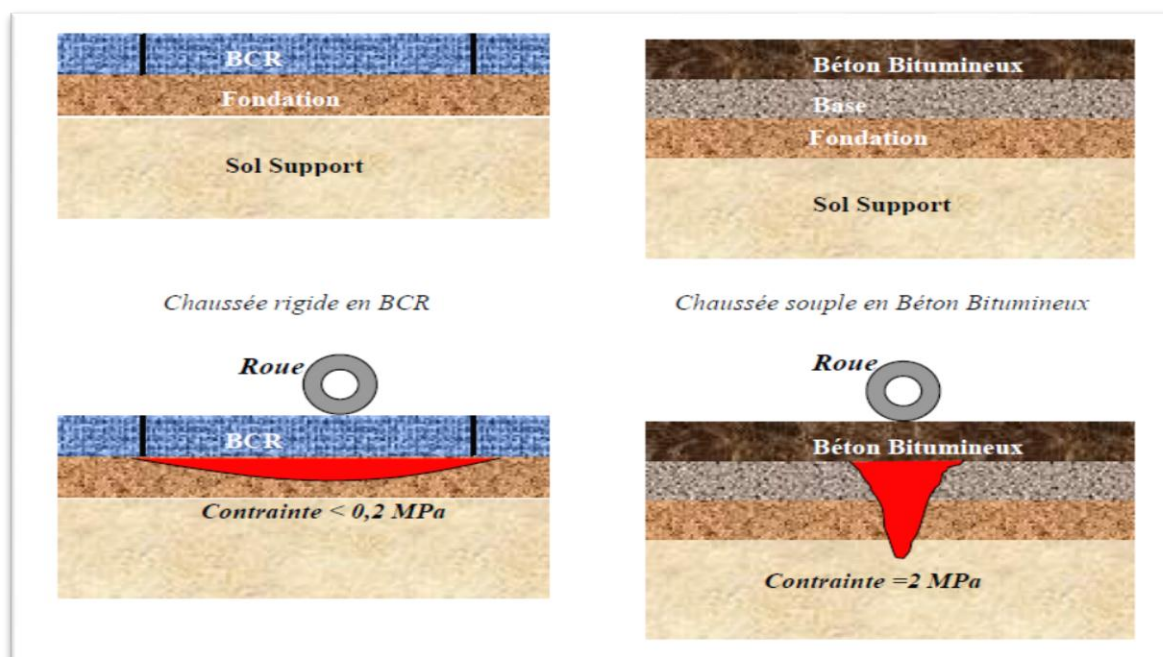


Figure I.8. Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB [27].



Figure I.9. Orniérage des revêtements en béton bitumineux et état d'une chaussée en BCR après 11 ans de service.

Plus les références citées en dessus, on doit toucher le côté financier. Pour cela on a comme exemple une étude comparative entre le coût d'une chaussée en béton bitumineux et une chaussée en BCR faite par le laboratoire de Lafarge à Rouïba (cité dans l'Annexe).

Chapitre II :
Les ajouts.

II.1. Généralités sur les adjuvants

La commercialisation des ajouts dans les matériaux cimentaires a commencé plus tard vers 1910 , 1920; il s'agissait surtout des accélérateurs. Les plastifiants furent commercialisés vers 1935, les entraîneurs d'air après la guerre en Europe. Récemment, sont apparus les antigels et les produits de cure. Depuis 1960, les adjuvants se sont diversifiés et multipliés; leur qualité et leur constance ne cessent de s'améliorer.

II.2. Les adjuvants

II.2.1. Définition

Un adjuvant est défini comme étant un produit chimique qui est additionné au béton selon une proportion n'excédant pas 5% de la masse totale du ciment et ceci dans le but d'améliorer ou de modifier certaines de ses propriétés. Il est incorporé au cours du malaxage ou au cours d'un malaxage complémentaire avant la mise en œuvre du béton. Les adjuvants sont distingués par leur caractère chimique. Ils sont organiques ou inorganiques selon leur composition chimique.

La majorité des adjuvants utilisés dans un béton plastique peut être utilisée dans un BCR. Cependant, le dosage des adjuvants est différent du dosage normalement requis. La faible quantité d'eau dans un mélange de BCR et donc l'aspect sec de ce dernier et la courte durée de malaxage atténuent l'effet des adjuvants. Leurs dosages sont alors augmentés afin d'accroître leur efficacité.

II.2.2. Classification

Le critère essentiel permettant de classer les adjuvants est le résultat de leur action; ainsi on distingue :

1. Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air.
2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement.
3. Adjuvants modifiant la résistance aux actions physiques et chimiques.
4. Adjuvants pour coulis d'injection.

II.2.2.1. Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air

II.2.2.1.1. Super plastifiants

Les super plastifiants, tels que définis par Baron et Olivier [9], sont des produits défloculants 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 superplastifiants les plus utilisés sont chimiquement composés de sels de sodium ou de calcium de polynaphtalène sulfoné, de sel de sodium de polymélamine sulfoné, de copolymère acrylate-ester ou de lignosulfonate de grande pureté.

❖ Effet de superplastifiant sur les bétons frais et durci

- **Effet sur le béton frais** : l'ouvrabilité est améliorée pour une même teneur en eau. Cette propriété est mise à profit dans le cas de bétonnage de pièces minces ou fortement ferrillées et dans le cas d'utilisation de granulats concassés. Mais, en principe l'utilisation d'un produit à action fluidifiante doit être associée à une diminution effective de la teneur en eau (l'excès d'eau est le plus grand ennemi du béton).
- **Effet sur le béton durci** : pour les bétons courants et en première approximation, une diminution de 1% du dosage en eau augmente les résistances mécaniques de 1%. La diminution de la teneur en eau a pour conséquence la diminution de l'absorption capillaire donc une augmentation de la pérennité du béton.

II.2.2.1.2. Entraîneur 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 Béton Classique. 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 [4]. Par analogie avec l'idée de Baron et Olivier [8], 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 5 à 6% d'air [4].

❖ Effet d'entraîneur d'air sur les bétons frais et durci

- **Effet sur béton frais** : les bulles d'air jouent le rôle d'un fluide; en remplaçant une partie de l'eau de gâchage, et d'un inerte, les bulles remplaçant par leur granulométrie une partie du sable fin (1, 2 mm).
- **Effet sur béton durci** : les bulles changent la structure du matériau. Ils améliorent l'imperméabilité des bétons en limitant les remontées par capillarité. Lors du gel, elles jouent le rôle de vase d'expansion pour l'eau poussé par la glace ou par la glace elle-même.

II.2.2.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout la vitesse de dissolution de ces constituants. Quelques remarques préalables peuvent être faites :

- Un produit peut agir comme retardateur ou accélérateur, il faut en général des doses assez élevées d'adjuvant pour accélérer la prise et le durcissement, des doses extrêmement faibles pour les retarder
- Les résistances finales sont souvent augmentées avec les retardateurs et diminuées avec les accélérateurs, et dans ce cas d'autant plus que le produit est plus accélérateur.

II.2.2.2.1. Les retardateurs de prise

En général, les retardateurs ralentissent l'action de prise de la pâte. Ils n'altèrent ni la nature ni la composition des éléments et des produits d'hydratations. Ces agents permettent d'allonger le délai de prise afin de procéder à la mise en œuvre du BCR. Ainsi, les délais normalement spécifiés pour la fabrication, la mise en œuvre et la réalisation des joints horizontaux et verticaux peuvent être prolongés aussi [3].

II.2.2.2.2. Les accélérateurs de durcissement

Les agents accélérateurs de durcissement sont à base des sels minéraux. Le plus employé est le chlorure de calcium (CaCl_2). Ce produit favorise la formation et la croissance du silicate de calcium hydraté C-S-H. D'autres produits comme les sels de magnésium agissent comme des accélérateurs dont leurs effets sont identiques à ceux du chlorure de calcium. Ce dernier demeure l'accélérateur de durcissement le plus employé car il est le plus puissant et le plus économique. Par contre, pour des zones connues par des températures élevées, ces accélérateurs sont caractérisés par un dégagement de chaleur d'hydratation très important qui peut faire fissurer le BCR [3], [9].

II.2.2.3. Adjuvants modifiant la résistance aux actions physiques et chimiques

II.2.2.3.1. Produits de cure

On sait que le béton frais doit être protégé un certain temps après le gâchage afin d'éviter un départ trop important de l'eau qu'il contient. La dessiccation des mortiers et des bétons a pour conséquence un abaissement des résistances mécaniques, un poudroïement en surface ainsi que la formation de fissures profondes de retrait avant prise. Il est nécessaire de maintenir humide le béton. Un procédé moderne, simple et pratique consiste à pulvériser sur le béton frais, un produit de cure formant une mince couche.

II.2.2.4. Adjuvants pour coulis d'injection

Dans le cas des bétons armés utilisant le système de câbles situés dans les gaines souples et étanches, celles-ci sont injectées d'un coulis de ciments. L'injection est effectuée après la tension des câbles dès que le ciment peut supporter sans risques les contraintes appliquées. L'injection est une bonne opération nécessaire mais délicate qui a pour but d'enrober les câbles, de les lier au béton et de les protéger contre la corrosion.

Le coulis doit entièrement remplir les vides et doit être fluide et stable et ayant un temps de prise correcte (> 190 min). Par exemple l'expansif (afin de remplir complètement la gaine).

II.2.3. Application et utilisation des adjuvants

Tableau II.1 : Quelques exemples d'utilisation de quelques adjuvants utilisés dans le BCR.

Adjuvants.	Utilisation.
Les accélérateurs de durcissement	<ul style="list-style-type: none"> • décoffrage rapide, • préfabrication (démoulage rapide), • travaux sous l'eau.
Produits de cure	<ul style="list-style-type: none"> • Les revêtements de la route, d'autoroutes, de pistes d'envol, de ponts, ... • Protection de dalles, planchers, terrasses, ... béton contre pluie. • Revêtements des berges de canaux. • Les tunnels et voûtes.
Super plastifiants	<ul style="list-style-type: none"> • des bétons à haute performance. • les centrales de béton prêt à l'emploi. • Les grands travaux de B.T.P. (autoroutes, travaux maritimes, barrages). • Certains travaux spéciaux : injection, béton projeté, etc.
Entraîneurs d'air	<ul style="list-style-type: none"> • la confection de béton classique armé ou non et pour certains bétons spéciaux (lourds et bétons légers afin de limiter la ségrégation). • les centrales à béton, pour les bétons transportés sur de longues distances et pour certains mortiers et bétons projetés. • Ils sont pratiquement obligatoires, dans les

	pays froids, pour les routes, autoroutes et pistes d'aérodromes ainsi que pour les barrages.
Les retardateurs de prise	<ul style="list-style-type: none"> • pour le transport sur une longue distance. • préparé en centrale. • béton pompé, mortier d'enduit projeté, travaux d'injection.

II.2.4. Contrôle et stockage des adjuvants

La réception d'un produit à utiliser comme adjuvant doit comporter un contrôle au laboratoire relatif à sa nature chimique, à son comportement vis-à-vis du liant, des granulats, etc. ; mais ce contrôle ne donnera aucun renseignement sur la durabilité du produit.

Le technicien devra exiger que les adjuvants soient accompagnés d'un certificat d'origine indiquant la date de fabrication et la date limite d'emploi au cas où le produit n'a pas une stabilité durable. Pour ces raisons multiples, une étiquette parfaitement lisible est exigée quel que soit le mode d'emballage. La plupart des adjuvants se présentent en fûts hermétiques stockable sur le chantier à pied d'œuvre.

La présentation en sachet dose ou en sac de poudre plus ou moins hygroscopiques peut nécessiter l'entrepôt à l'abri des intempéries. Il faut dans tous les cas suivre les instructions des fabricants qui en général, sont en mesure d'assister le technicien-utilisateur dans la mise en œuvre du produit.

II.3. Les fibres

Un béton fibré est défini comme un matériau composite associant une matrice (le béton) et un renfort (les fibres) ; A la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Le choix du type de fibres est donc fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

Les fibres les plus couramment utilisées sont :

- Les fibres métalliques ; les fibres polypropylènes ; les fibres de verre.

II.3.1. Spécificités des fibres

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

- être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;
- se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage.

II.3.2. Les différents types de fibres

La gamme des fibres disponibles s'élargit régulièrement : fibres métalliques, fibres de verre, fibres polymères, fibres longues, courtes, flexibles, ondulées, inoxydables... et offre un vaste choix de caractéristiques, de performances et donc de domaines d'emploi.

Elle se décline en 3 grandes familles de fibres selon la nature des matériaux qui les composent :

Les fibres métalliques : acier, inox, alliage amorphe.

Les fibres organiques : polypropylène, polyéthylène, polyamide (nylon), acrylique.

Les fibres minérales : verre, carbone.

Dans notre cas, on va parler que des fibres métalliques car elles sont utilisées dans notre partie expérimentale.

II.3.2.1. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques, obtenues à partir de fil d'acier, sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique d'un béton de structure (résistance au cisaillement, en traction, en flexion, au choc). Leur comportement s'apparente à celui des armatures dans le béton traditionnel.

Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture et à la fatigue car elles permettent de répartir de manière homogène la fissuration du béton avec des ouvertures de fissures très fines (les fissures des ouvrages réalisés en béton de fibres métalliques sont plus fines que celles des ouvrages réalisés en béton armé traditionnel) et donc une meilleure redistribution et dispersion des efforts.

La maîtrise de la fissuration du béton permet de limiter la pénétration des agents agressifs. Il en résulte une plus grande durabilité des structures.

La longueur de la fibre doit être au moins égale à 2,5 fois le diamètre du plus gros granulat de la matrice.

Du fait de leurs propriétés, les fibres métalliques trouvent un vaste domaine d'application, si l'on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance en traction et aux chocs du béton et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour optimiser le dimensionnement des structures.

Les bétons de fibres métalliques sont utilisés dans les dallages et les sols industriels, pour la fabrication de voussoirs de tunnels, la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement), pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.

II.3.3. Les propriétés selon l'âge du béton

- Au jeune âge, le béton présente des caractéristiques mécaniques très faibles. En cas de fissuration, les efforts à reprendre par les fibres au droit des ouvertures sont faibles.
- Après quelques jours, les propriétés physiques étant plus importantes, les efforts et les ouvertures à compenser sont d'autant plus importants.

II.3.4. Le rôle des fibres

Les fibres ont pour rôle principal de s'opposer à la propagation des microfissures, selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit aussi par des améliorations relatives à :

- La cohésion du béton frais ;
- La déformabilité avant rupture ;
- La limitation de la fissuration due au retrait ;
- La répartition homogène de la fissuration ;
- La résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, à l'abrasion, au cisaillement, à la traction par flexion.

Partie pratique

Chapitre III :
Matériaux et méthodes
expérimentales

III.1. Introduction

La partie expérimentale de ce manuscrit est composée de deux parties bien distinctes : chapitre III qui est consacré aux matériaux et méthodes expérimentales utilisées et le chapitre IV qui présente les résultats obtenus et les interprétations.

III.2. Matériaux utilisés

Nous avons utilisé dans ce travail des granulats (sable 0/4, gravier 3/8 et 8/15) provenant de la carrière "Kef Azrou" appartenant à l'entreprise LAFARGE située à El-Mhir dans la wilaya de BORDJ BOU ARRERIDJ. Un ciment de classe 32.5 N(Chamil) de la cimenterie de M'SILA a été également employé.

Les tests de caractérisation ont été effectués au niveau du Laboratoire de développement de la construction (CDL) LAFARGE sis à Rouiba, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes européennes et algériennes.

Les essais réalisés sur les matériaux sont : L'analyse granulométrique, équivalent de sable, Bleu de méthylène, coefficient d'absorption d'eau, masses volumique (apparente et absolue), et les essais sur le ciment.

III.3. Caractérisation des matériaux utilisés

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés.

III.3.1. Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est la fraction 0/4 mm.

III.3.1.1. Analyse granulométrique (NA 2607)

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

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

Au cours de cet essai, on a utilisé le matériel des figures III.1 et III.2.



Figure III.1. une balance hydrostatique et une série des tamis.

