

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Thèse de Doctorat(LMD) en Génie Civil

Option:Matériaux en genie civil

Présenté Par

Ali Kouadri Fadhila

Intitulé :

**EFFET DES DECHETS DE BETON BITUMINEUX SUR LE
COMPORTEMENT DU BETON COMPACTE AU ROULEAU**

Soutenue le 16/05/ 2026, devant le jury composé de :

HADJ MOSTEFA ADDA	Professeur	Université de Relizane	Président
BENYAHIA AMAR	MCA	Université de Blida 1	Examineur
DJEFFAL HOUCINE	MCA	Université de Tissemsilt	Examineur
OUEDAH CHAIB	MCA	Université de Relizane	Examineur
SALHI MOHAMED	Professeur	Université de Relizane	Encadreur
BOUBEKEUR TOUFIK	Professeur	Université de Tissemsilt	Co-encadrant
DAHMANE MOULOUD	MCA	Ecole nationale supérieure d'hydraulique, Blida	Invité

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

Avant tout, je rends grâce à « الله », qui a illuminé mon chemin et m'a armé de courage pour accomplir mes études.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à **Mr SALHI MOHAMED**, Professeur à l'Université de Relizane pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa totale disponibilité.

Je remercie également le professeur **Boubekeur Toufik**, de l'Université de Tissemsilt, pour son soutien constant et ses précieux conseils.

J'exprime mes vifs remerciements à Mr : **Hadj Mostefa Adda**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui formuler ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux **Dr Benyahia Amar**, **Dr Ouedah Chaib** ainsi que **Dr Djeffal Houcine** pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Au cours de mes travaux de recherche, j'ai eu l'opportunité de bénéficier d'un grand soutien de **Dr DAHMANE MOULOUD** maître de conférences à l'université de blida . Je tiens à le remercier vivement pour ses conseils et pour tout le temps qu'il m'a consacré. Mes remerciements s'adressent à **Monsieur Boussad Abbes** et madame **Florica Lazar**: Professeurs à l'Université de Reims Champagne -Ardenne, **MATIM**, Reims, France, avec qui j'ai travaillé sur l'analyse MEB et DRX.

Mes remerciements s'étendent également à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, ainsi qu'aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux deux étudiants PFE Mr : Bendjebar AEK et Mr : WALI Mohamed pour leur travail acharné et leur aide tout au long de mes expériences en laboratoire. Et je n'oublie pas le corps ingénieurs de laboratoires et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ma thèse.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail À mes **chers parents**,

Mon mari **Zemri Mustapha**, Mes **chers frères** et ma **sœur Asma** ,

Et mes quatre fils

Bahae , Taqui Eddine, Younes , moncif .

Résumé

Le béton compacté au rouleau (BCR) présente des performances prometteuses pour les infrastructures routières, mais son utilisation reste limitée en Algérie. Cette étude propose une approche innovante consistant à développer un béton compacté au rouleau à partir de matériaux locaux, en substituant une partie des granulats traditionnels par des déchets de béton bitumineux recyclés. Le double objectif est de promouvoir l'utilisation du BCR comme matériau de revêtement durable, tout en valorisant les déchets de construction afin de réduire les coûts et l'impact environnemental. Nous avons analysé les propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques de ces mélanges de béton sous des températures élevées, en mettant un accent particulier sur leur durabilité dans des conditions sévères (telles que l'exposition à l'acide sulfurique, la perméabilité). Ces essais sont déterminants, car ce béton peut être utilisé à proximité des réseaux d'assainissement, où les transferts d'eau et la corrosion chimique constituent des défis majeurs.

Une modélisation tridimensionnelle d'un revêtement en béton de ciment rigide à l'aide du logiciel ANSYS 16.0, en introduisant la loi de comportement du béton correspondante dans le code. Cette modélisation a été réalisée pour plusieurs cas de chargement sur des dalles en béton de ciment.

Mots-clés : Béton compacté au rouleau, béton bitumineux, durabilité, perméabilité.

Abstract

Roller-compacted concrete (RCC) shows promising performance for road infrastructure, yet its use remains limited in Algeria. This study presents an innovative approach consisting of developing roller-compacted concrete using local materials, where part of the conventional aggregates is replaced by recycled asphalt concrete waste. The dual objective is to promote the use of RCC as a sustainable paving material, while simultaneously valorizing construction waste in order to reduce costs and environmental impact. We analyzed the physical, mechanical, and hydraulic properties of these concrete mixtures under high temperatures, with particular focus on their durability under severe conditions (such as exposure to sulfuric acid, permeability). These tests are critical, as this concrete may be used in proximity to sewage networks, where water transfers and chemical corrosion represent major challenges.

Three-dimensional modeling of a rigid cement concrete pavement using ANSYS 16.0 software, by incorporating the corresponding concrete behavior law into the code. This modeling was carried out for several loading cases on cement concrete slabs.

Keywords: Roller-compacted concrete (BCR), recycled asphalt pavement (DBB), durability, permeability.

ملخص

تظهر الخرسانة المضغوطة أداءً واعدًا لبنية الطرق التحتية، إلا أن استخدامها لا يزال محدودًا في الجزائر. تقدم هذه الدراسة نهجًا مبتكرًا يتمثل في تطوير خرسانة مضغوطة باستخدام مواد محلية، حيث يتم استبدال جزء من الركام التقليدي بنفايات الخرسانة الإسفلتية المعاد تدويرها. الهدف المزدوج هو تعزيز استخدام الخرسانة المضغوطة كمادة رصف مستدامة، وفي نفس الوقت إعادة استخدام نفايات البناء لتقليل التكاليف والأثر البيئي. لقد قمنا بتحليل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والهيدروليكية لهذه الخلطات الخرسانية تحت درجات حرارة عالية، مع تركيز خاص على متانتها في الظروف القاسية (مثل التعرض لحامض الكبريتيك، النفاذية). تُعد هذه الاختبارات حاسمة، حيث يمكن استخدام هذه الخرسانة بالقرب من شبكات الصرف الصحي، حيث تشكل انتقالات المياه والتآكل الكيميائي تحديات كبيرة. نمذجة ثلاثية الأبعاد لرصف خرساني صلب باستخدام برنامج ANSYS 16.0، وذلك بإدخال قانون سلوك الخرسانة المقابل في الكود. أُجريت هذه النمذجة لعدة حالات تحميل على بلاطات خرسانية خرسانية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المضغوطة، الخرسانة الإسفلتية، المتانة، النفاذية.

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale 1

CHAPITRE 1 : Le Béton Compacté Au Rouleau (BCR)

1.1 Introduction	3
1.2 Définition du BCR	3
1.3 Historique	5
1.4 Les composants du BCR	7
1.4.1 Le liant	7
1.4.1.1 Le ciment Portland.....	7
1.4.1.2 Les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre	7
1.4.2 Granulats.....	7
1.4.3 Eau de gâchage.....	8
1.4.4 Adjuvants.....	8
1.4.4.1 Les agents retardateurs de prise.....	8
1.5 Méthodes de formulation	9
1.5.1 Méthodes empiriques	9
1.5.2 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	9
1.5.3 Méthode de formulation basée sur le compactage des sols	10
1.6 Production et mise en place.....	11
1.7 Compactage du BCR.....	14
1.7.1 Équipements et Séquence de Compactage Standard.....	14
1.8 Cure du BCR	16
1.9 L'exécution des joints.....	16
1.10 Domaines d'utilisation du BCR	17
1.10.1 Le BCR dans la conception des barrages	19
1.10.2 BCR pour pavages.....	20

1.11 Essais sur BCR frais.....	22
1.11.1 Échantillonnage.....	22
1.11.2 Test Vébé.....	23
1.11.3 Test de compactage Proctor modifié.....	25
1.11.4 Masse volumique.....	26
1.11.5 Teneur en air.....	27
1.11.6 Ségrégation.....	27
1.12 Essais sur BCR durci.....	28
1.12.1 État de la surface.....	28
1.12.2 Propriétés mécaniques.....	28
1.12.2.1 Résistances à la compression.....	29
1.12.2.2 Résistance à la traction.....	29
1.12.2.3 Résistance à la flexion.....	31
1.12.2.4 Écaillage.....	32
1.12.2.5 Comportements à la fatigue du BCR.....	32
1.12.2.6 Durabilité du BCR.....	33
1.12.2.7 Module de Young.....	36
1.12.2.8 La perméabilité.....	36
1.13 Avantages et Inconvénients du BCR.....	36
1.13.1 Les avantages du BCR.....	36
1.13.2 Les inconvénients du BCR.....	37
Conclusion.....	38

Chapitre 2 — Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

Introduction.....	41
Partie A — Dégradations des Chaussées Bitumineuses.....	41
2.1 Structure de chaussée et rôle des matériaux dans la durabilité.....	41
2.2 Sollicitations mécaniques induites par le trafic lourd.....	42
2.2.1 Impact des charges lourdes.....	42
2.2.2 Principales pathologies mécaniques.....	43
2.3 Facteurs environnementaux et climatiques de dégradation.....	47
2.3.1 Effet des cycles thermiques sur le comportement du bitume.....	47
2.3.2 Rôle de l'eau dans la dégradation des chaussées.....	47
2.3.3 Vieillessement oxydatif du bitume.....	48

2.4	Attaques chimiques en milieu routier	48
2.5	État du réseau routier algérien et justification du BCR.....	48
2.5.1	Ampleur de la dégradation	48
2.5.2	Avantages comparatifs du BCR.....	49
Partie B — Les Déchets de Béton Bitumineux (DBB).....		49
2.6	Définition et origine du DBB	49
2.6.1	Définition générale.....	49
2.6.2	La réalité du DBB en Algérie	49
2.6.3	Flux des déchets routiers en Algérie	50
2.7	Propriétés essentielles du DBB.....	51
2.8	Valorisation des déchets DBB en Algérie : état des lieux et potentiel	52
Conclusion.....		53

Chapitre 3 — Caractéristiques du DBB et Classification

Introduction		53
3.1	Types de DBB et Propriétés Physiques.....	57
3.2	Propriétés Physiques Comparatives	58
3.3	Facteurs Influençant la Qualité du DBB	58
3.4	Effets du DBB sur les Propriétés du BCR à l'État Frais	58
3.4.1	Teneur en Eau Optimale (OMC).....	59
3.4.2	Densité sèche maximale	59
3.4.3	Temps Vébé	59
3.5	Impact sur les Propriétés Mécaniques	60
3.5.1	Résistance à la compression	60
3.5.2	Résistance à la traction	61
3.5.3	Résistance à la flexion	62
3.6	Autres Propriétés Mécaniques	62
3.6.1	Résistance à la traction par fendage	62
3.6.2	Ténacité	63
3.6.3	Module d'élasticité.....	63
3.6.4	Résistance à l'abrasion	64
3.7	Propriétés de durabilité.....	64
3.7.1	Porosité et absorption d'eau.....	64
3.7.2	Sorptivité	65
3.7.3	Réaction alcali-silice (RAS)	65

3.7.3.1 Influences sur la résistance et la durabilité des BCR intégrant des granulats alternatifs.....	65
3.7.4 Analyse microstructurale et mécanismes	67
3.7.4.1 Zone de transition interfaciale (ITZ).....	67
3.8 Stratégies d’optimisation.....	68
3.8.1 Prétraitements du DBB.....	68
3.8.1.1 Vieillissement accéléré.....	68
3.8.1.2 Lavage et nettoyage.....	69
3.9 Bénéfices environnementaux et économiques.....	69
3.9.1 Impact environnemental	69
3.9.2 Gains économiques	69
Conclusion.....	70

Chapitre 4 — Matériaux et Méthodes Expérimentales

Introduction	71
4.1 Caractéristiques et préparation des matériaux	71
4.1.1 Ciment	71
4.1.1.1 Calcul de la masse volumique absolue du ciment.....	72
4.1.2 Granulats.....	73
4.1.2.1 Sable	73
4.1.2.2 Gravier naturel	73
4.1.2.3 Gravier DBB	75
4.1.2.4 Teneur en bitume des granulats DBB.....	76
4.1.3 Eau de gâchage	79
4.2 Formulation du béton compacté au rouleau (BCR)	79
4.2.1 La formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse	80
4.3 Méthode de compactage du BCR en laboratoire	80
4.3.1 Essai Proctor Modifié (NF P 94-093)	80
4.3.1.2 Détermination de l’optimum Proctor	81
4.4 Étapes de confection du béton	83
4.4.1 Procédure expérimentale	84
4.4.1.1 Séquence de malaxage.....	84
4.4.2 Procédures des essais à l’état frais	85
4.4.2.1 Maniabilité (temps Vébé)	85
4.4.2.3 Programme de préparation des éprouvettes.....	85