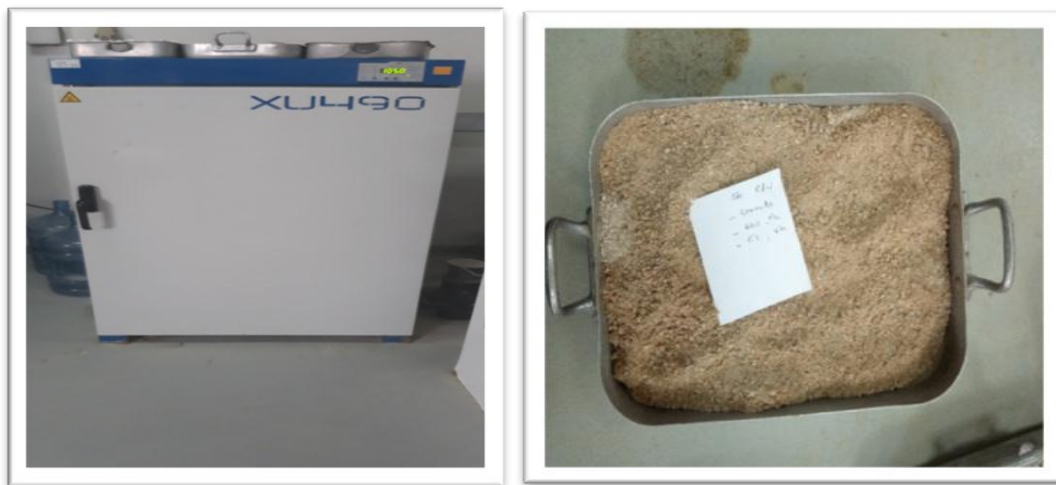


Figure III.2. Etuve à 105° C et bac rempli de sable 0/4.

III.3.1.2. Module de finesse selon la norme (NA2607)

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

III.3.1.3. Equivalent de sable selon la norme (NA 455)

Il permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique, plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm, Pour calculer l'équivalent de sable, il existe deux types d'essais : visuel ou au par piston selon la norme NA 455 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire de cet essai [23].

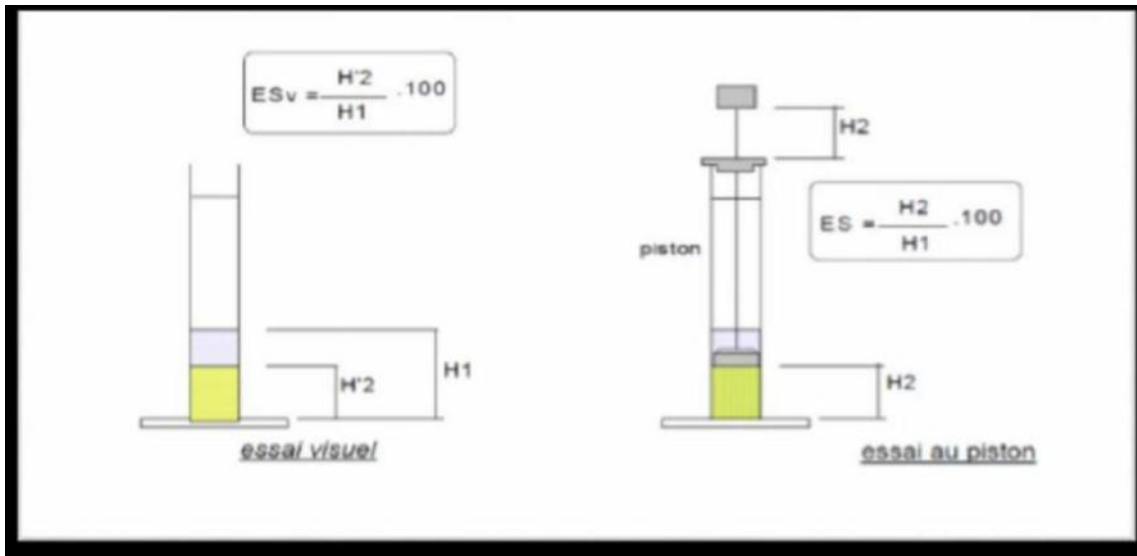


Figure III.3: Essai d'équivalent de sable.

Cet essai nécessite le matériel des figures III.4 et III.5 :



Figure III.4. Echantillonneur du sable et une machine d'agitation.



Figure III.5. Balance de pesé et deux cylindre gradué.

III.3.1.4. Essai au bleu de méthylène (NA 1984)

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

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

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

Dans cet essai on a utilisés le matériel de la figure III.6 suivant :

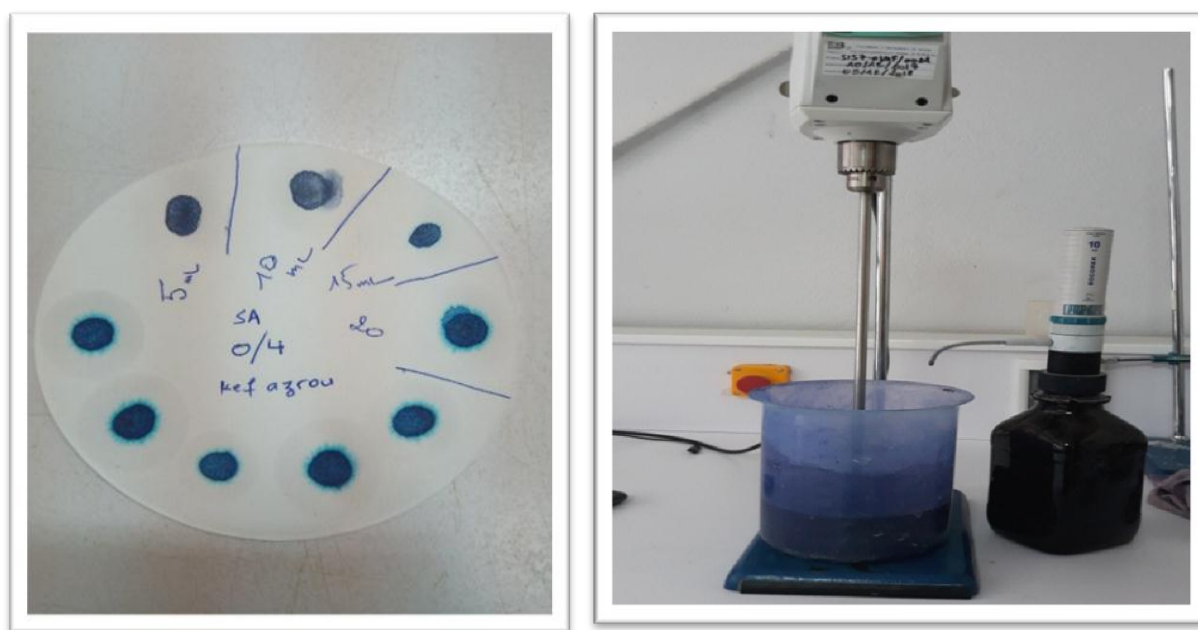


Figure III.6. Papier-filtre et un agitateur à ailettes.

III.3.1.5. Masse volumique réelle, masse volumique apparente et coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6)

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

L'essai nécessite le matériel de la figure III.7.



Figure III.7. Pycnomètre remplie de sable (0/4) et une étuve ventilée.

III.3.2. Les graviers

Les granulats sont caractérisés par des spécificités qu'ils doivent satisfaire pour réaliser une bonne utilisation dans différents domaines. Ces spécifications dites caractéristiques des granulats sont bornées par des normes et des exigences. Elles servent à prendre en compte l'utilisation, la fiabilité, l'économie en se basant sur les recherches et les expériences scientifiques. Les granulats utilisés dans ce travail sont les fractions (3/8) et (8/15).

III.3.2.1. Analyse granulométrique (NA2607)

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

$$M > 0,2D_{\max}$$

D_{\max} : Diamètre maximal du gros granulat en (mm) ; M : la masse de l'échantillon en (kg).

Notant bien que :

- Le matériel utilisé dans cet essai est le même que celui utilisé dans l'analyse granulométrique du sable. Sauf que les diamètres des tamis changent selon le diamètre maximal du gravier.

III.3.2.2. Coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3)

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

Cet essai nécessite le matériel de la figure III.8 et III.9.



Figure III.8. Séries des grilles à fentes.



Figure III.9. Balance, bac et une grille à fente.

III.3.2.3. Masse volumique réelle, masse volumique apparente et Coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6)

C'est la même norme utilisé pour les sables. Et le matériel nécessaire pour cet essai est :



Figure III.10. Panier en treillis remplie de gravier (3/8) et une balance hydrostatique.



Figure III.11. Chiffons absorbant, doux et secs

III.3.3. Caractérisation du ciment Chamil CPJ – CEM II/B 32,5 N

Le ciment utilisé dans cette recherche est le ciment Portland au calcaire (Chamil) classe 32.5N qui présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforme à la norme Algérienne NA 442-2013, et Européenne EN 197-1 ; il provient de la cimenterie Lafarge de m'Sila.

III.3.3.1. Caractéristiques physiques

III.3.3.1.1. La consistance normale (EN 196-3)

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT ».

Dans cet essai, on a utilisés le matériel des figures III.12 et III.13.



Figure III.12. Malaxeur normalisé et appareil de vicat muni de sa sonde de consistance.

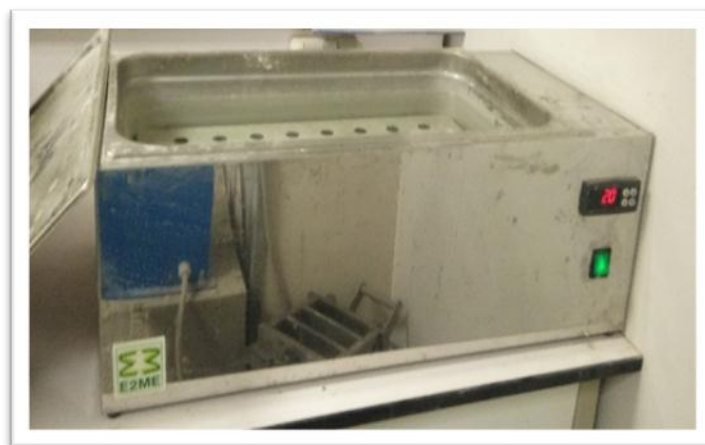


Figure III.13. Bassin de conservation à 20°C.

III.3.3.1.2. Le temps de prise (EN 196-3)

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

4mm (± 1 mm) on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE» est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm

Pour le matériel, c'est le même utilisé pour calculer la consistance normale.

III.3.3.1.3. La finesse de mouture (Blaine) (EN 196-6)

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

Dans cet essai on a utilisés le matériel de la figure III.14.



Figure III.14. Appareil de Blain et une balance sensible.

III.3.3.1.4. Essai de mortier normalisé (EN 196-1)

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

- **Sable normalisé = 1350 g (± 5 g).**
- **Ciment = 450 g.**
- **Eau de gâchage = 225 ml.**

Dans cet essai, on a utilisé le matériel de la figure III.15 et III.16.



Figure III.15. Moules prismatiques de $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$ et une Table à choc.



Figure III.16. Appareil de compression et de flexion.

III.4. Formulation et confection du BCR

III.4.1. Formulation du BCR

La méthode suivie pour la formulation des mélanges de BCR est la méthode de Bolomey en suivant la Norme NF P 98-128 dont les étapes sont les suivants :

- Détermination de C/E qui est calculé par la formule de BOLOMY :

$$\bar{\sigma}_{28} = G * \sigma_c * (C/E - 0,5) \quad \longrightarrow \quad C/E = \frac{628 + 0,5 * G * \sigma_c}{G * \sigma_c}$$

Dont : $\bar{\sigma}_{28} = 22,5 \text{ MPa}$ (La résistance moyenne à la compression à 28 jours).

$\sigma_c = 32,5 \text{ MPa}$ (La classe du ciment qu'on a utilisé).

$C = 260 \text{ kg/m}^3$ (Le dosage du ciment qu'on a chois).

$G = 0,45$ (car la qualité des granulats qu'on a utilisé est courante et le D_{max} et

≤ 20 mm).

➤ Détermination de C :

La quantité de ciment a été déterminé après avoir remplacé la valeur de C/E dans l'abaque et pour le C_{\min} dans notre cas est calculé selon la formule suivante :

$$C_{\min} = \max \left(\frac{250 + 10 * 628}{\sqrt[5]{1,25 D_{\max}}} ; \frac{550}{\sqrt[5]{1,25 D_{\max}}} \right) \text{ kg/m}^3 ; C_{\min} = 260 \text{ kg/m}^3.$$

➤ La quantité d'eau est déterminée en remplaçant C dans la valeur E/C :

On a $E/C = 0,49$ et $C = 260$. $\Rightarrow E = 127 \text{ l/m}^3$.

➤ La détermination des pourcentages de granulats : le principe consiste à dessiner une courbe de mélange granulaire d'une façon qu'elle soit le plus proche que possible de la courbe de référence en variant le rapport G/S jusqu'à une max valeur de 1,2.

III.4.2. Confection et conservation des éprouvettes

Durant notre campagne expérimentale, on a confectionné soixante-quinze éprouvettes dont Cinquante (50) éprouvettes ont été confectionnées pour déterminer la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage et le module d'élasticité. Et vingt-cinq (25) éprouvettes pour la détermination du délai de maniabilité.

III.4.2.1. Méthode de confection des éprouvettes

Proctor modifié (NF P 49 093)

Concernant le compactage du BCR au laboratoire, on a utilisé la méthode de confection par compactage au Proctor modifié.

Le procédé de Proctor modifié correspond à une énergie de compactage assimilable à l'énergie donnée par un rouleau compacteur, dont les dimensions des éprouvettes (DxH) sont les suivantes :

- Eprouvette pour résistance à la compression et délai de maniabilité : 15x30 cm.

Le moule est confectionné en 15 couches, 56 coups par couche.

- Eprouvette pour résistance à la traction indirecte : 15x12 cm.

Le moule est confectionné en 5 couches, 56 coups par couche.

- Eprouvette pour le module d'élasticité : 10x10 cm.

Le moule est confectionné en 5 couches, 25 coups par couche.



Figure III.17. Machine de Proctor modifié.

III.4.2.2. Surfaçage des éprouvettes à l'aide du ciment rouge

Comme le surfaçage avec la machine n'est pas convenable pour le BCR, on a procédé à un autre mode de surfaçage à l'aide de ciment rouge (pour les moules de 15*30 cm).

III.4.2.3. Démoulage et conservation des éprouvettes

Les moules confectionnés sont démoulés après 24 heures à l'aide d'un dispositif spécial et conservés dans une chambre humide à 98% d'humidité figure III.18.



Figure III.18. La chambre humide.

III.4.3. Procédures d'essais réalisés

III.4.3.1. Essais sur le béton frais

III.4-1-1. La masse volumique (NF EN 12350-6)

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

Elle est calculé par la relation suivante : $(M_2 - M_1) / V$

Où :

M_2 est le volume du moule remplis ; M_1 le volume de l'éprouvette vide et V est le volume de l'éprouvette.



Figure III.19. Mesure de la masse volumique du BCR à l'état frais.

III.4.1.2. Calcul de l'affaissement - l'essai Vébé - (NF EN 12350-3)

La norme NF EN 12350-3 définit une méthode de détermination de la consistance du béton frais au moyen du temps à l'essai Vébé. L'appareil utilisé pour l'essai Vébé est montré dans la Figure III.20.



Figure.III.20. Appareil d'essai Vébé.

III.4.2. Essais sur le béton durci

Notre étude comporte la réalisation des essais expérimentaux sur des éprouvettes cylindriques pour la mesure de la résistance à la compression, résistance à la traction indirecte et le module d'élasticité à 07 et 28 jours.

III.4.2.1. La masse volumique sur béton durci (NF EN 12390-7)

La masse volumique ou la densité est calculée en divisant la masse de l'éprouvette durcie sur son volume.

C'est-à-dire : $\rho = M/V$. Elle est exprimée en kg/m^3 .



Figure III.21. Mesure de la masse volumique du BCR à l'état durci.

III.4.2.2. Détermination de la résistance à la compression (NFP18-411)

La résistance à la compression du BCR est généralement considérée parmi les plus importantes propriétés. Elle nous donne une image globale sur la qualité de ce béton puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, cette résistance représente un élément principal pour la conception et le dimensionnement des structures de pavages en BCR. Cet essai est réalisé à l'âge de 7 et 28 jours avec le matériel montré dans la Figure III.22.

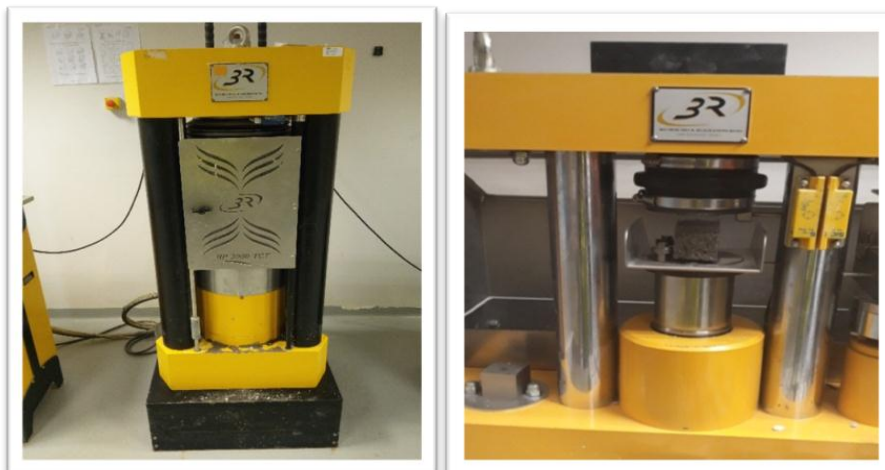


Figure III.22. Presse hydraulique pour béton et mortier.