4.5	Tests non destructifs.....	87
4.5.1	Ultrason (UPV).....	87
4.5.2	Essai au scléromètre.....	87
4.6	Tests destructifs.....	88
4.6.1	Essai de compression.....	88
4.6.2	Résistance à la traction par flexion.....	89
4.6.3	Analyse des essais de flexion par fendage.....	90
4.6.4	Essais d'abrasion.....	90
4.7	Essais de durabilité.....	91
4.7.1	Absorption capillaire.....	91
4.7.2	Essai de porosité.....	92
4.8	Attaque acide et sulfatique.....	93
4.8.1	Attaque acide.....	93
4.8.2	Attaque sulfatique : Na ₂ SO ₄ – MgSO ₄	93
4.8.3	Analyse microstructurale par MEB et DRX.....	94
	Conclusion.....	97

Chapitre 5 — Résultats et Discussion

	Introduction.....	98
5.1	Résultats à l'état frais.....	98
5.1.1	Formulation du BCR.....	98
5.1.1.1	Formulation par essai Proctor.....	98
5.1.1.2	Temps Vébé.....	99
5.1.1.3	Masse volumique à l'état frais.....	100
5.1.1.4	Air occlus.....	100
5.1.2	Résultats à l'état durci.....	101
5.1.2.1	Essais non destructifs.....	101
5.2.2	Essais destructifs.....	104
5.2.3	Essais de durabilité.....	111
5.1.3	Corrélations entre propriétés.....	117
5.4	Attaques acide et sulfatique.....	121
5.5	Microstructure des BCR préservée dans les solutions d'attaque.....	128
5.6	Diffraction des rayons X (DRX).....	128
5.7	Prédiction de la résistance à la compression basée sur la perte de masse.....	131
5.8	Comparaison et validation de l'équation proposée.....	133

Conclusions	135
Chapitre 6 — Modélisation et Conception Structurale des Chaussées en BCR	
Introduction	137
6.1 Conception structurale des chaussées en BCR	138
6.2 Approches bidimensionnelles pour l'analyse des contraintes	139
6.2.1 Approche de Westergaard (1926)	139
6.2.2 Méthode de Hogg.....	140
6.2.3 Formulation multicouche de Burmister.....	141
6.2.4 Solution de Peltier et Jeuffroy	142
6.3. Modélisation de l'interface pneumatique-chaussée.....	143
6.3.1. Représentation de la zone de contact	143
6.4 Application des formules de solutions exactes.....	144
6.4.1 Chargement d'un coin	144
6.4.1.1 Formule de Goldbeck et Older.....	144
6.4.1.2 Principe de Westergaard pour chargement en coin.....	144
6.4.1.3 Formule d'Ioannides et al. (1985).....	145
6.4.2 Chargement intérieur.....	145
6.4.2.1 Formule de Westergaard pour chargement central	145
6.4.2.2 Procédure Portland Cement Association (PCA)	146
6.4.3 Chargement au bord de dalle	146
6.4.3.1 Formule de Westergaard corrigée	146
6.4.3.2 Formule du logiciel ALIZE	147
6.5 Application de la méthode des courbes d'influence	147
6.6 Application de la méthode de Dantu.....	148
6.6.1 Dalle chargée au centre	148
6.6.2 Charge placée sur le bord libre	149
6.6.3 Dalle chargée en coin	149
6.7 Modélisation numérique tridimensionnelle.....	149
6.7.1 Fondements de l'approche numérique	149
6.7.2 Architecture du modèle discret.....	150
6.7.3 Formulation mathématique.....	150
6.7.4 Description du modèle tridimensionnel	150
6.7.4.1 Géométrie et matériaux	150
6.7.4.2 Données du modèle	151

6.7.4.3	Conditions d'interface	151
6.7.5	Les différents cas de chargements	152
6.7.5.2	Une seule roue.....	152
6.7.5.3	Deux essieux	153
6.7.5.4	Trois essieux	153
6.8	Outils logiciels de simulation	154
6.8.2	Principe général de la méthode des éléments finis	154
6.8.3	Présentation du logiciel ANSYS.....	155
6.8.4	Processus de modélisation adopté.....	155
6.8.4.1	Définition géométrique.....	155
6.8.4.2	Discrétisation et maillage	156
6.8.4.3	Propriétés matérielles	156
6.8.4.4	Conditions aux limites.....	157
6.8.5	Résolution numérique	158
6.8.6	Post-traitement et analyse des résultats.....	158
6.9	Modélisation numérique par éléments finis (ANSYS)	158
6.9.1	Paramètres du modèle	159
6.10	Validation de la modélisation numérique.....	163
6.10.1	Résultats analytiques et numériques des contraintes du BCR	163
	Conclusion.....	193
	Conclusion générale.....	170

Perspectives

Références

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Barrage en BCR de Koudiat Acerdoune wilaya de Bouira en Algérie.....	6
Figure 1.2. Paramètres optimum d'un mortier pour BCR.....	10
Figure 1.3. Production, de déchargement, de mise en place et de compactage du BCR.....	12
Figure 1.4. Séquence visuelle des opérations qui concluent un projet de chaussée en BCR.....	12
Figure 1.5. Schéma d'une centrale mobile (Association Canadienne, 2001).....	13
Figure 1.6. Photographie d'une centrale mobile	13
Figure 1.7. Rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses	15
Figure 1.8. les changements de direction de rouleau compacteur tandem à cylindres	15
Figure 1.9. Jauge nucléaire pour mesurer le degré de compactage d'une chaussée en BCR	16
Figure 1.10. (a) Cure du béton par arrosages ciblés ; (b) Bâche de protection contre la pluie	16
Figure 1.11. Exécution de joints par sciage après mise en place du BCR - aire industriel - Montréal.....	17
Figure 1.12. Les techniques de réalisation utilisées dans la construction de barrages en BCR	18
Figure 1.13. Barrage BCR par pays (%)	20
Figure 1.14. Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA.....	21
Figure 1.15. Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB.....	22
Figure 1.16. Test de consistance Vébé avec un anneau de mortier sur l'échantillon consolidé....	23
Figure 1.17. La mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais, en laboratoire et en chantier.....	27
Figure 1.18. L'aréomètre-pressio-métrique	27
Figure 1.19. L'état de surface d'un pavage en BCR (a) sans ségrégation, (b) avec ségrégation ...	29
Figure 1.20. Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction	31
Figure 1.21. Propagation des fissures lors de l'essai de traction par fendage sur cylindre de BCR.	31
Figure 1.22. Courbe d'égales résistances du BCR	33
Figure 1.23. Moule et charge conçu pour la confection des éprouvettes prismatiques (7×7×28) de BCR et mode de rupture des éprouvettes prismatiques de BCR en flexion	32
Figure 1.24. Courbe de fatigue du BCR et du BC	33
Figure 1.25. La différence de la distance d'arrêt pour une chaussée en BB et une en BCR.....	34
Figure 2.1 Composition structurelle d'une chaussée bitumineuse — couches et rôles.....	40
Figure 2.2 Sollicitations mécaniques induites par le trafic dans la structure de chaussée.....	41
Figure 2.3 Types de dégradations observées sur les chaussées bitumineuses algériennes	45
Figure 2.4 Domaines de comportement des enrobés bitumineux en fonction de la température	

et de la fréquence de chargement.....	46
Figure 2.5 Stockage des déchets de béton bitumineux (DBB) sur chantier.....	49
Figure 2.6 Travaux de fraisage sur la RN5 : Bouira	49
Figure 2.7 Flux des déchets inertes en Algérie — place des matériaux bitumineux recyclables	50
Figure 2.8 Composition des déchets de matériaux de construction (DMA).....	50
Figure 2.9 Granulats DBB : (a) à l'état de livraison ; (b) après séchage et lavage	51
Figure 3.1 Différents types d'agrégats DBB utilisés pour produire des mélanges BCR.....	57
Figure 3.2 Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion	61
Figure 3.3 Résistance à la traction indirecte.....	62
Figure 3.4 Module d'élasticité.....	63
Figure 3.5 Représentation schématique des facteurs affectant la résistance et la durabilité des granulats recyclés	66
Figure 3.6 Micro-graphies MEB : (A) ITZ recouverte d'asphalte ; (B) ITZ normale dans le mélange 50 % DBB	70
Figure 3.7 Représentation schématique de l'affinité de liaison dans le BCR avec granulats naturels et DBB	67
Figure 3.8 Représentation schématique des deux types d'ITZ dans le BCR 50 % de DBB.....	67
Figure 3.9 Courbe charge-déformation typique et mécanisme de propagation des fissures dans le BCR + DBB	68
Figure 4.1 Ciment Chamil éco planète.....	71
Figure 4.2 Densimètre Le Chatelier	72
Figure 4.3 Sable naturel (0/4)	73
Figure 4.4 Tamiseuse	73
Figure 4.5 Équivalent de sable.....	74
Figure 4.6 Graviers naturels : (a) classe 3/8 ; (b) classe 8/15	75
Figure 4.7 Graviers DBB : (c) classe 3/8 ; (d) classe 8/15	76
Figure 4.8 Méthode de dissolution dans l'acide chlorhydrique	76
Figure 4.9 Teneur en bitume des granulats de DBB	76
Figure 4.10 Courbe granulométrique	79
Figure 4.11 Essai Proctor Modifié	81
Figure 4.12 Malaxeur à béton à axe horizontal.....	84
Figure 4.13 Masse volumique BCR.....	84
Figure 4.15 Air-mètre à pression d'air — essai de l'air occlus	85
Figure 4.16 Marteau vibrant HILTI.....	86
Figure 4.17 Étapes de réalisation du BCR au laboratoire.....	86

Figure 4.18	Mesure de l'UPV des BCR.....	87
Figure 4.19	Essai au scléromètre	88
Figure 4.20	Essai de compression.....	88
Figure 4.21	Essai de flexion	89
Figure 4.22	Essais de flexion par fendage (essai brésilien) sur cylindres de BCR (16 × 32 cm ²)	90
Figure 4.23	Coloration pour différencier les éprouvettes avant l'essai	90
Figure 4.24	Format des éprouvettes avant et après l'essai	92
Figure 4.25	Dispositif de mesure de l'absorption capillaire.....	92
Figure 4.26	Pesée hydrostatique des BCR.....	93
Figure 4.27	Conservation des éprouvettes de BCR dans les milieux d'attaque.....	94
Figure 4.28	Microscope électronique à balayage (MEB).....	95
Figure 4.29	Préparation d'un échantillon pour l'essai DRX	95
	Organigramme	96
Figure 5.1	Densité sèche en fonction de la teneur en eau W	98
Figure 5.2	: Temps vébé.....	100
Figure 5.3	Masse volumique apparente du BCR	100
Figure 5.4	Teneur en air des BCR testés	101
Figure 5.5	Vitesse ultrasonique (UPV)	102
Figure 5.6	Indice de rebondissement	103
Figure 5.7	Résistance à la compression.....	105
Figure 5.8	Résistance à la flexion	106
Figure 5.9	Résistance à la traction par fendage (essai brésilien)	110
Figure 5.10	Module d'élasticité dynamique des BCR en fonction de la température.....	110
Figure 5.11	Perte en masse (%) — essai d'abrasion	111
Figure 5.12	Sorptivité des BCR en fonction de la température de cure	112
Figure 5.13	Porosité totale.....	115
Figure 5.14	Absorption d'eau	117
Figure 5.15	Relation entre le temps Vébé et l'air occlus.....	119
Figure 5.16	Corrélation linéaire entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression du BCR.....	119
Figure 5.17	Corrélation entre la vitesse du son et la résistance à la compression du BCR	119
Figure 5.18	Corrélation entre la porosité et l'absorption.....	120
Figure 5.19	Perte de masse du BCR immergé dans du MgSO ₄ et du Na ₂ SO ₄	122
Figure 5.20	Comparaison des pertes de poids mesurées et calculées — solutions H ₂ SO ₄ et HCl123	
Figure 5.21	Etats des éprouvettes dans les milieux agressifs après 28 jours	125
Figure 5.22	Microstructure des BCR conservés dans des solutions acides et sulfatées	126