III.4.2.3. La résistance à la traction par fendage (NF.P 18 408)

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien".

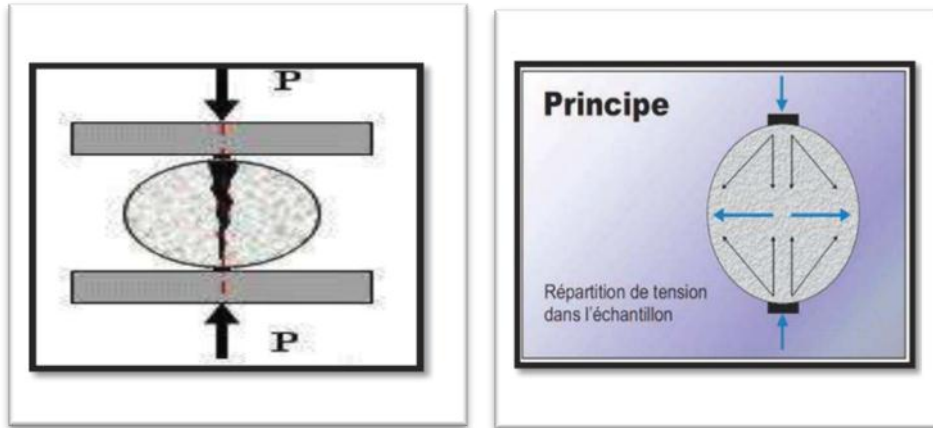


Figure III.23. Essai de traction par fendage.

La presse utilisée pour cet essai est illustrée dans la Figure III.24.



Figure III.24. Eprouvette soumise à l'essai de fendage.

III.4.2.4. Le module d'élasticité (module de Young)

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

Il est influencé par la propriété de la pâte de ciment hydratée ainsi que celle des granulats. Il est de l'ordre de 30 GPa pour un mélange de BCR et se calcule après 28 jours de mûrissement.

Dans cet essai, on a utilisé la machine de la Figure III.25.



Figure III.25. Dispositif de calcul du module d'élasticité.

III.5. Le délai de maniabilité

La maniabilité est une propriété importante du BCR, car elle détermine la facilité de mise en place. Contrairement à un béton traditionnel où la maniabilité est mesurée lors de l'essai du cône d'Abraham. La maniabilité d'un mélange du BCR est déterminée en confectionnant 5 moules de dimension 15*12 cm après (15 min, 1h, 3h, 5h, 7h) du début de contact ciment + eau. Puis calculer leur densité et les sécher dans l'étuve pendant 24h ensuite les peser une deuxième fois. Et la valeur qui correspond à la perte de 98% de la quantité d'eau représente le délai de maniabilité.

Chapitre IV :
Résultats et discussion

IV.1. Caractérisation des matériaux

IV.1.1. Caractérisation du sable

IV.1.1.1. Analyse granulométrique (NA 2607) lavage et tamisage

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable (0/4 mm) sont regroupés dans le Tableau IV.1 et la Figure IV.1.

Tableau IV.1. Analyse granulométrique du sable (0/4) utilisé.

Procédé utilisé : Lavage et tamisage									Sable (0/4)				
Masse sèche totale $M_1 = 1215$ g													
Masse sèche après lavage $M_2 = 1053$ g													
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 = 162$ g													
Tamis (mm)	8	6,3	5	4	3,15	2	1,6	1	0,5	0,315	0,25	0,125	0,063
Poids Retenu (g)		6	7	35	168	405	505	645	780	848	880	970	1049
% Retenu	0,00	0,49	0,58	2,88	13,83	33,33	41,56	53,09	64,20	69,79	72,43	79,84	86,34
% Passant	100	99,506	99,42	97,12	86,17	66,67	58,44	46,91	35,80	30,21	27,57	20,16	13,66

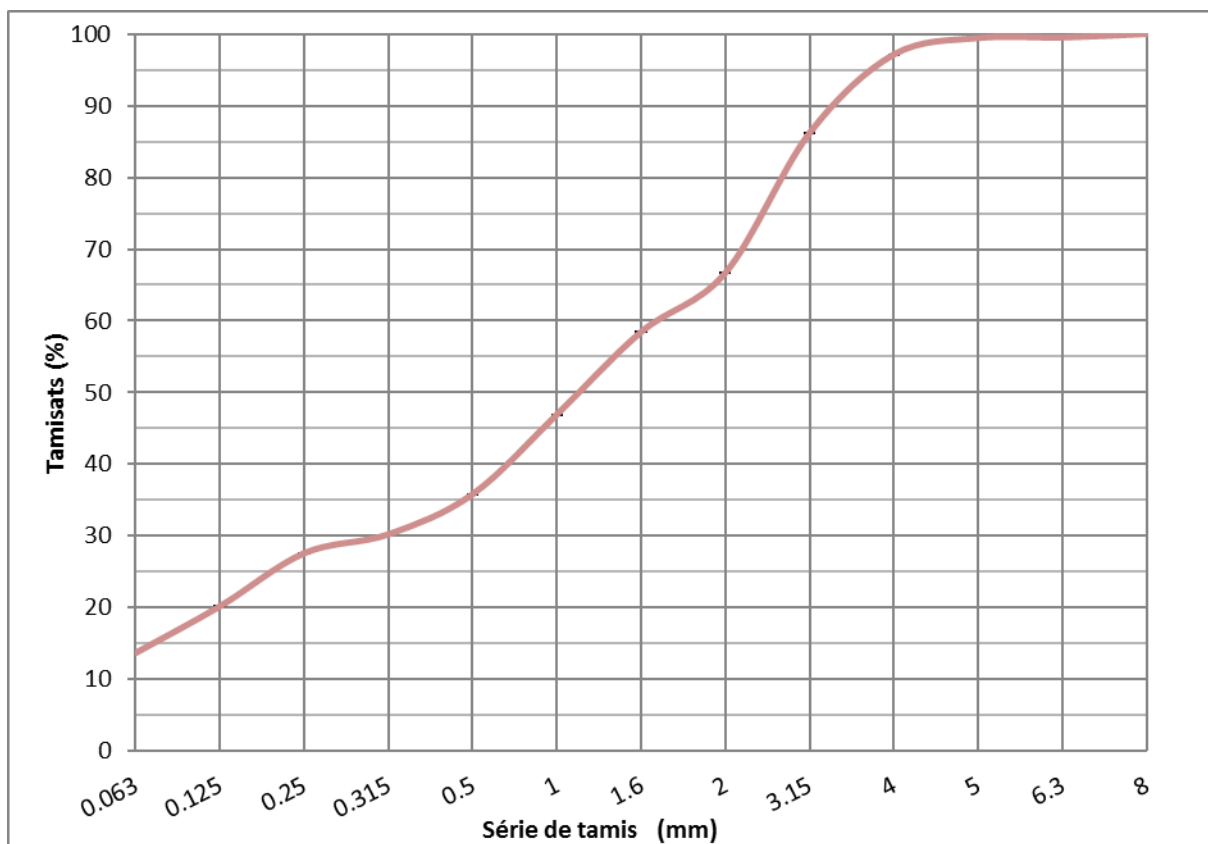


Figure IV.1 : Courbe granulométrique du sable (0/4) utilisé

IV.1.1.2. Module de finesse selon la norme (NA2607)

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité et la finesse du sable. La norme NA2607 donne la classification suivante :

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

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

$$MF = \frac{\sum(2.88 + 33.33 + 53.09 + 64.20 + 72.43 + 79.84)}{100} = 3.06$$

- Le sable utilisé possède un module de finesse MF= 3.06, MF > 2.5, ce qui signifie que le sable utilisé dans notre étude est un sable grossier.

IV.1.1.3. Equivalent de sable selon la norme (NA 455)

Les résultats des trois essais effectués sont donnés dans le tableau IV.3

Tableau IV.3. Résultats des essais d'équivalent de sable

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Hauteur de l'échantillon h_1 (mm)	138	148	145
Hauteur de sédiment h_2 (mm)	72	79	75
Equivalent de sable (ES) % = $100 \times (h_2/h_1)$	52.17	53.38	51.72
ES Moyen	52,78		

Les essais réalisés ont montré que le sable 0/4 présente de faibles pourcentages de fines argileuses ce qui le place dans la catégorie convenable pour le BCR.

IV.1.1.4. Essai de bleu de méthylène (NA 1984)

Les résultats obtenus pour cet essai sont regroupés dans le tableau IV.4

Tableau IV.4. Les résultats de l'essai au Bleu de Méthylène du sable 0/4.

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction inférieur à 2 mm (g).	$M_{1=300}$
Quantité totale de la solution de colorant ajoutée (ml).	$V_{1=20}$
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par Kg de grains de fraction 0/2 mm.	$MB = (V_1 / M_1) \times 10 = 0,67$

- L'Essai de bleu de méthylène a montré que le sable 0/4 utilisé contient peu de fine et peut être utilisé dans la formulation de notre BCR car on a obtenu un $MB < 2$.

IV.1.1.5. Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et Coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6) :

Les résultats de ces propriétés physiques sont regroupés dans le Tableau IV.5

Tableau IV.5. Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et coefficient d'absorption d'eau du sable 0/4.

Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air: M_1 (g)	869
Masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés: M_2 (g)	2128,7
Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement: M_3 (g)	1574,3
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air : M_4 (g)	863,7
$\rho_a = M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$	2,79
$\rho_{rd} = M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$	2,75
$\rho_{ssd} = M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))$	2,76
$WA_{24} = ((M_1 - M_4) / M_4) * 100$	0,61

Dont :

ρ_a : la masse volumique absolue.

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

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

WA 24 : Coefficient d'absorption d'eau (%).

IV.1.2. Caractérisation des graviers

IV.1.2.1. Analyse granulométrique lavage et tamisage (NA2607)

Les résultats de l'analyse granulométrique des fractions 3/8 et 8/15 sont regroupés dans les Tableaux IV.6 ; IV.7, Les courbes granulométriques des différentes fractions similaires utilisées sont tracées dans les Figures IV.2 ; IV.3.

Tableau IV.6. Analyse granulométrique du gravier 3/8

Procédé utilisé : lavage et tamisage								Gravier 3/8				
Masse sèche totale M1 = 1663.2 g Masse sèche après lavage M2 = 1625.2 g Masse sèche des fines retiré par lavage M1 – M2 = 38 g												
Tamis (mm)	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2,5	0,063
Poids retenu (g)	0	0	0	0	0	0	19	271	961	1431	1564	1600
% retenu	0	0	0	0	0	0	1,188	16,94	60,06	89,4375	97,75	100
% Passant	100	100	100	100	100	100	98,81	83,06	39,94	10,5625	2,25	0

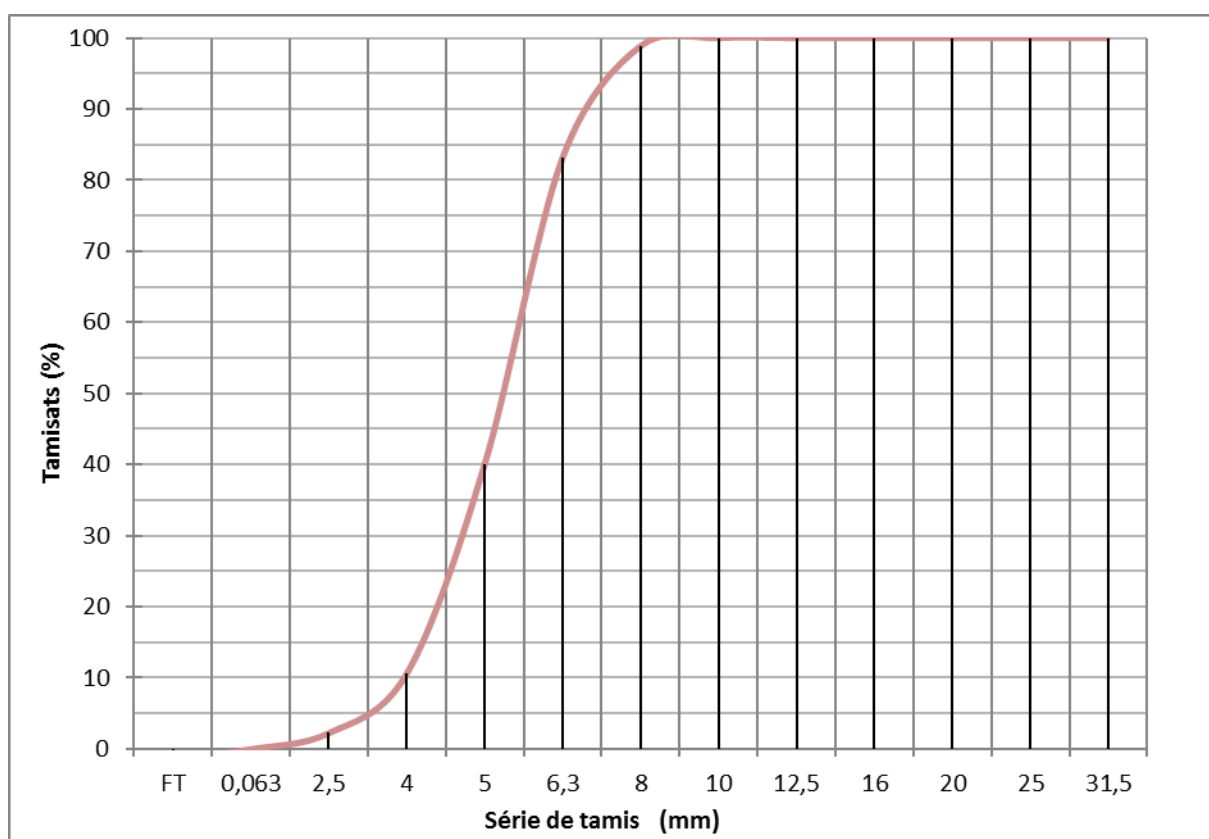


Figure IV.2. Courbe granulométrique du gravier 3/8.

Tableau IV.7. Analyse granulométrique de la fraction du gravier 8/15

Procédé utilisé : Lavage et tamisage								Gravier (8/15)				
Masse sèche totale M1 = 3000 g Masse sèche après lavage M2 = 2950 g Masse sèche des fines retiré par lavage M1 – M2 = 50 g												
Tamis (mm)	31,5	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	2,5	0,063
Poids ret (gr)	0	0	0	119	605	1247	1941	2650	2842	2890	2921	2946
% ret	0	0	0	3,967	20,17	41,57	64,7	88,33	94,73	96,333333	97,367	98,2
% Passant	100	100	100	96,03	79,83	58,43	35,3	11,67	5,267	3,666667	2,6333	1,8

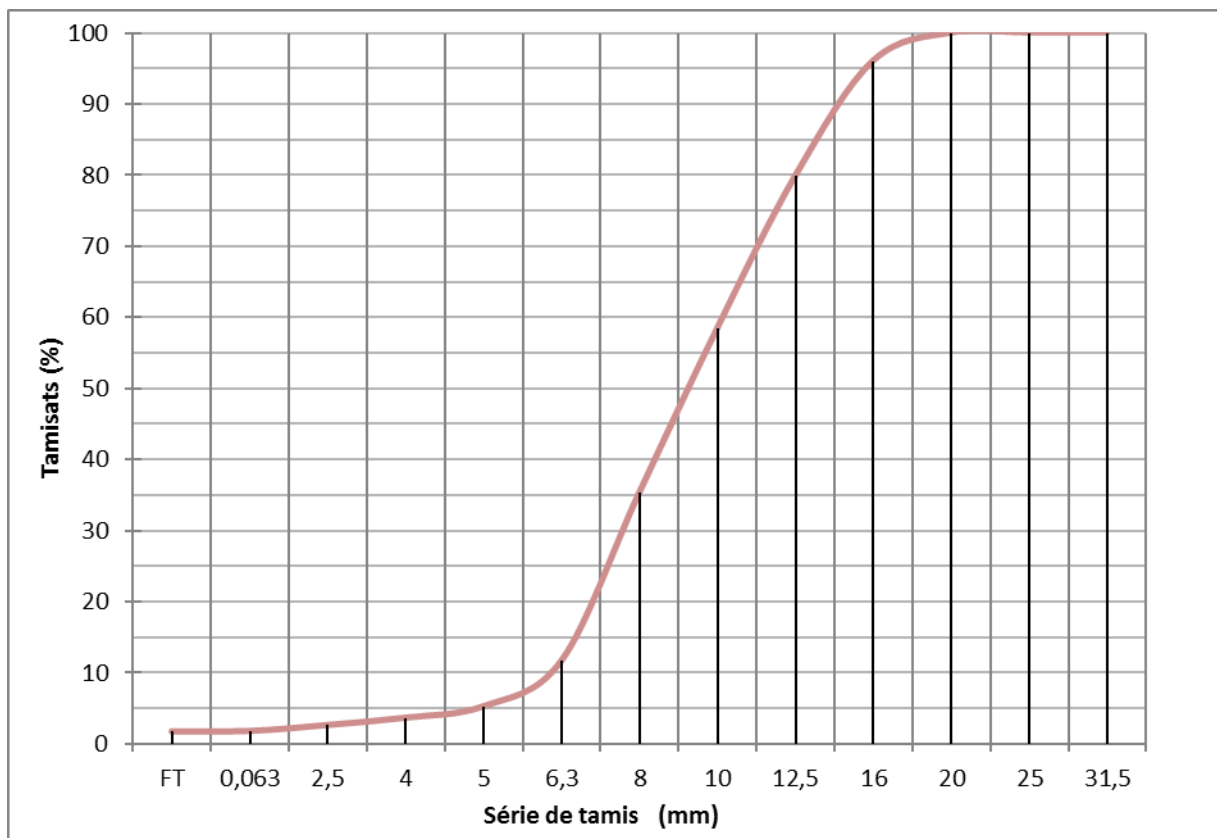


Figure IV.3 : Courbe granulométrique de la fraction du gravier 8/15.