Figure 5.23 BCR50 — $MgSO_4$	127
Figure 5.24 BCR50 — HCl	130
Figure 5.25 BCR50 — H_2SO_4	131
Figure 5.26 BCR50 — Eau	132
Figure 5.27 BCR50 — Na_2SO_4	135
Figure 5.28 Comparaison de la résistance à la compression mesurée et calculée pour le béton immergé dans différents types de solutions	135
Figure 6.1 Principe de composition d'une chaussée rigide en BCR	138
Figure 6.2 Modèle de Westergaard	139
Figure 6.3 Modèle de Hogg	141
Figure 6.4 Modèle multicouche de Burmister	142
Figure 6.5 Modèle de Peltier et Jeuffroy	143
Figure 6.6 Surface de contact d'après Portland Cement Association (PCA)	144
Figure 6.7 Dalle supportant le chargement en coin	151
Figure 6.8 Modèle adopté — vue en plan (dalle 5 m × 7 m)	151
Figure 6.9 Modèle d'un camion	151
Figure 6.10 Schémas des quatre cas de chargement étudiés	153
Figure 6.11 Deux essieux au centre d'une dalle — vue en plan	153
Figure 6.12 Trois essieux sur une dalle — vue en plan (espacement 1,5 m et 6 m ; dalles 7 m × 5 m)	153
Figure 6.13 Modèle numérique tridimensionnel intégrant les configurations d'essieux et le raffinement du maillage	156
Figure 6.14 Configuration d'une pression sur l'empreinte du pneumatique	157
Figure 6.15 Organigramme du processus de modélisation sous ANSYS	160
Figure 6.16 Dalle en béton compacté au rouleau (BCR)	161
Figure 6.17 Maillage d'une dalle en béton compacté au rouleau (BCR)	162
Figure 6.18 Conditions aux limites et chargement	164
Figure 6.19 Contrainte de von Mises (MPa)	166
Figure 6.20 Contrainte normale (MPa)	168
Figure 6.21 Déplacement total (MPa)	169

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Comparaison du BCR avec le béton conventionnel	4
Tableau 1.2 : Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage	19
Tableau 1.3 : Classe de consistance de bétons en fonction du temps VEBE	24
Tableau 1.4 : Valeurs de l'Optimum Proctor modifié et des masses volumiques l'état humides et à l'état sec pour différents mélanges de BCR.....	26
Tableau 1.5 : Différence entre un BCR et un béton conventionnel (CANADIAN ASSOCIATION OF CEMENT 2005)	29
Tableau 1.6 : Liste de quelques substances pouvant provoquer de graves attaques chimiques au béton	35
Tableau 2.1 Principales pathologies mécaniques des chaussées bitumineuses	42
Tableau 2.2 Comparaison BCR / enrobé bitumineux pour les conditions de l'Algérie occidentale.....	48
Tableau 3.1 Synthèse critique de la littérature	53
Tableau 3.2 Compacité et résistance à la compression du BCR.....	60
Tableau 4.1 Analyses physiques et mécaniques du ciment.....	72
Tableau 4.2 Analyse granulométrique du sable.....	74
Tableau 4.3 Analyse granulométrique du gravier 3/8N	75
Tableau 4.4 Analyse granulométrique du gravier 8/15N	75
Tableau 4.5 Teneur en bitume attaché des granulats DBB	77
Tableau 4.6 Analyse granulométrique du gravier 3/8 DBB	78
Tableau 4.7 Analyse granulométrique du gravier 8/15 DBB	78
Tableau 4.8 Masse volumique des granulats.....	79
Tableau 4.9 Calcul des poids en fonction de la quantité d'eau (4 %, 6 %, 8 %, 10 %) ..	83
Tableau 4.10 Densité humide γ_h (kg/m ³).....	83
Tableau 4.11 Densité sèche γ_d (kg/m ³).....	83
Tableau 5.1 Essai Proctor modifié.....	98
Tableau 5.2 Teneur en eau optimale de chaque type de BCR	98
Tableau 5.3 Valeurs des paramètres de l'équation (5.6) pour différentes solutions	133

Tableau 5.4 Comparaison de Sc mesuré et calculé par l'équation (5.6)	135
Tableau 6.1 Contraintes et déflexions au coin selon module de fondation	145
Tableau 6.2 Contraintes et déflexions au coin (Ioannides et al.)	146
Tableau 6.3 Contraintes et déflexions au centre (Westergaard)	147
Tableau 6.4 Contraintes au centre (Méthode PCA)	148
Tableau 6.5 Contraintes et déflexions au bord (Westergaard-Ioannides)	149
Tableau 6.6 Contraintes au bord (Méthode ALIZE)	152
Tableau 6.7 Résultats par méthode des courbes d'influence	155
Tableau 6.8 Contraintes au centre (Méthode Dantu)	155
Tableau 6.9 Contraintes au bord (Méthode Dantu)	156
Tableau 6.10 Contraintes au coin (Méthode Dantu)	156
Tableau 6.11 Différents types d'essieu	159
Tableau 6.12 Propriétés mécaniques et physiques du BCR — 20 °C	162
Tableau 6.13 Propriétés mécaniques et physiques du BCR — 40 °C	163
Tableau 6.14 Propriétés mécaniques et physiques du BCR — 60 °C	163
Tableau 6.15 Résultats des contraintes — BCR0, 65 kN, 28 jours	164
Tableau 6.16 Résultats des contraintes — BCR0, 65 kN, 07 jours	165
Tableau 6.17 Résultats des contraintes — BCR25, 65 kN, 28 jours	165
Tableau 6.18 Résultats des contraintes — BCR25, 65 kN, 07 jours	166
Tableau 6.19 Résultats des contraintes — BCR50, 65 kN, 28 jours	167
Tableau 6.20 Résultats des contraintes — BCR50, 65 kN, 07 jours	167
Tableau 6.21 Résultats des contraintes — BCR75, 65 kN, 28 jours	167
Tableau 6.22 Résultats des contraintes — BCR75, 65 kN, 07 jours	167

Notations

BCR	<i>Le béton compacté au rouleau ;</i>
DBB	<i>dechèt de Béton bitumineux ;</i>
RAP	<i>(Reclaimed Asphalt Pavement) ;</i>
ASTM	<i>Normes Américaines ;</i>
γ_h	<i>La masse volumique humide ;</i>
γ_d	<i>La masse volumique sèche ;</i>
W	<i>La teneur en eau ;</i>
ACI	<i>American Concrete Institute ;</i>
d	<i>Grosseur nominale des granulats (mm);</i>
D	<i>Grosseur maximale des tamis (mm);</i>
E/L	<i>Le rapport eau / liant</i>
C	<i>la compacité du mélange granulaire ;</i>
m	<i>La masse du matériau en kg ;</i>
V	<i>Le volume en m³</i>
ρ	<i>La masse volumique en kg/m³ ;</i>
R_c	<i>Résistance à la compression (MPa) ;</i>
R_t	<i>résistance à la traction (MPa)</i>
R_f	<i>la résistance à la flexion du BCR à 28 jours</i>
E	<i>Module d'Young (MPa) ;</i>
σ	<i>Contrainte (MPa) ;</i>
ε	<i>: Déformation (mm/mm) ;</i>
Ca(OH)₂	<i>La chaux hydratée ;</i>
NF	<i>: Normes françaises ;</i>
AFNOR	<i>L'association française de</i>
γ_{app}	<i>masse volumique apparente ;</i>
I	<i>indice sclérométrique</i>
UPV	<i>vitesse de propagation de l'onde (m/s) ;</i>
MEB	<i>Microscope à balayage électronique</i>
GB	<i>Graves bitumes ;</i>
MF	<i>Module de finesse</i>
OMC	<i>Teneur en eau optimal</i>
MDD	<i>Densité sèche</i>



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La détérioration accélérée des routes bitumineuses en Algérie résulte de multiples facteurs interdépendants. Le trafic intense, les conditions météorologiques extrêmes et l'usure naturelle constituent les principales causes de dégradation. Les variations thermiques importantes fragilisent particulièrement ces revêtements, tandis que des méthodes de construction et d'entretien inadéquates accélèrent leur déclin. Le processus de fraisage des anciennes couches génère d'importants volumes de déchets bitumineux, créant une problématique environnementale majeure.

Le secteur des matériaux de construction algérien occupe une position stratégique dans l'économie nationale, s'appuyant sur des ressources diversifiées incluant le ciment, le béton, l'acier et le bois. L'Algérie bénéficie d'un avantage concurrentiel grâce à ses vastes réserves de calcaire, favorisant la production cimentière. Cependant, la production d'asphalte demeure tributaire des fluctuations des cours pétroliers mondiaux et des coûts d'extraction, créant une instabilité économique.

Le gouvernement algérien promeut activement les investissements pour répondre à la demande croissante liée au développement infrastructurel, encourageant l'adoption de pratiques durables. Néanmoins, le secteur reste confronté aux défis de la dépendance aux importations et de la volatilité des prix des matières premières.

Le système de transport algérien, élément vital de l'économie nationale, nécessite une modernisation urgente pour assurer la connectivité interrégionale. L'exploitation intensive du réseau routier peut être maîtrisée par des politiques d'utilisation durable des ressources et une planification urbaine optimisée.

Depuis 2005, l'Algérie a introduit la technique de fraisage-recyclage des enrobés bitumineux, marquant une transition progressive vers des solutions plus écologiques. Le passage du béton bitumineux traditionnel au béton compacté au rouleau (BCR) s'impose comme une alternative durable, motivée par ses performances supérieures et son caractère respectueux de l'environnement.

Le réseau routier algérien souffre d'une dégradation accélérée due au trafic, aux variations thermiques et au manque de matériaux locaux de qualité, tandis que le fraisage des chaussées génère d'importants volumes de déchets d'enrobés (DBB) peu valorisés. Ce travail vise à

évaluer l'effet de la substitution des granulats naturels par des DBB (0 à 100 %) sur les performances mécaniques, la durabilité et le comportement structural du béton compacté au rouleau (BCR). Les objectifs couvrent la formulation, la caractérisation physico-mécanique, les attaques chimiques, ainsi que la modélisation numérique 3D sous ANSYS 16.0. L'hypothèse centrale est qu'un taux de substitution de 50 % permet de maintenir des performances compatibles avec les exigences routières, tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental.

La recherche s'articule autour de six chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre : présente une étude bibliographique exhaustive sur l'état de l'art du BCR, incluant son historique, sa composition, les dosages utilisés, ainsi que ses domaines d'application mondiaux et les avantages de son utilisation.
- Le deuxième chapitre : montre les dégradations des routes et leurs causes et montre la caractérisation des déchets de béton bitumineux, détaillant leurs avantages et leurs propriétés essentielles pour la valorisation en génie civil.
- Le troisième chapitre : présente une Revue de la littérature sur les mélanges BCR contenant des granulats DBB.
- Le quatrième chapitre : expose l'identification des matériels et matériaux utilisés dans la préparation des mélanges et montre les différentes étapes de la formulation qui ont été développés, Il étudie également le comportement et les propriétés des mélanges.
- Le cinquième chapitre : analyse l'influence de l'incorporation de granulats issus de déchets bitumineux sur le comportement du BCR, évaluant les propriétés à l'état frais (masse volumique, air occlus, temps Vébé) et à l'état durci (résistances à la compression et à la flexion, perte de masse à l'abrasion). Une étude de durabilité complète cette analyse par l'évaluation de l'absorption totale, de la porosité et de la sorptivité.
- Le sixième chapitre porte sur la modélisation numérique tridimensionnelle d'une chaussée rigide en BCR avec les déchets DBB dans le code de calcul ANSYS 16.0 .

une conclusion générale à la fin de cette thèse.

Chapitre 1

Le Béton Compacté Au Rouleau (BCR)

Introduction

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) se distingue par sa fermeté considérable et son absence totale d'affaissement, le différenciant ainsi nettement du béton conventionnel.

Bien que composé des mêmes matériaux de base, le BCR se caractérise par une formulation spécifique et une méthode de mise en place distincte. Sa principale particularité réside dans son faible contenu en pâte liante, ce qui se traduit par une réduction significative de la quantité d'eau et de matériaux cimentaires. Grâce à une formulation soigneusement établie, le BCR peut atteindre rapidement des résistances mécaniques élevées. Par exemple, un mélange avec une proportion de liant d'environ 300 kg/m³ et un rapport eau/liant de 0,35 peut développer une résistance à la compression de 40 MPa [1,3] et une résistance à la flexion de 5,0 MPa après seulement 3 jours de durcissement. De plus, le BCR présente une bonne durabilité face aux conditions d'utilisation rigoureuses, notamment en ce qui concerne la résistance à la fatigue, aux chocs thermiques et à l'abrasion. La fabrication du BCR se fait au sein d'une usine mobile installée directement sur le chantier, ce qui réduit considérablement les émissions de polluants atmosphériques liées au transport des matériaux depuis une usine fixe jusqu'à la zone de pavage. De plus, la proximité entre l'usine mobile et la zone de mise en œuvre garantit une qualité optimale du mélange lors de sa pose.