IV.1.2.2. Coefficient d’aplatissement (NF EN 933-3)

Les résultats sont regroupés dans les Tableaux IV.8 ; IV.9.

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

Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille		
Granulat élémentaire	Masse (Ri) du granulat (g) élémentaire di/Di	Ecartement nominal de la grille (mm)	Passant sur une grille Mi (g)	Ai = Mi / Ri * 100
63 / 80		40		
50 / 63		31,5		
40 / 50		25		
31,5 / 40		20		
25 / 31,5		16		
20 / 25		12,5		
16 / 20		10		
12,5 / 16		8		
10 / 12,5		6,3		
81 / 10	19	5	5	26,32
6,3 / 8	252	4	49	19,44
5 / 6,3	690	3,15	111	16,09
41 / 5	470	2,5	52	11,06
M1=∑ Ri =	1431	M2 = ∑ Mi =	217	
$A = M_2 / M_1 \times 100 = 15.16$				

Tableau IV.9 : Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.

Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille		
Granulat élémentaire di/Di	Masse (Ri) du granulat (g) élémentaire di/Di	Ecartement nominal de la grille (mm)	Passant sur une grille Mi (g)	Ai = Mi / Ri * 100
63 / 80		40		
50 / 63		31,5		
40 / 50		25		
31,5 / 40		20		
25 / 31,5		16		
20 / 25		12,5		
16 / 20	119	10	20	16,81
12,5 / 16	486	8	38	7,82
10 / 12,5	642	6,3	65	10,12
81/ 10	694	5	68	9,80
6,3 / 8	709	4	71	10,01
5 / 6,3	191	3,15	19	9,95
41/ 5	49	2,5	3	6,12
M1=∑ Ri =	2890	M2 = ∑ Mi =	284	
$A = M_2 / M_1 \times 100 = 9.83 \%$				

IV.1.2.3. Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et Coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6)

Les résultats de l'essai sont regroupés dans les Tableaux IV.10 ; IV.11.

Tableau IV.10. Masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 3/8.

Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air: M_1 (g)	942,9
Masse dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulats saturés: M_2 (g)	1374,9
Masse dans l'eau du panier vide: M_3 (g)	789,3
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air: M_4 (g)	927,4
La masse volumique de l'eau à la température enregistrée lorsque M_2 a été déterminé, ρ_w	0,9991
$\rho_a = M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3)) * \rho_w$ (g/cm ³)	2,71
$\rho_{rd} = M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3)) * \rho_w$ (g/cm ³)	2,59
$\rho_{ssd} = M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3)) * \rho_w$ (g/cm ³)	2,64
WA 24 = $((M_1 - M_4) / M_4) * 100 \%$ (g/cm ³)	1,67

Tableau IV.11. Masse volumique absolue, masse volumique apparente et coefficient d'absorption du gravier 8/15.

Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air: M_1 (g)	1969
Masse dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulats saturés: M_2 (g)	2028,7
Masse dans l'eau du panier vide: M_3 (g)	791,7
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air: M_4 (g)	1950,3
La masse volumique de l'eau à la température enregistrée lorsque M_2 a été déterminé, ρ_w	0,9991
$\rho_a = M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3)) * \rho_w$ (g/cm ³)	2,73
$\rho_{rd} = M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3)) * \rho_w$ (g/cm ³)	2,66
$\rho_{ssd} = M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3)) * \rho_w$ (g/cm ³)	2,69
WA 24 = $((M_1 - M_4) / M_4) * 100 \%$ (g/cm ³)	0,96

IV.1.3. Caractérisation du ciment

Dans l'annexe

IV.2. Formulation du BCR et procédures d'essais réalisés

La méthode appliquée pour la formulation est la méthode de Bolomey. Les résultats obtenus pour chaque fraction sont mentionnés dans les Tableau IV.12 et IV.13 :

- Granulats : ils représentent le constituant majeur dans la formulation du BCR.

Tableau IV.12 : Pourcentage des granulats utilisé dans la formulation.

Fraction.	0/4	3/8	8/15
Pourcentage (%)	45	5	50

- Les autres constituants :

Le dosage en ciment, d'eau et d'adjuvants dans la formulation du BCR ainsi que les spécifications sont données dans le Tableau IV.13 :

Tableau IV.13. Dosage des autres constituants et les spécifications.

	Masse.	Pourcentage.	Spécification.
Ciment.	260 (kg/m ³)	10 (%)	8 - 12 (%)
Eau.	127 (L)	/	5 - 10 (%)

IV.2.1. Formulation témoin

En premier lieu, on a réalisé une formulation témoin sans aucun ajout afin de pouvoir effectuer une étude comparative avec les autres formulations contenant des ajouts.

Le mélange de la formulation témoin pour 1m³ du BCR est représenté dans le Tableau IV.14.

Tableau IV.14. Le mélange de la formulation témoin.

Constituant.	Sable 0/4	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Ciment	Eau	adjuvant
Masse (Kg)	972	102	1045	260	127	0

Après avoir préparé le mélange du BCR, on commence directement par la confection des moules Proctor et CBR. On essaye de se rapprocher au maximum de la densité théorique qui est égale à 2.51 kg/m³.*

1- Confectionnement des éprouvettes

Les éprouvettes ont été confectionnées dans des moules de 15•30 cm afin de calculer la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours. Les résultats sont donnés dans le Tableau IV.15.

Tableau IV.15 : Les résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR Témoin.

Age (jours).	7	28
R_c (MPa).	19,68	27,47

L'évolution de la résistance à la compression du BCR témoin est représentée dans la Figure IV.4.

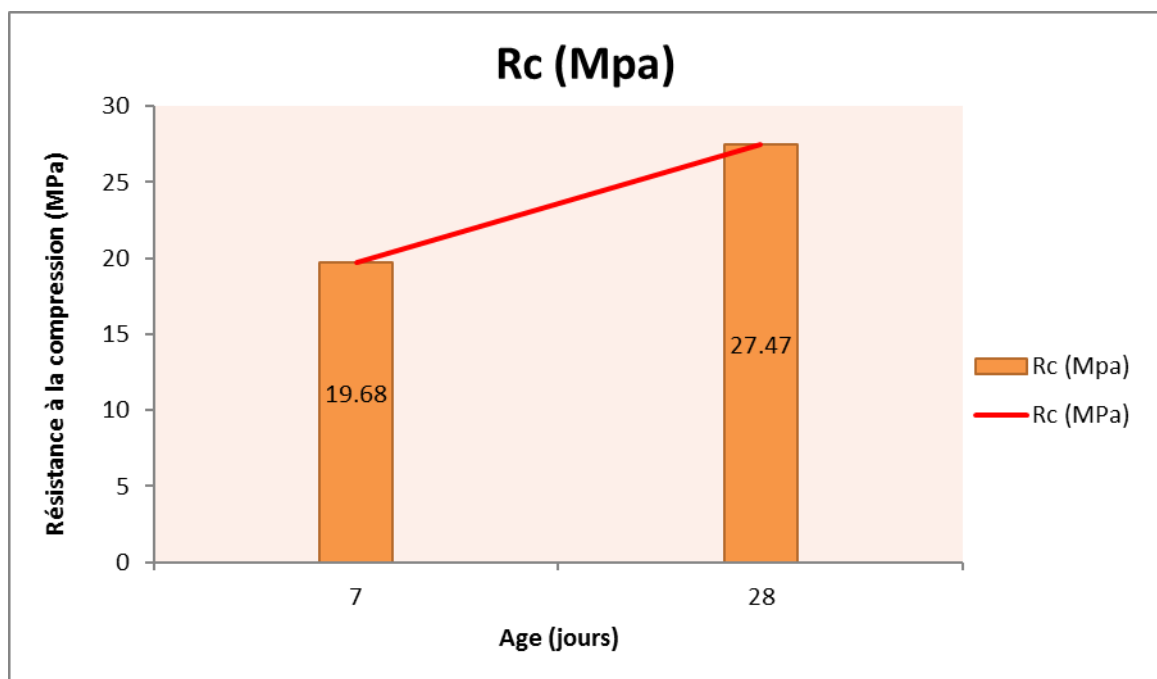


Figure IV.4 : Résultats de la résistance à la compression de la formulation témoin.

Six moules de dimensions 15•12 cm ont été confectionnés pour calculer la résistance à la traction indirecte, trois à 7 jours et les autres à 28 jours. Les résultats sont donnés dans le Tableau IV.16.

Tableau IV.16. Les résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR Témoin.

Age (jours).	7			28		
R_{tb} (MPa).	2,58	2,38	2,48	2,58	3,2	2,52
R_{tb} moyen (MPa)	2.48			2.77		

L'évolution des contraintes limites en traction indirecte R_{tb} en fonction de l'âge est présentée dans la Figure IV.5.

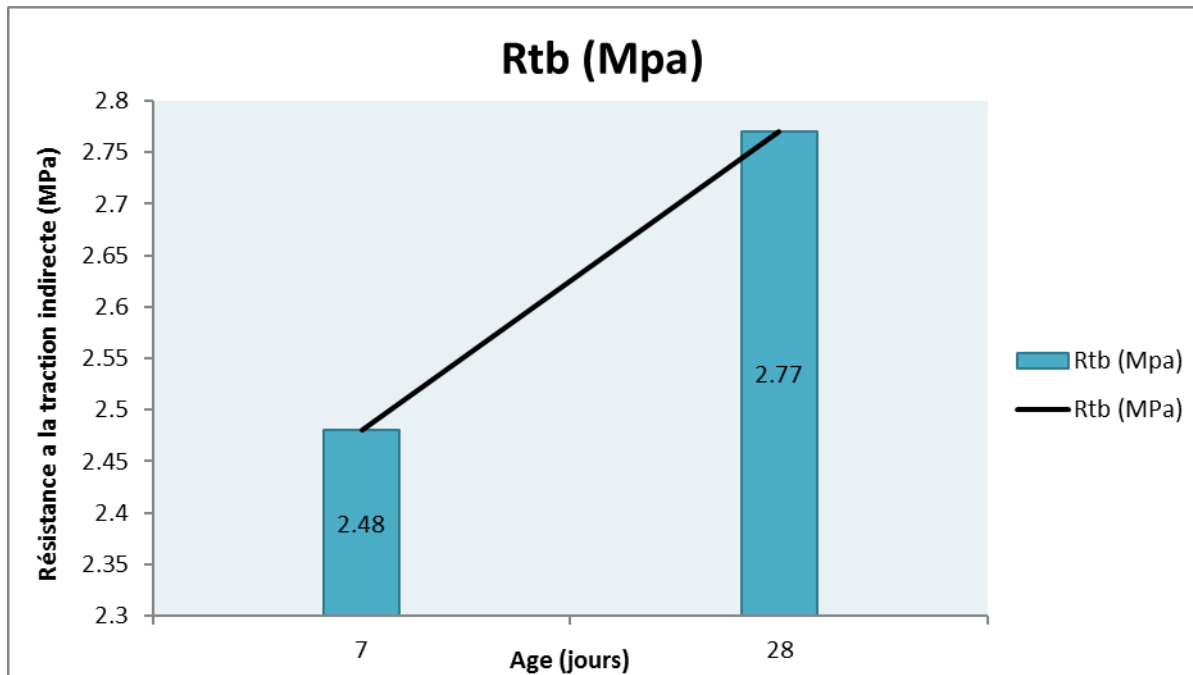


Figure IV.5. Résistance à la traction indirecte de la formulation témoin.

Les résultats du module d'élasticité E de la formulation témoin sans ajout sont représentés dans le Tableau IV.17.

Tableau IV.17. Valeurs du module d'élasticité de la formulation témoin.

	E_1	E_2	E_{moy}
Module E (MPa)	31 572	35 833	33 703

• Interprétation

Dans le cas de formulation témoin, la plupart des propriétés du BCR dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durcie.

Globalement, on constate une augmentation de la résistance à la compression et de la résistance à la traction indirecte en fonction de l'âge des éprouvettes, jusqu'à 28 jours.

L'augmentation de la résistance à la compression se traduit par l'hydratation du ciment qui conduit à la formation des silicates de calcium hydratés (C-H-S) dû à la dissolvation de C_3S et C_2S en ions. Dans le cas de C_2S , la cinétique d'hydratation est lente pour cela la résistance à la compression à court terme (7 jours) est ordinaire (Chamil 32.5 N). Les C-H-S se développent à la surface des grains de ciment non hydratés rapidement jusqu'à 28 jours grâce au C_3S qui est le responsable de cette augmentation à court terme.

Cependant, l'écart de la résistance à la traction est très faible par rapport à celui observé en compression. Le module de Young des échantillons est de l'ordre de 33 GPa.

IV.2.2. Formulation avec un entraîneur d'air

Pour la formulation avec entraîneur d'air, on a utilisé un pourcentage de **0.15%**. Le mélange pour 1m^3 du BCR est donné dans le Tableau IV.18.

Tableau IV.18. Le mélange de formulation avec un entraîneur d'air.

Constituant.	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Ciment	Eau	adjuvant
Masse (kg)	972	102	1045	260	127	0.39

1- Les résistances à la compression

Des éprouvettes de dimensions de $15*30\text{ cm}$ ont été utilisées. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau IV.19.

Tableau IV.19. Résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR contenant un entraîneur d'air.

Age (jours).	7	28
R_c (MPa).	16,24	27,39

L'évolution des Résistances à la compression en fonction de l'âge est représentée dans la Figure IV.6.

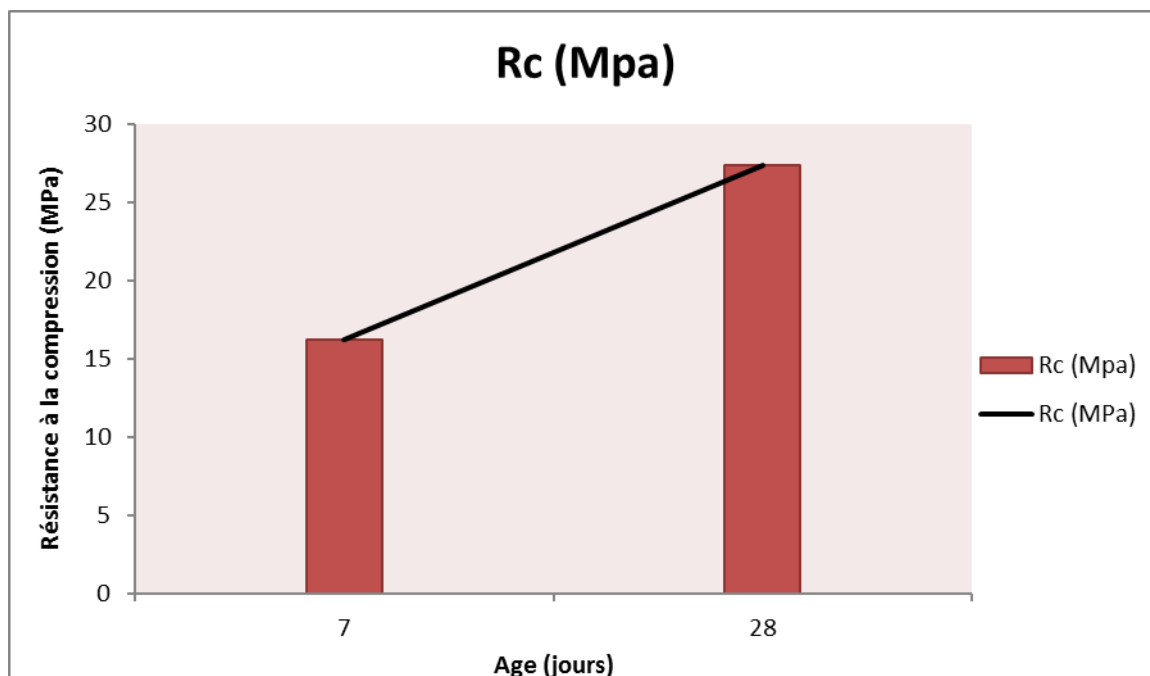


Figure IV.6. Résultats de la résistance à la compression de la formulation contenant un entraîneur d'air.

2- Résistance à la traction indirecte

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.20 et la figure IV.7.

Tableau IV.20. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR contenant un entraîneur d'air.

Age (jours).	7			28		
R_{tb} (MPa).	2,62	2,31	2,75	2,65	2,82	2,77
$R_{tb_{moy}}$ (MPa)	2.56			2.75		

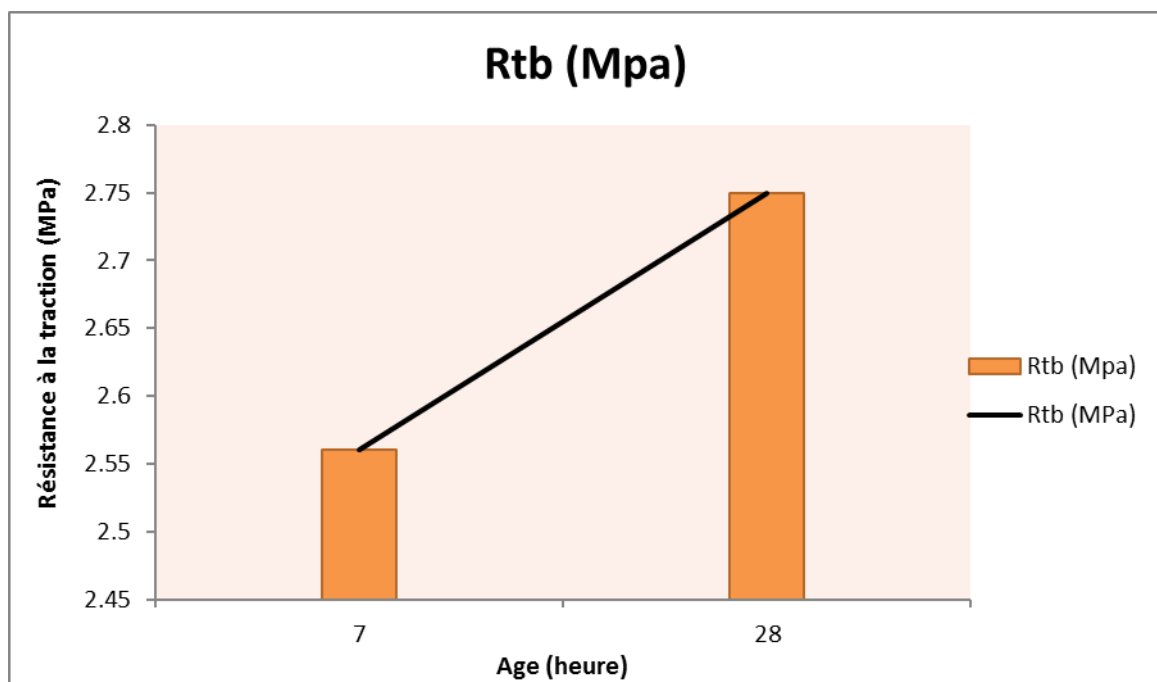


Figure IV.7. Résistance à la traction indirecte de la formulation contenant un entraîneur d'air.

3- Le module d'élasticité (Young) E

Les résultats de module de Young E sont représentés dans le Tableau IV.21.

Tableau IV.21 : Le module E de formulation d'entraîneur d'air.

	E_1	E_2	E_{moy}
Module E (MPa)	34000	34391	34 196

A l'instar de la formulation témoin, la résistance des éprouvettes contenant l'entraîneur d'air augmente en fonction de l'âge. Dans le cas du béton compacté au rouleau, l'entraîneur d'air à faible dosage (<0.3%) n'a pratiquement pas d'influence sur les résistances surtout après durcissement. En effet, on constate que les valeurs de la résistance en compression obtenues à

jeune âge par rapport à celles de la formulation témoin sont moins élevées, cela est dû essentiellement au vide créé par l'entraîneur d'air (porosité élevée). A long terme, les valeurs de R_c se rapprochent de celles de formulation témoin. On peut déduire que l'entraîneur d'air influence sur la résistance au jeune âge uniquement en suite avec l'évaporation d'eau et le durcissement du BCR, la résistance à la compression est très proche de celle de formulation témoin. Concernant la résistance à la traction indirecte, on a obtenu des valeurs similaires à celles de la formulation témoin.

Le module d'élasticité des échantillons formulés avec un entraîneur d'air est légèrement plus élevé que celui de la formulation témoin.

IV.2.3. Formulation avec un super plastifiant

Pour la formulation avec super plastifiant, on a utilisé un pourcentage de **0.25%** Et le mélange pour 1m^3 du BCR est représenté dans le Tableau IV.22.

Tableau IV.22. Le mélange de formulation avec super plastifiant.

Constituant.	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Ciment	Eau	adjuvant
Masse (Kg)	972	102	1045	260	127	0.65

1- La résistance à la compression

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.23 et la figure IV.8.

Tableau IV.23. Résultats de la résistance à la compression (R_c) du BCR formulé avec super plastifiant.

Age (jours).	7	28
R_c (MPa).	24,43	33,16

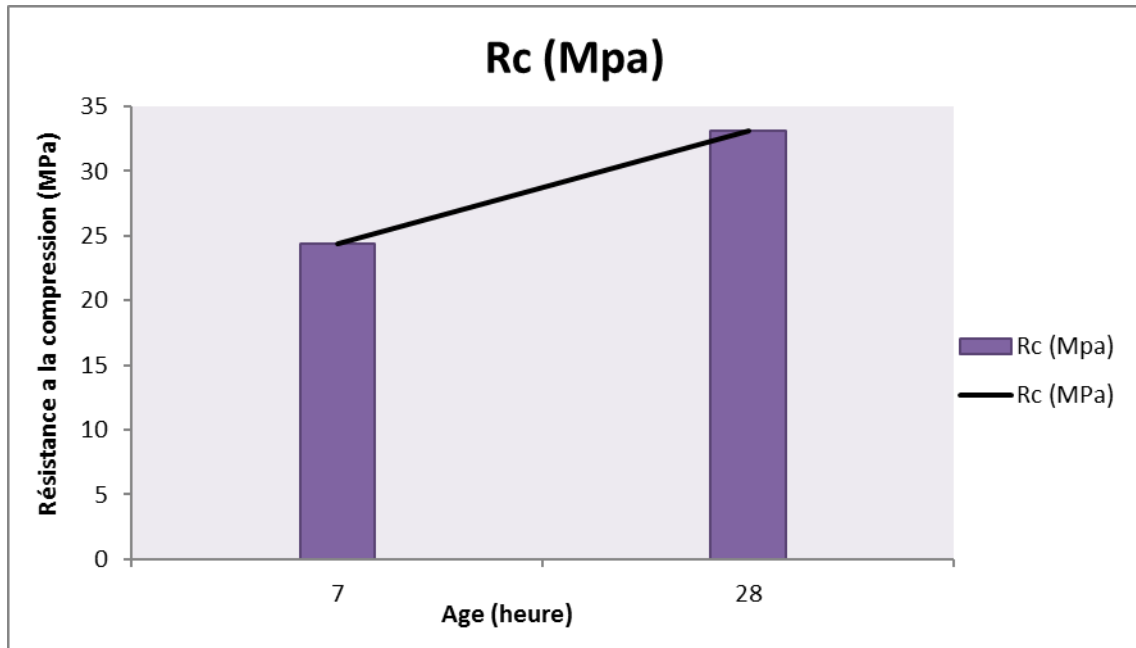


Figure IV.8. Résultats de la résistance à la compression de formulation contenant un superplastifiant.

2- Traction indirecte

Les résultats sont donnés dans le tableau IV.24 et la figure IV.9

Tableau IV.24. Résultats de la résistance à la traction indirecte (Rtb) du BCR contenant un super plastifiant.

Age (jours).	7			28		
Rtb (MPa).	2,65	2,83	2,7	3,7	2,35	3,01
Rtb _{moyen} (MPa)	2.73			3.02		

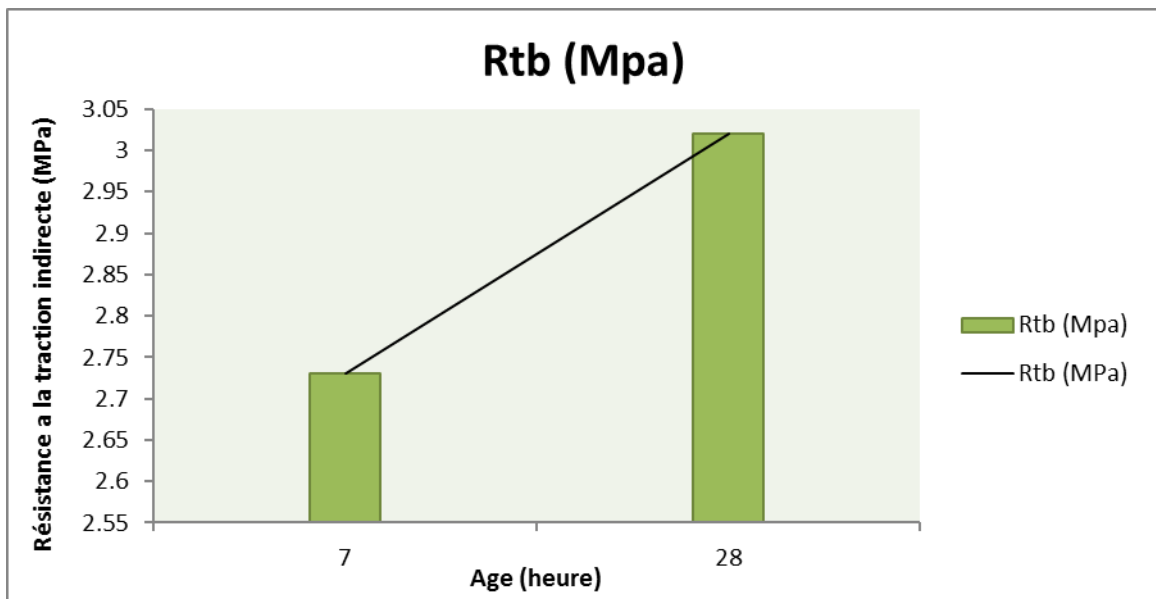


Figure IV.9. Résistance à la traction indirecte de formulation contenant un super plastifiant.

3- Le module d'élasticité (E)

Les résultats de module de Young E du BCR contenant un superplastifiant sont représentés dans le Tableau IV.25.

Tableau IV.25. Valeurs du module d'élasticité du BCR contenant un super plastifiant.

	E ₁	E ₂	E _{moy}
Module E (MPa)	33937	30427	32 182

On remarque une augmentation de la résistance à la compression et à la traction indirecte, qui est justifiée par la diminution du rapport E/C sous l'effet de super plastifiant qui a pour rôle de disperser physiquement les particules du ciment (c'est un agent dispersant) en neutralisant les forces d'attraction donc empêcher les grains de s'attirer les uns vers les autres en recouvrant les grains de ciment et fluidifiant le mélange. Cette augmentation est aussi le cas pour la résistance à la traction indirecte.

IV.2.4. Formulation avec retardateur de prise

Pour la formulation contenant un retardateur de prise, on a utilisé un pourcentage de 0.45% de ce dernier, les dosages du mélange pour 1m³ du BCR sont représentés dans le Tableau IV. 26.

Tableau IV.26. Le mélange de la formulation avec Retardateur de prise.

Constituant.	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Ciment	Eau	adjuvant
Masse (kg)	972	102	1045	260	127	1.17

1- La résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes de BCR formulées par retardateur de prise sont donnés dans le tableau IV.27 et la figure IV.10.

Tableau IV.27. Les résultats de la résistance à la compression (Rc) du BCR contenant un retardateur de prise.

Age (jours).	7	28
Rc (MPa).	20,5	28,59

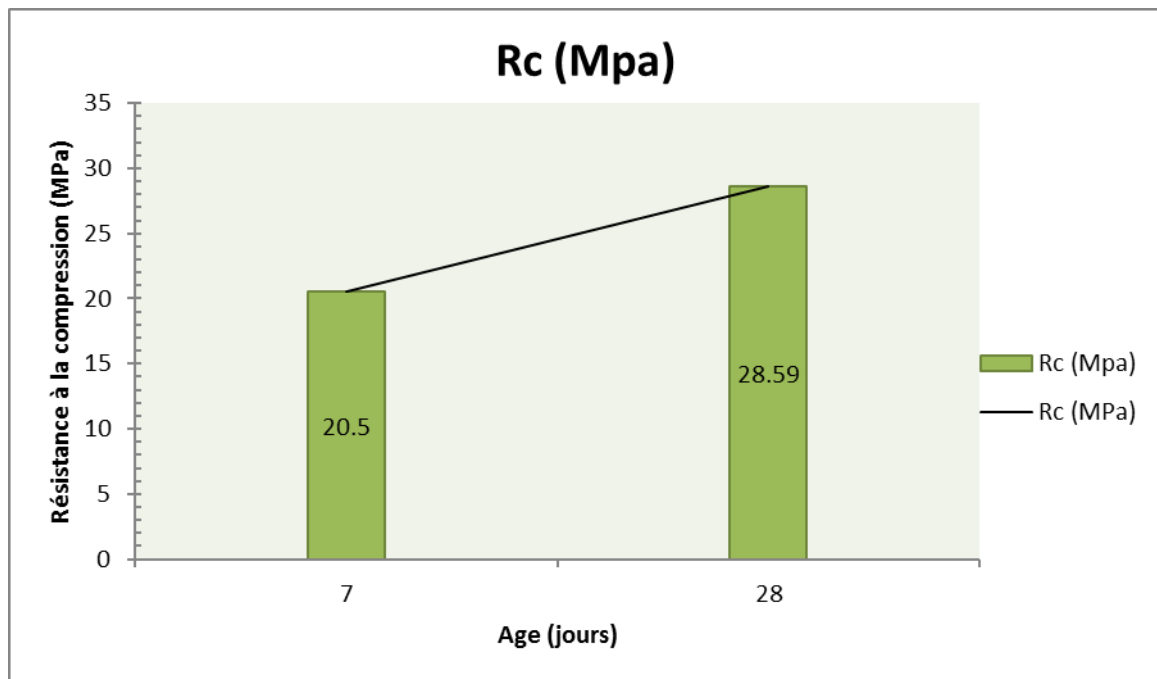


Figure IV.10. Résultats de la résistance à la compression de la formulation contenant un retardateur de prise.

2- Résistance à la traction

Les résultats de la résistance à la traction pour cette formulation sont donnés dans le tableau IV.28 et la figure IV.11.

Tableau IV.28. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR contenant un retardateur de prise.

Age (jours).	7			28		
R_{tb} (MPa).	2,47	2,69	2,35	2,91	3,41	2,27
$R_{tb_{moyen}}$ (MPa)	2.50			2.86		

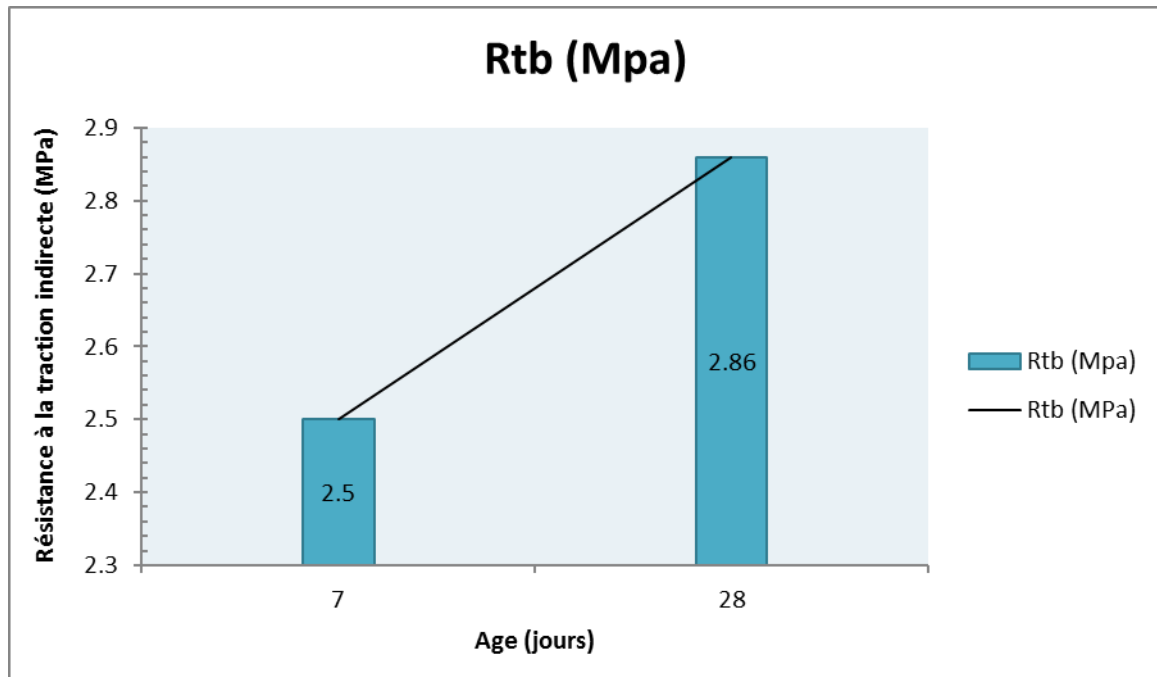


Figure IV.11. Résistance à la traction indirecte de la formulation contenant un retardateur de prise.