Contrairement au béton conventionnel, qui peut être correctement compacté simplement par vibration grâce à la quantité adéquate de pâte, le BCR nécessite l'intervention de rouleaux compacteurs pour assurer un compactage efficace. Cette action externe permet de réduire au maximum la formation de vides dans le matériau [1].

1.2 Définition du BCR

Pour obtenir un béton avec des propriétés similaires au sol à l'état frais et avec les propriétés du béton ordinaire après quelques jours, on peut réduire la quantité de ciment et d'eau lors de la formulation, ce qui nous donnera comme résultat un béton sec sans affaissement, qui nécessite un compactage à l'aide d'engins de travaux publics pour assurer un bon serrage de ses granulats lors de sa mise en place tout comme un remblai. Avec cette définition, ce matériau prend son nom le béton compacté au rouleau BCR.

Le béton compacté au rouleau BCR nécessite l'application d'une force externe de compactage pour une consolidation efficace. Par rapport au béton frais, le mélange de BCR présente une proportion plus élevée de granulats et une moindre quantité de pâte. Non armé, ce type de béton ne requiert pas l'utilisation de coffrage lors de sa mise en place.

Le BCR se caractérise par une consistance moins malléable que le béton classique. Sur le plan structurel, un revêtement en BCR est considéré comme un ouvrage rigide, soumis aux mêmes normes de conception que toute autre dalle de béton. Le développement du BCR s'est orienté vers deux principaux domaines d'application : les structures de contrôle des eaux telles que les barrages et les ouvrages massifs, ainsi que les revêtements destinés aux pavages tels que les routes ou les dépôts de stockage. La comparaison entre le BCR et le béton conventionnel est donnée dans le tableau 1 [2].

Tableau 1.1 : Comparaison du BCR avec le béton conventionnel

Critères	Béton conventionnel	BCR
Cohérence	Test d'affaissement, test d'écoulement, etc.(aucun test Vébé n'est requis).	Déterminé par la méthode Vébé
Contenu en ciment	Déterminé en fonction de la demande en eau du système de granulats et du rapport eau/ciment	Généralement, comprend une faible teneur en ciment
Teneur en humidité	Déterminé par le rapport eau/ciment (% en poids)	Déterminé par la teneur en eau optimale (essai Proctor modifié)
Gradation globale	Relativement moins bien noté	Bien noté
Compactage	Des vibrateurs internes ou externes sont utilisés.	Rouleaux ou compacteurs
Force	Relativement faible	Relativement élevé
Rugosité de surface	Lisse	Rugueux et ondulé en raison du compactage au rouleau

Un mélange de BCR offre la capacité de développer rapidement des résistances mécaniques élevées et démontre une bonne durabilité, le rendant ainsi adapté aux charges très lourdes. Par exemple, un mélange de BCR présentant une teneur en liant d'environ 300 kg/m³ et un rapport eau/liant de 0,35 peut atteindre une résistance à la compression de 40 MPa et une résistance à la flexion de 5 MPa après seulement 3 jours de maturation [3]. Ces mélanges de BCR à haute performance se distinguent également par leur résistance aux conditions d'utilisation rigoureuses, incluant la fatigue, les chocs thermiques et l'abrasion. En plus de leur faible teneur en pâte, les mélanges de BCR se distinguent par leur résistance accrue à la fissuration induite par le retrait de séchage. L'observation du comportement des revêtements construits récemment indique généralement un espacement moyen des fissures supérieur à celui généralement constaté pour les bétons conventionnels.

1.3 Historique :

Les premières utilisations du BCR, sous forme de béton très maigre et compacté au rouleau, pour la construction de barrages remontent à 1960. Des chercheurs tels que Jouffroy et Sauterey [4] En 1924, la direction des Ponts et Chaussées du Pas-de-Calais a lancé un programme de transformation des empièvements et d'anciens pavages en béton, notamment sur la route nationale N° 43 entre Lillers et Chocques [4]. Ce succès initial a conduit à la réalisation de plusieurs autres projets dans le département du nord pour la construction de routes nationales et de voies départementales totalisant une longueur totale dépassant 100 kilomètres. Le processus impliquait la récupération des pavés pour la construction de bordures et de caniveaux afin de stabiliser la chaussée en béton. De plus, le sable provenant des anciennes chaussées pavées a été réutilisé comme couche de base.

Cette couche était d'abord étalée puis compactée, sur laquelle un béton relativement sec était mis en place et cylindré. Ce processus peut être considéré comme l'ancêtre du Béton Compacté. La chaussée ainsi construite se composait de deux couches distinctes : une couche inférieure constituée de matériaux roulés avec un faible dosage en ciment (250 kg/m³), tandis que la couche supérieure, plus mince et plus fortement dosée (400 kg/m³), était constituée de granulats durs concassés. Les deux couches étaient exécutées successivement sans interruption afin d'assurer une forte adhérence [4].

D'autres applications similaires ont été réalisées en Europe. Jeuffroy et Sauterey [4] ont noté que la Belgique avait commencé à construire des routes et des aires bétonnées sur les accès des mines à partir de 1912. De même, l'Allemagne a entrepris les premiers grands chantiers de construction d'autoroutes à chaussées rigides à partir de 1933.

Dans le continent américain, Anderson a établi un lien entre l'utilisation du BCR et les années 1930 [5] Aux États-Unis, la première chaussée rigide a été construite en 1893 à Belle fontaine (Ohio), selon Huang [6]. Suivie de la deuxième en 1908 à Michigan. Les statistiques de 2001 montrent que près de 95 000 km de routes aux États-Unis ont été construits en béton hydraulique [5].

Selon Gauthier et al [7] le premier revêtement en BCR en Amérique du Nord remonte à 1942, réalisé par le corps des ingénieurs de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers) lors de la construction d'une voie à Yakima.