3- Le module d'élasticité

Les résultats de module de Young E sont représentés dans le Tableau IV.29.

Tableau IV.29. Valeurs du module d'élasticité de la formulation contenant un retardateur de prise.

	E_1	E_2	E_{moy}
Module E (MPa)	33200	33000	33100

On utilisant le retardateur de prise, on a une légère évolution dans les résistances à la compression et à la traction indirecte mais comme son nom l'indique, l'utilisation de cet adjuvant est destinée à retarder la prise avec un module d'élasticité similaire à celui de formulation témoin.

IV.2.5. Formulation avec les fibres métalliques

Pour la formulation contenant des fibres métalliques, on a utilisé une masse de 25 kg/m³. Le mélange pour 1m³ du BCR est représenté dans le Tableau IV.30.

Tableau IV.30. Le mélange de formulation contenant des fibres métalliques.

Constituant.	Sable 0/4	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Ciment	Eau	Fibres
Masse (kg)	972	102	1045	260	127	25

1- La résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression à différents âges des formulations contenant des fibres métalliques sont donnés dans le tableau IV.31 et la figure IV.12.

Tableau IV.31. Résultats de la résistance à la compression (Rc) du BCR contenant des fibres métalliques.

Age (jours).	7	28
Rc (MPa).	21,75	25,94

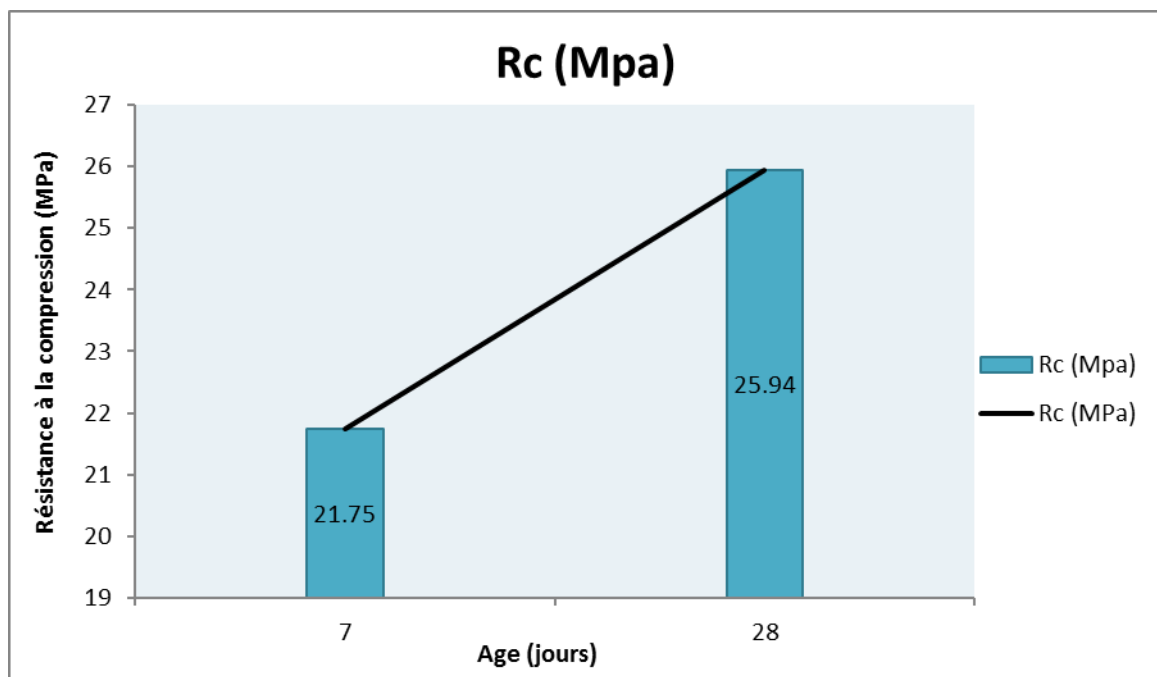


Figure IV.12. Résultats de la résistance à la compression de formulation contenant des fibres métalliques.

2- Résistance à la traction

Les résultats de la résistance à la traction indirecte à différents âges des formulations contenant des fibres métalliques sont donnés dans le tableau IV.32 et la figure IV.13.

Tableau IV.32. Résultats de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) du BCR avec fibres métalliques.

Age (jours).	7			28		
R_{tb} (MPa).	2,58	2,44	2,23	2,93	2,94	2,21
R_{tb} moyen (MPa)	2.42			2.69		

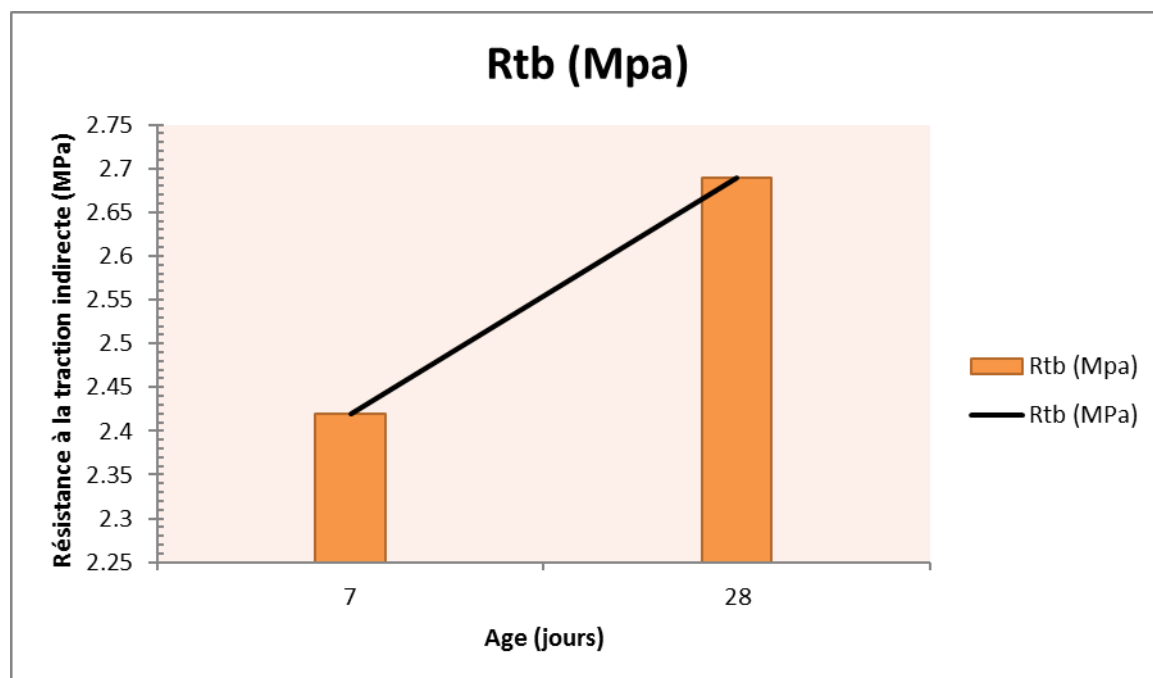


Figure IV.13 : Résistance à la traction indirecte de la formulation avec fibres métalliques.

3- Le module d'élasticité (E)

Les résultats de module d'élasticité des échantillons sont représentés dans le Tableau IV.33.

Tableau IV.33. Le module d'élasticité de formulation avec fibres métalliques.

	E_1	E_2	E_{moy}
Module E (MPa)	47268	29900	38584

Contrairement à ce qui a été prévu, on n'a pas remarqué une modification dans les résistances sauf pour la résistance à la compression à court terme. En revanche, une amélioration du module d'élasticité a été constatée.

Afin d'effectuer une étude comparative, les résultats regroupés des propriétés mécaniques des différentes formulations (F) avec chaque ajout employé sont donnés dans les figures IV.14, IV.15, IV.16.

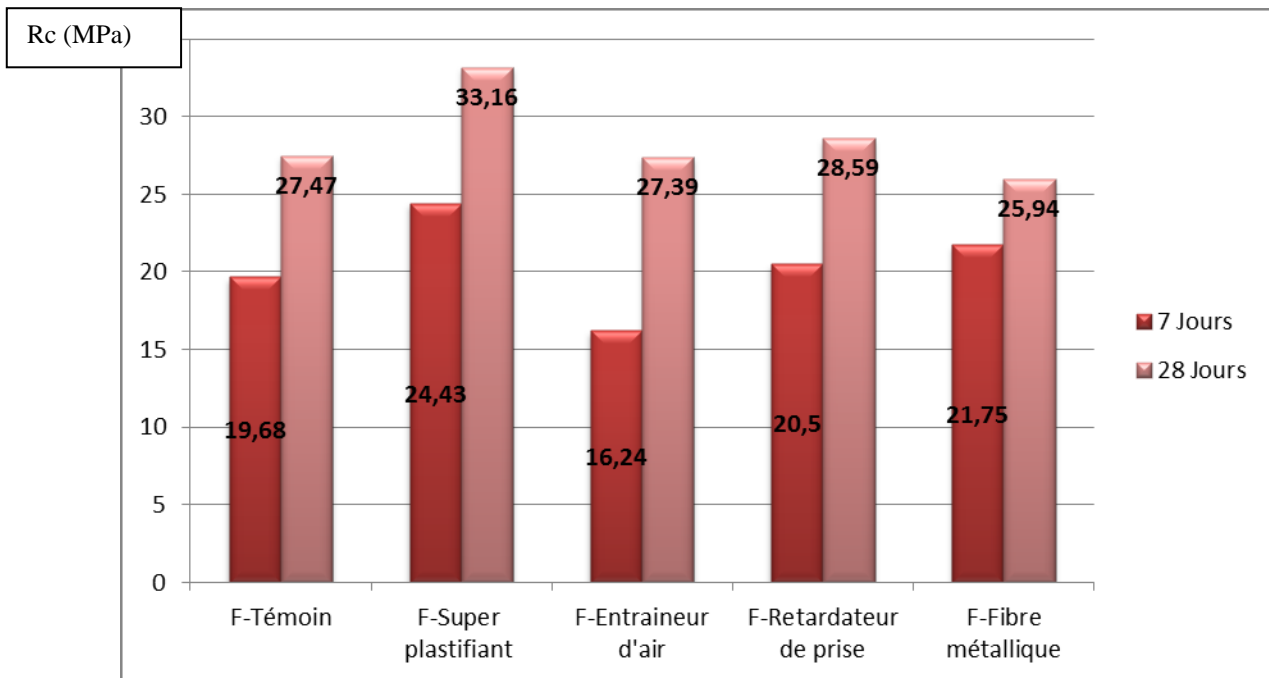


Figure IV.14. Résistance à la compression à 7 et 28 jours.

D'après l'histogramme des résistances à la compression à 7 jours, on constate que le super plastifiant a donné la meilleure valeur de résistance à cause de la diminution du rapport E/C car on sait que la diminution du dosage en eau augmente les contraintes limites en compression. Ensuite, vient la formulation contenant des fibres métalliques et le retardateur de prise avec des valeurs proches les unes des autres. Les valeurs les moins élevées ont été enregistrées respectivement par la formulation témoin et celle contenant un entraîneur d'air. Les valeurs de cette dernière sont justifiées par les vides créés par ce dernier ou on sait que les pores diminuent les résistances.

A 28 jours, le super plastifiant garde la valeur la plus élevée de résistance, en 2^{ème} position, on trouve le BCR formulé avec retardateur de prise puis la formulation avec entraîneur d'air et le BCR témoin avec des valeurs rapprochées. Enfin, la plus faible valeur de résistance à la compression est enregistrée par le BCR contenant des fibres métalliques.

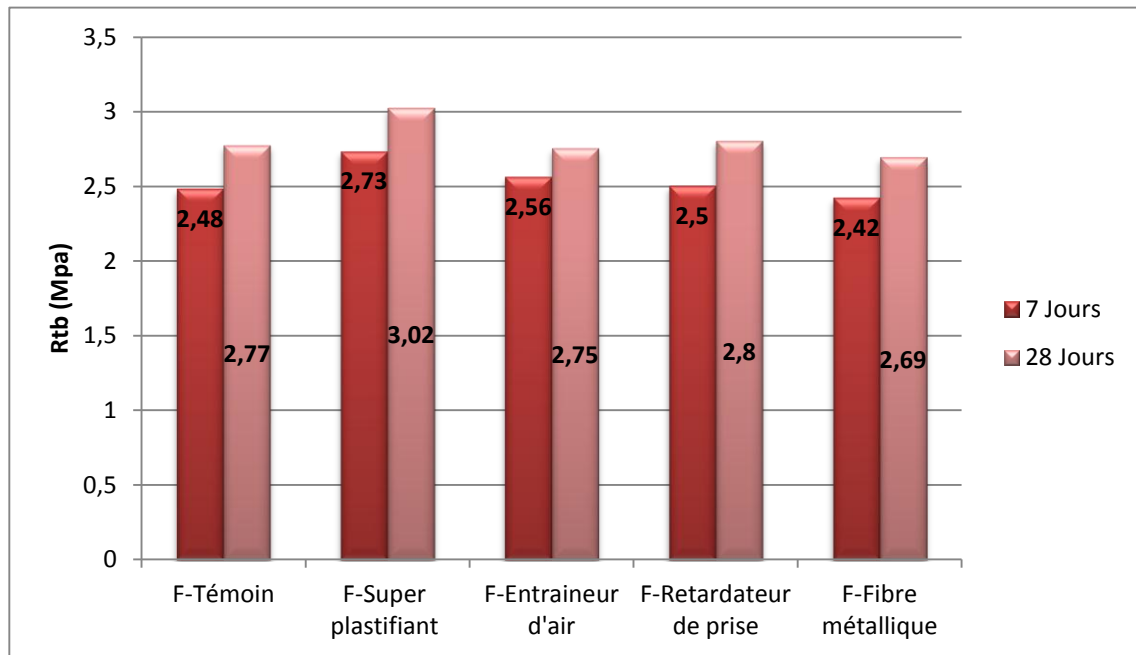


Figure IV.15. Résistance à la traction indirecte à 7 et 28 jours.

Pour la résistance à la traction indirecte à 7 jours, la valeur la moins élevée est donnée par la formulation contenant des fibres métalliques, cela peut être expliqué par la non homogénéité entre les constituants du BCR et les fibres pendant le compactage. A l'âge de 28j, les valeurs de la résistance des différentes formulations ont évoluées légèrement.

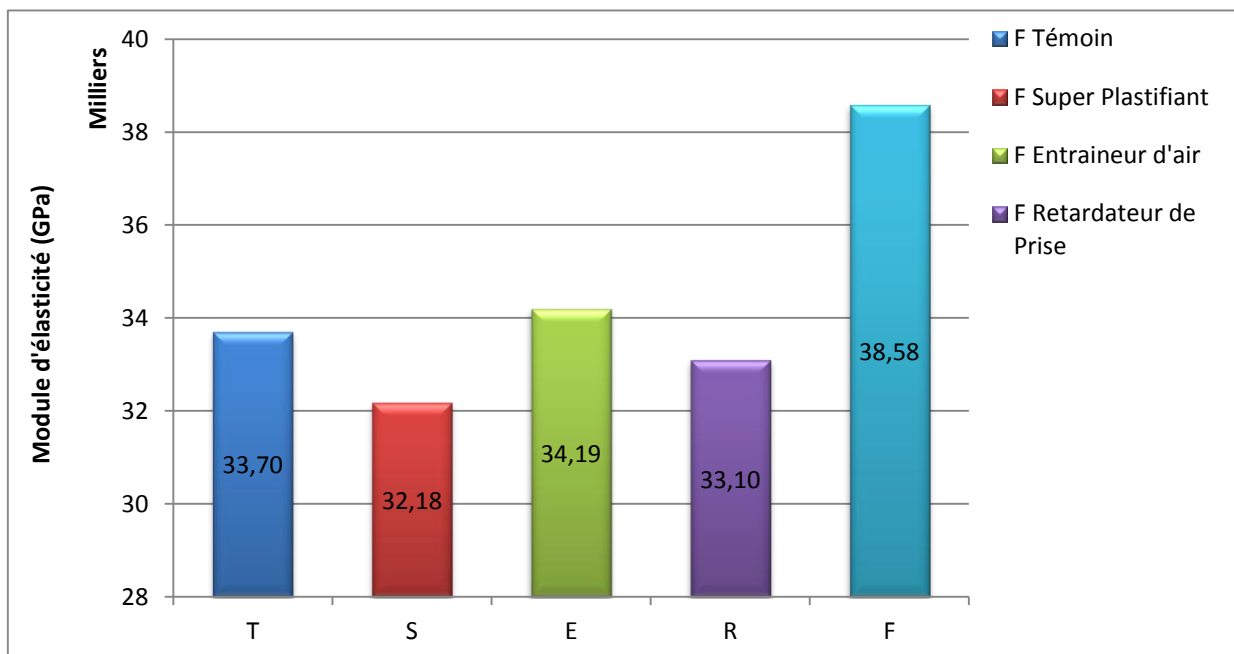


Figure IV.16. Evolution du module d'élasticité des échantillons selon l'ajout.

On remarque que la valeur du module d'élasticité du BCR dosé avec les fibres métalliques présentent la plus grande valeur avec un écart important par rapport aux autres formulations. Ce peut être expliqué par la rigidité acquise du matériau et sa faible déformation due à l'incorporation des fibres.

IV.3. Le délai de maniabilité

Le principe de calcul de maniabilité consiste à préparer un seul mélange pour la confection des 5 éprouvettes nécessaires pour cet essai.

1- Délai de maniabilité de la formulation témoin

Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure IV.17.

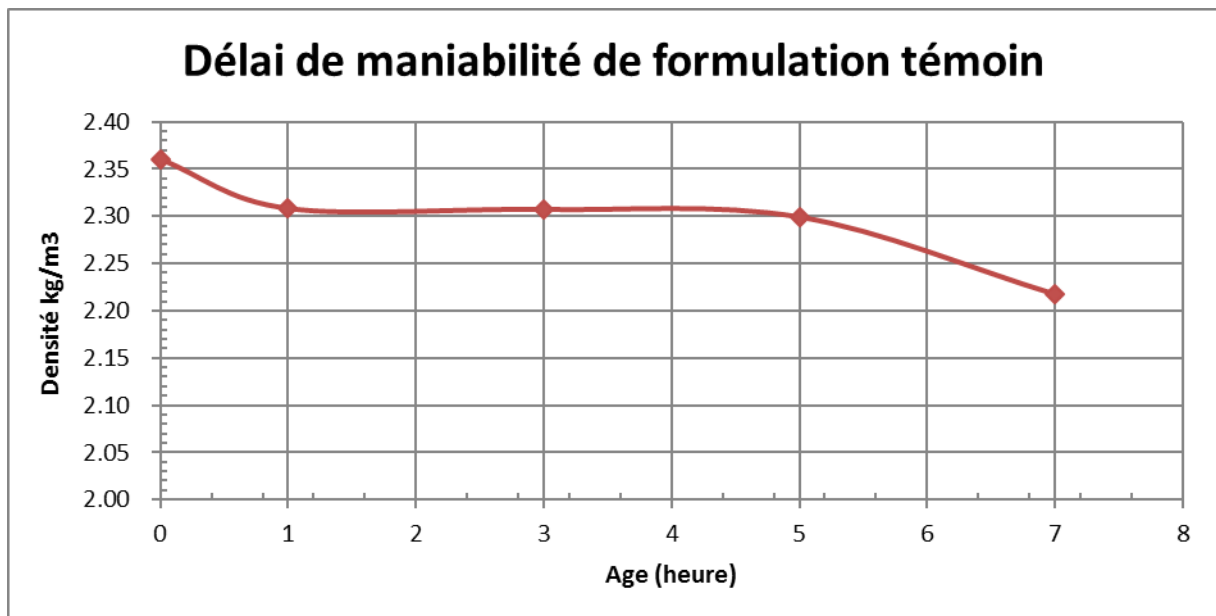


Figure IV.17. Courbe de délai de maniabilité du BCR témoin.

- La densité sèche à 98% d'optimum est de 2.31.

2- Délai de maniabilité de la formulation contenant un entraîneur d'air

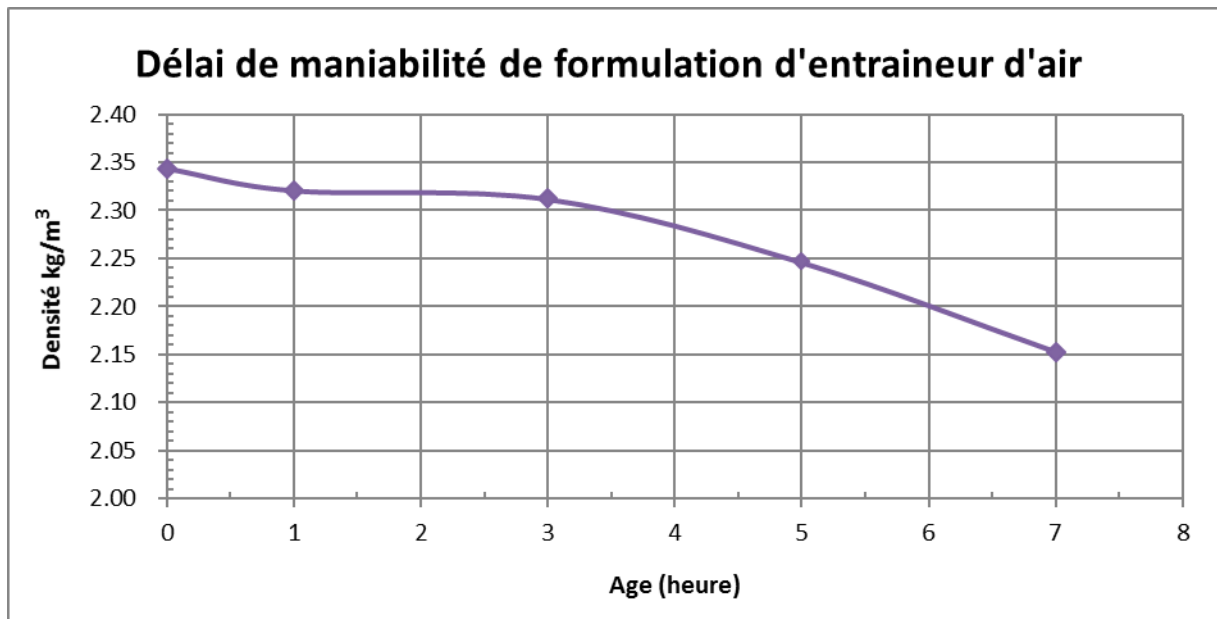


Figure IV.18. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant un entraîneur d'air.

- La densité sèche à 98% d'optimum est de 2,30.

3- Délai de maniabilité de la formulation avec super plastifiant

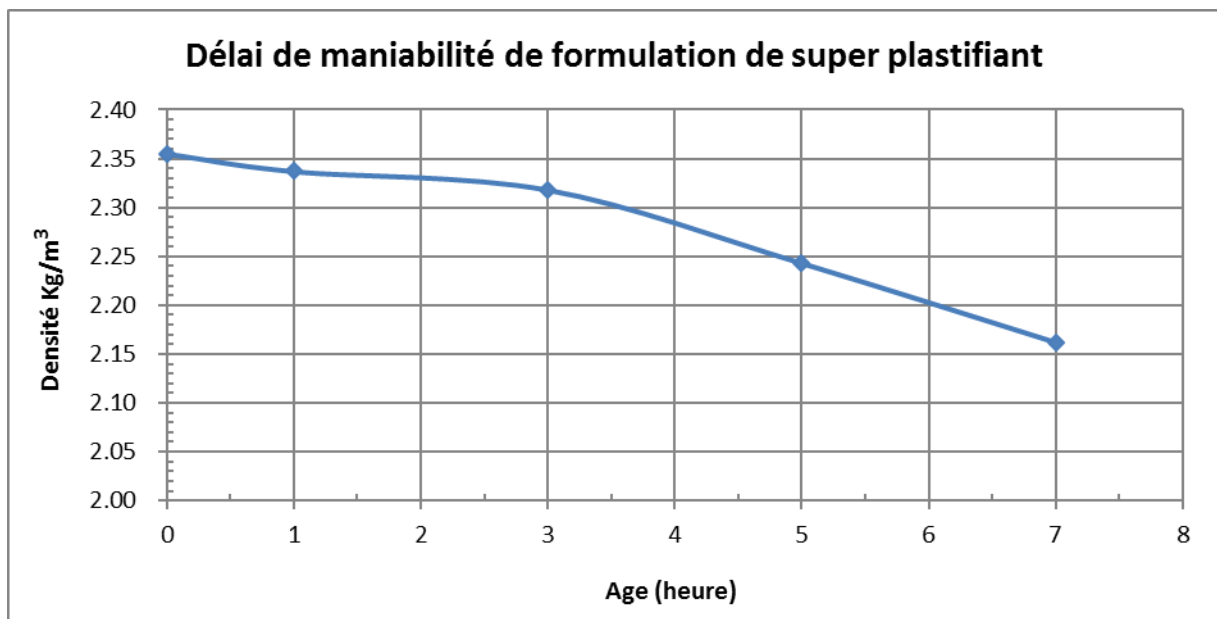


Figure IV.19. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant un super plastifiant.

- La densité sèche à 98% d'optimum est de 2,31.

4- Délai de maniabilité de la formulation avec retardateur de prise

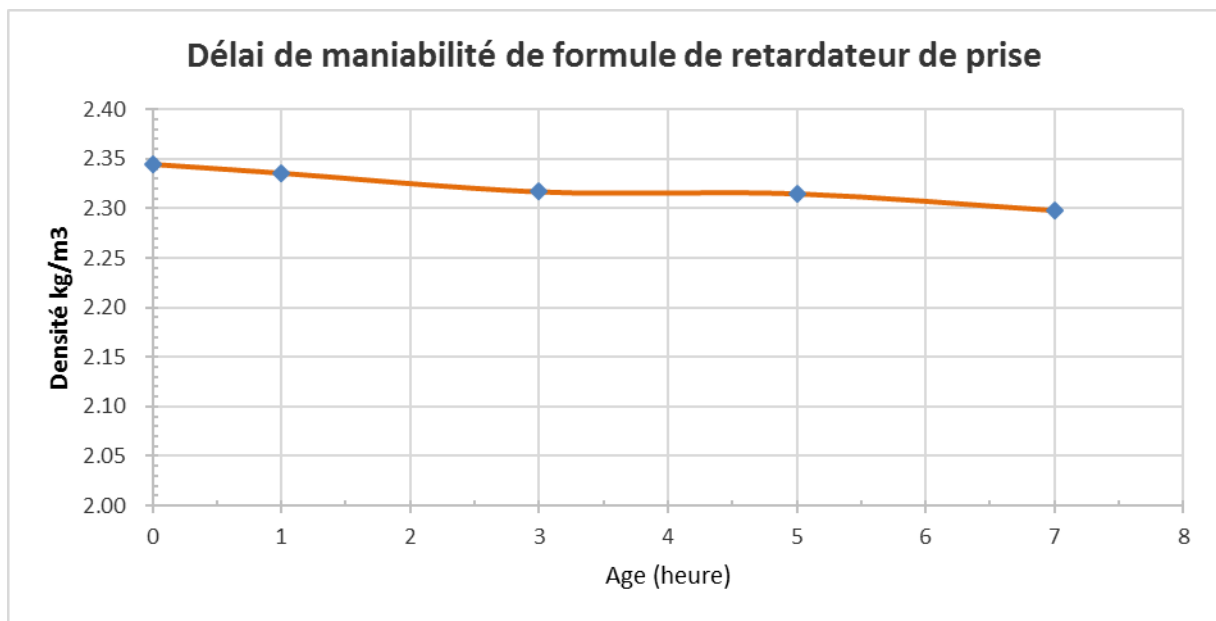


Figure IV.20. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant un retardateur de prise.

- La densité sèche à 98% d'optimum est de 2,30.

5- Délai de maniabilité de la formulation contenant des fibres métalliques

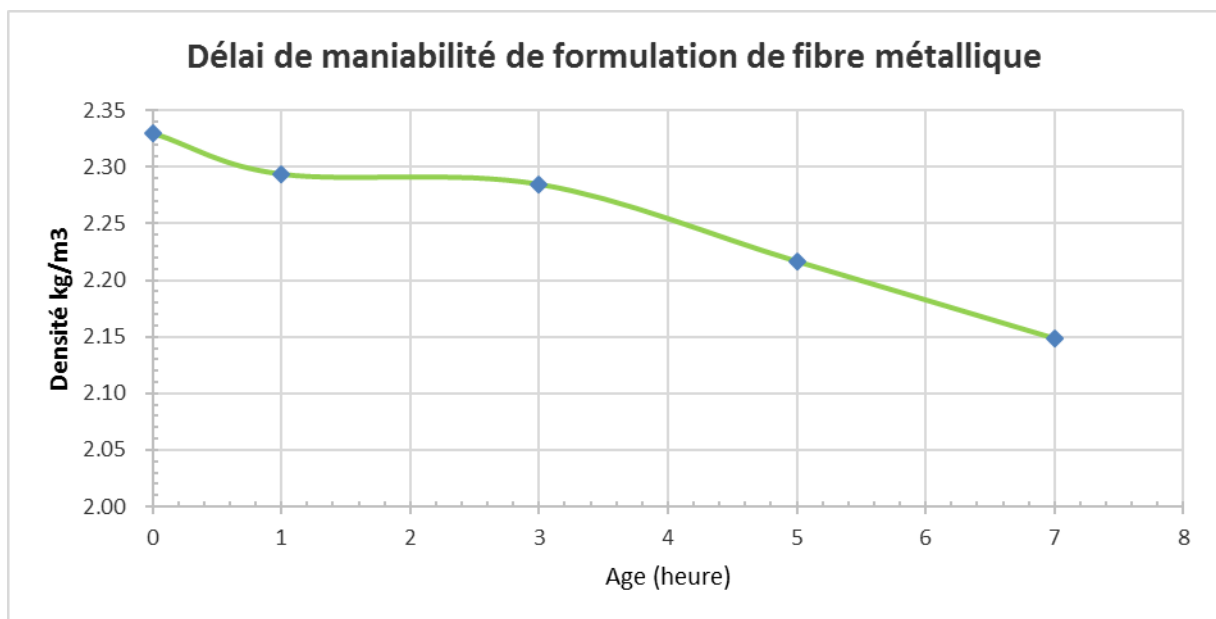


Figure IV.21. Courbe de délai de maniabilité du BCR contenant des fibres métalliques.

- La densité sèche à 98% d'optimum est de 2,28.

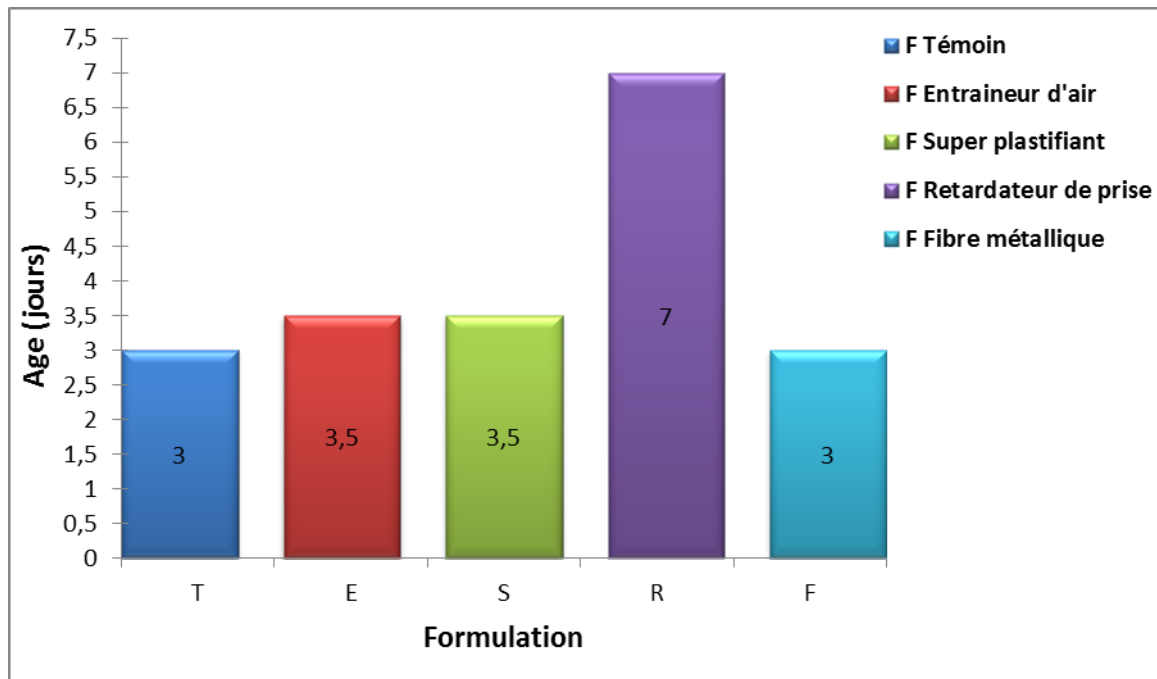


Figure IV.22. Les délais de maniabilité des formulations réalisées.

Pour les délais de maniabilité, on constate que le BCR le plus maniable est celui qui contient un retardateur de prise avec un délai de 7 heures, cela est justifié par l'adsorption du retardateur sur les grains de ciment ce qui ralentit la précipitation des composés hydratés et donc la formation du gel autour de ces particules, puis on trouve en 2^{ème} position le BCR dosé avec le super plastifiant et l'entraîneur d'air avec un délai de 3.5 heures. Cela est dû au vide créés par l'entraîneur d'air ce qui facilité la fluidité du BCR. Le super plastifiant dispersent les particules de ciment, par conséquent, la maniabilité du béton est automatiquement améliorée.

Enfin et avec un délai de 3 heures, on trouve la formulation avec fibres métalliques qui n'ont pas influencé sur la maniabilité c'est pour cela que le délai est similaire à celle de formulation témoin.

Conclusion générale

D'une manière générale, le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire comporte une étude sur le Béton Compacté au Rouleau (BCR) en vue d'une application en technique routière et en utilisant des matériaux de gisements locaux, avec la spécificité d'un faible dosage en ciment estimé à 260 kg/m^3 .

Les résultats obtenus dans l'étude expérimentale nous ont permis de recueillir un certain nombre d'informations et de tirer les conclusions suivantes :

- l'addition des ajouts, exception faite pour les fibres métalliques, nous ont permis d'améliorer les résistances mécaniques ainsi que la rigidité du BCR.
- Contrairement à un béton ordinaire, l'addition d'un entraîneur d'air dans un BCR avec un pourcentage $< 0.3\%$ joue le rôle des fines et fait augmenter la maniabilité et n'influe pratiquement pas sur les résistances mécaniques.
- Le mélange contenant des fibres métalliques a donné des résistances inférieures à ce qui a été prévu et cela est éventuellement dû à l'utilisation de fibres métalliques assez longues ou bien à la densité différente par rapport aux autres constituants du béton.
- L'effet de l'utilisation des ajouts dans un BCR est pratiquement le même que pour les bétons classiques.
- Concernant le délai de maniabilité (en fonction de temps), en plus du retardateur de prise qui est employé pour l'amélioration de cette propriété, on a conclu également que l'addition de l'entraîneur d'air ainsi que le super plastifiant joue le même rôle avec moins d'efficacité.
- Un BCR nous permet d'obtenir une valeur de résistance à la traction indirecte à 7 jours supérieures à la valeur recommandée pour la construction des chaussées à 28 jours (2.1 MPa) et une valeur de module de Young supérieur à 20 GPa .

Recommandations

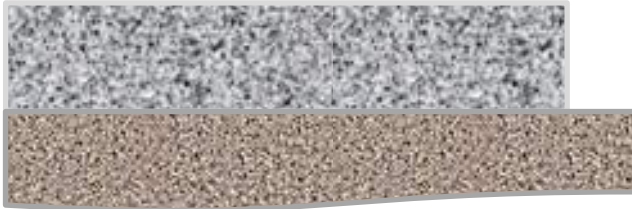
- Un travail sur le même thème est recommandé pour confirmer les résultats obtenus notamment l'incorporation des fibres métalliques.
- Une étude microstructurale de ce type de béton adjuvanté est recommandée pour bien expliquer son comportement.

Annexe

A- Evaluation économique

L'évaluation économique de deux différentes variantes de structure de chaussées (BB et BCR) plus une estimation du pourcentage de gain est faite par le laboratoire CDL.

1- Solution BCR



e = 25 cm, BCR.

e = 10 cm, Grave non traité.

Couche	Epaisseur (cm)	Matériaux	Prix unitaire/ m ² (da)
Roulement	25	BCR	3200
Base / fondation	10	Grave non traité	200
Total			3400

2- Solution classique (Béton bitumineux)



e = 6 cm, Béton bitumineux.BB

e = 23 cm, Grave bitume GB

e = 10 cm = Grave non traité.

Couche	Epaisseur (cm)	Matériaux	Prix unitaire/ m ² (da)
Roulement	6	BB	2432
Base	23	Grave bitume	775.5
Fondation	10	Grave non traité	200
Total			3407.7

$$P \% = \frac{\frac{3407 - 3400}{15} \times 25}{\frac{3407}{15}} * 100 = 40\%.$$
 Dont 15 est la durée de vie d'une chaussée en BB et 25 est la durée de vie d'une chaussée en BCR.

- On estime un gain de 40% en réalisant une chaussée en BCR au lieu de la fabriquer en Béton Bitumineux.

Caractérisation du ciment

Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B 32,5 N.

- **Caractéristiques physiques**

Tableau 1 Caractéristiques physiques du ciment utilisé

		Valeur	Unité
Consistance normale		27±2.0	(%)
La finesse (Blaine)		4300-5500	(cm ² /g)
Temps de prise	début	150±50	(min)
	fin	250±50	
Résistance à la flexion	7 jours	6	(MPa)
	28 jours	7,5	
Résistance à la compression	7 jours	>16.0	
	28 jours	>32.5	

- **Les caractéristiques minéralogiques**

Calculée selon la méthode de bogue, La composition minéralogique de ciment CPJ-CHAMIL 32,5 N est donnée dans le Tableau 2

Tableau 2 Composition minéralogique du ciment utilisé

Phase	C ₃ S	C ₃ A
Teneur %	60±3	7.5±1

- **Les Caractéristiques chimiques**

La composition chimique du ciment est établie par le laboratoire de la cimenterie Lafarge de M'sila. Certaines teneurs sont données dans le tableau 3

Tableau 3 Caractéristiques chimiques du ciment utilisé

Eléments	Teneur (%)
Perte au feu (NA 5042)	13.0±2
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.7±0.5
Teneur en chlorures	0,02-0.04

B- Fiche technique des adjuvants

• Retardateur de prise

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Le Plastiretard est un retardateur de prise pouvant être utilisé dans tous les bétons, chapes et mortiers.

DOMAINES D'APPLICATION

Effet sur le temps de prise

Par son effet retardateur, le Plastiretard permet de retarder le temps de prise des bétons.

Il est particulièrement adapté :

- A la mise en œuvre par temps chaud
- Aux bétons nécessitant une durée pratique d'utilisation élevée,
- Aux bétons nécessitant des délais de finition longs.
- Amélioration de la maniabilité

DESCRIPTION DU PRODUIT

Aspect / Couleur Liquide jaune, légèrement trouble

Durée de Conservation 36 mois dans son emballage d'origine intact

Conditions de Stockage A l'abri du gel.

En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.

Densité $1,175 \pm 0,030$

Valeur pH $9,5 \pm 1,0$

Extrait Sec $31,0 \pm 1,5\%$

Teneur Totale en Ions Chlorure $\leq 0,1 \%$

Équivalent Oxyde de Sodium $\leq 6,0 \%$

Par son effet plastifiant, le Plastiretard permet également une mise en œuvre plus facile.

Amélioration des résistances mécaniques.

Grâce à sa fonction de retardateur, le Plastiretard permet d'augmenter les résistances mécaniques à long terme.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Par son action physico-chimique, le Plastiretard permet

- 1-de retarder le début de prise et de conserver une bonne ouvrabilité pendant le temps nécessaire à sa mise en place,
- 2-d'améliorer la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage,
- 3-d'augmenter les résistances mécaniques à long terme,

• Entraîneur d'air puissant pour usages spéciaux

Présentation

Le SIKA AER est un entraîneur d'air puissant qui apporte de fines bulles d'air dont le diamètre varie de 10 à 500 microns et qui sont réparties de façon homogène dans la masse du béton.

Domaines d'application Le SIKA AER s'emploie principalement pour

Les bétons devant résister au gel

Ouvrages d'art,
Bétons en montagne,
Bétons routiers,
Barrages, etc...

Les bétons à granulométrie incomplète (manque de fines).

L'analyse granulométrique met parfois en évidence le manque d'éléments fins : il en résulte des bétons «rêches», difficiles à mettre en oeuvre et à faible compacité.

L'ajout de SIKA AER, en rectifiant dans une certaine mesure la courbe granulométrique, rend ces bétons plus maniables et plus compacts.

Les bétons à démoulage en continu.

Le SIKA AER augmente la thixotropie du béton et permet la réalisation de bétonnage en continu (utilisation de machine à coffrage glissant).

Caractéristiques

Stockage A l'abri du gel.

En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.

Conservation 36 mois dans son emballage d'origine intact.

Données techniques

Densité $1,010 \pm 0,010$

P^H $2,5 \pm 1$

Extrait sec halogène $6,5 \pm 0,6$ % (méthode halogène selon NF085)

$5,5 \pm 0,5$ % (NF EN 480-8)

Teneur en ion Cl- $\leq 0,1$ %

Teneur en Na₂O éq. $\leq 1,0$ %

- **Super plastifiant hautement réducteur d'eau**

Description du produit

Le Sika® FM 625 RMC est un superplastifiant hautement réducteur d'eau.

Domaine d'application

Le Sika® FM 625 RMC s'adapte à tous les bétons, aussi bien en centrale qu'en préfabrication.

Grâce à la forte réduction d'eau combinée à l'excellente fluidité combinée

Il convient particulièrement pour la confection des types de béton ci-après:

- ❖ Béton fluide
- ❖ Béton à faible E/C
- ❖ Béton à haute résistance à long terme
- ❖ Polybéton
- ❖ Béton étanche

Le Sika® FM 625 RMC peut être utilisé avec d'autres adjuvants

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Le Sika® FM 625 RMC agit par différents mécanismes. Son action se situe sur la surface d'absorption du grain de ciment et la séparation de chacun de ces grains. Il influence aussi le processus d'hydratation.

Grâce à ses propriétés, on obtient les résultats ci-dessous

- ❖ Forte réduction d'eau,
- ❖ Très grande fluidité,
- ❖ Long maintien de rhéologie,
- ❖ Augmente fortement l'étanchéité,
- ❖ Diminue la vitesse de carbonatation du béton.

Résumé

Le béton compacté au rouleau (BCR) est de plus en plus utilisé pour tous les types de chaussée qui demandent résistance et robustesse. Ce matériau compacté au rouleau allie la performance du béton conventionnel à la simplicité de l'asphalte. Ce travail expérimental vise à étudier et évaluer l'effet de l'incorporation de quelques additifs sur les caractéristiques intrinsèques d'un béton compacté au rouleau formulé à base de matériaux locaux en vue d'une application en technique routière. Des fibres métalliques, un super plastifiant, un retardateur de prise et un entraîneur d'air ont été introduits avec de faibles dosages pendant la formulation des différents mélanges de BCR. Des éprouvettes de chaque BCR ont été confectionnées dans des moules par un Proctor modifié et conservées dans une chambre à 98% d'humidité. En plus des délais de maniabilité, la caractérisation du BCR durci a été effectuée moyennant des mesures expérimentales de résistance à la compression et à la traction indirecte ainsi que la détermination du module d'élasticité. Les résultats expérimentaux sont comparés avec ceux d'une formulation témoin sans aucun ajout.

Mots clés : Béton compacté au rouleau, ajouts, adjuvants, caractéristiques.

Abstract:

Roller compacted concrete (BCR) is being used more and more for all types of pavement that require strength and robustness. This compacted roller material combines the performance of conventional concrete with the simplicity of asphalt. This experimental work aims to study and evaluate the effect of the incorporation of some additives on the intrinsic characteristics of a roller-compacted concrete formulated with local materials for application in road engineering. Metal fibers, a super plasticizer, a set retarder and an air trainer were introduced with low dosages during the formulation of the various BCR mixtures. Test samples of each BCR were made in molds by a modified Proctor and stored in a 98% moisture chamber. In addition to the workability delays, the characterization of the hardened BCR was carried out by means of experimental measurements of compressive and indirect tensile strength as well as the determination of the elasticity modulus. The experimental results are compared with those of a control formulation without any addition.

Key words: Roller compacted concrete, additives, performances, characteristics.

ملخص

يتم استخدام الخرسانة المضغوطة بالأسطوانة (الخرسانة المدكوكة) بكثرة لجميع أنواع الأرصفة التي تتطلب قوة ومتانة تجمع مواد. تجمع مواد الأسطوانة المضغوطة هذه بين أداء الخرسانة التقليدية وبساطة الإسفلت. يهدف هذا العمل التجريبي إلى دراسة وتقييم تأثير دمج بعض الإضافات على الخصائص الجوهرية للخرسانة المضغوطة بالأسطوانة المصنوعة من مواد محلية للتطبيق في هندسة الطرق. تم إدخال الألياف المعدنية، الملدنات الفائقة، مجموعة مثبطات ومدخل الهواء انه **Proctor** الخرسانة المدكوكة المختلفة. حيث تم تصنيع هذه العينات في قوالب بجرعات منخفضة أثناء صياغة مخاليط المتصلب من المعدلة وتخزينها في غرفة الرطوبة 98%. بالإضافة إلى تأخر القدرة على المناورة، تم إجراء توصيف الخرسانة المدكوكة خلال قياسات تجريبية لقوة الشد الانضغاطية وغير المباشرة بالإضافة إلى تحديد معامل المرونة. تتم مقارنة النتائج التجريبية مع نتائج صياغة العينة بدون التحكم بأي إضافات.

الكلمات المفتاحية: الأسطوانة المضغوطة، الإضافات، الإضافات، الخصائص

- [1] Site web de Ciment de Québec: www.BCR.CC
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M., (2000), Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtement en béton compacté au rouleau, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.
- [5] Serne, R.A., (1997). Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada. In International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA.
- [6] GAGNE, Richard: Les bétons compactés au rouleau- principes, application et Nouveau développement BCR, CRIB (2004).
- [7] BaCaRa, (1996). Le Béton Compacté au Rouleau : les Barrages en BCR : Projet National BaCaRa 1988-1995, Paris: Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [8] Gauthier, P., & Marchand, J. (2002). Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association des constructeurs de routes et de grands travaux du Québec.
- [9] 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.
- [10] Harrington, D. et al., (2010). Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report, National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University.
- [11] USACE, (2000). Engineering and Design, Roller Compacted Concrete. Engineer Manual N° 1110-2-2006,
- [12] Serne, R.A., (1997). Trends in the use of roller compacted concrete pavements in Canada. In International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, 6th, 1997, Indianapolis, Indiana, USA.
- [13] Belaïd M., (2004), Etude des Matériaux du Béton Compacté au Rouleau et du remblai dur, Annales de l'Equipement, Volume XIV, N° 02, Tunisie.
- [14] Projet National BaCaRa 1988-1996, (1996), Le béton compacté au rouleau. Presse ENPC, Paris, pp. 17-25.

- [15] Neville, A., (2000). Propriétés des bétons, Edition Eyrolles.
- [16] R. Karsten, H. Otmar. Revêtements routiers en béton compacté au rouleau : expériences Faites en Allemagne 2006.
- [17] Site Web Association Canadienne du ciment, <http://www.cement.ca>
- [18] ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- [19] Pittman, D.W., (1989). The effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements.,
- [20] Association Béton Québec (ABQ), “Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec”.
- [21] Canadian Portland Cement Association, “Thickness design for concrete highway and Streets pavements”, Canadian Edition/metric, Engineering Bulletin.
- [22] Projet National BaCaRa 1988-1995. “Le béton compacté au rouleau”. Presse ENPC 1996, pp.200.
- [23] OTSAMA MBA Jean Paul. Contribution à l'étude de l'influence des matériaux fins sur les propriétés rhéologique et mécanique du béton compacté au rouleau pour barrages. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées : Génie civil. SHERBROOKE (Québec), Canada : Université De SHERBROOKE ,1997 ,126.
- [24] Coquand R., (1985), Routes, Eyrolles, Paris France, pp. 7-46.
- [25] Smith T., Tighe S. and Fung R., (2001), Presentation of the Concrete Pavement Technology Advancements, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia.
- [26] ACI. Guide to Curing Concrete (Reapproved 2008), États-Unis. American Concrete Institute, 2001, 311p. (ACI 308R-01).
- [27] 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.