Au Canada, Gauthier et Marchand ont précisé [7] que la première application du BCR remonte à 1976, avec la réalisation d'une aire de stockage de bois d'une superficie de 52 000 m² sur l'Île de Vancouver par la British Columbia Forest Company (BCFP).

En Afrique, le BCR demeure encore une technique relativement nouvelle, largement utilisée dans la construction des barrages mais peu répandue dans le domaine des routes [8].

En Algérie, bien que le BCR ne soit pas encore utilisé pour la construction des chaussées, il est employé dans la construction du barrage de Koudiat Acerdoune, un barrage de type poids arqué en béton compacté au rouleau BCR. Situé sur l'oued Isser à Maala dans la wilaya de Bouira, ce barrage, construit entre 2002 et 2008, mesure 121 mètres de haut, 425 mètres de longueur de crête et retient un volume d'eau de 640 millions de m³. Classé comme le deuxième plus grand barrage en Algérie après celui de Beni Haroun, ce projet, évalué à 242 millions d'euros, a été mis en service début 2009 [3].

Au Maroc, le BCR a été employé dès 1989 pour la construction du barrage d'El Koreima près de Rabat. Ce barrage, d'une hauteur de 26 mètres, a nécessité un volume de 25 000 m³. Il représente un exemple intéressant car le projet a été spécifiquement conçu dans une optique de petit barrage. L'approche adoptée, caractérisée par des moyens réduits en équipement et une main-d'œuvre abondante, est similaire aux méthodes de construction des barrages en maçonnerie, telles qu'observées dans les Monts Mandara au Nord du Cameroun. Une comparaison des coûts effectuée par les services hydrauliques marocains a démontré que l'utilisation du BCR a permis des économies d'environ 40 % par rapport à des ouvrages classiques en maçonnerie.

En Tunisie, le BCR est principalement utilisé dans la construction de barrages tels que le barrage d'Errmil à Bouarada, le barrage Fom Elkhanga à Tozeur, le barrage El Far à Hammamet et le barrage El Moula à Tabarka.



Figure 1.1 :Barrage en BCR de koudiat acerdoune wilaya de Bouira en Algérie

1.4 Les composants du BCR

Le BCR est composé d'un mélange de liant (ciment et eau), de granulats (gravier et sable), ainsi que d'éventuels adjuvants additionnels [8].

1.4.1 Le liant

L'utilisation du liant répond à diverses exigences, notamment la résistance mécanique, les critères de durabilité requis et les contraintes économiques telles que la disponibilité et le coût des ajouts, ainsi que le coût du transport. Le liant utilisé est de type hydraulique, fin et pulvérulent, et peut être :

1.4.1.1 Le ciment Portland : CPA-CEM J, CPI-CEM II, dont la classe varie en fonction des performances souhaitées.

1.4.1.2 Les ciments à forte teneur en laitier ou en cendre : CHF-CEM III, CLK-CEM III, CPZ-CEM IV, CLC-CEM V. Ces ciments ont un début de prise plus lent et un durcissement plus progressif, ce qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques du BCR. Le dosage typique d'un mélange de BCR varie de 200 à 350 kg/m³, ce qui correspond à une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs. Il convient de noter qu'une teneur en ciment excessive peut favoriser l'apparition de fissures, accroître les coûts de production et ne garantir aucune amélioration significative des performances [8].

1.4.2 Granulats

Les granulats constituent entre 75 et 85 % du volume total d'un mélange de BCR, jouant ainsi un rôle fondamental dans les propriétés du matériau à l'état frais et durci, grâce à leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

Ces granulats peuvent être de deux natures : roulés, tels que le sable siliceux, ou concassés, comprenant le sable calcaire, le gravier, la grave, etc.

Afin de minimiser les risques de ségrégation et de garantir une surface de qualité, le diamètre maximal du granulats, désigné par D, doit être inférieur à 20 mm. De plus, le spectre granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions, par exemple : 0/3 - 3/8 - 8/16. Toutes les fractions granulométriques doivent présenter un indice de concassage supérieur à 30 % pour un trafic faible et environ 100 % pour un trafic élevé. De plus, ces granulats doivent afficher un indice de plasticité non mesurable et une teneur en matière organique inférieure à 0,2 %. Le choix d'un diamètre élevé présente divers avantages, notamment une efficacité énergétique accrue lors de la préparation des matériaux, une résistance mécanique supérieure à dosage de liant constant et une amélioration du transfert de charges aux joints, sans recours à des dispositifs spécifiques.

Concernant les granulats fins, ils favorisent une bonne cohésion à l'état frais, favorisant ainsi une meilleure compacité à l'état durci. Toutefois, une proportion élevée de fines peut entraîner une demande en eau importante, induisant ainsi une baisse de la résistance et des difficultés lors de la mise en place. Pour pallier ces défis, l'incorporation d'ajouts cimentaires tels que les cendres volantes, les filers calcaires ou la fumée de silice permet de réduire la chaleur d'hydratation, limitant ainsi la formation de fissures, tout en offrant des avantages économiques et parfois une amélioration des performances globales du BCR.

1.4.3 Eau de gâchage

Le BCR, étant un béton à affaissement nul, requiert une faible teneur en eau. Habituellement, celle-ci se situe entre 4 et 6 %, établie par le laboratoire lors de l'essai Proctor modifié. Cependant, sur le chantier, il est crucial de considérer les conditions météorologiques et de transport. L'eau utilisée doit être de qualité potable, avec une teneur en sels dissous inférieure à 1 g/l et une quantité de matières en suspension ne dépassant pas 0,5 %.

1.4.4 Adjuvants

Un adjuvant est un produit chimique ajouté au béton, en proportion n'excédant pas 5 % de la masse totale du ciment, dans le but d'améliorer ou de modifier certaines de ses propriétés. Il est intégré pendant le malaxage ou lors d'un malaxage complémentaire avant la mise en œuvre du béton. Les adjuvants se distinguent par leur composition chimique, différente de celle des autres minéraux utilisés dans la fabrication du BCR, et peuvent être classés en adjuvants organiques ou inorganiques.

Selon Gauthier et Marchand [7] la plupart des adjuvants chimiques utilisés dans la fabrication des bétons conventionnels peuvent également être employés pour le BCR. Toutefois, le dosage des adjuvants nécessaire à la fabrication des BCR est généralement plus élevé que celui des bétons classiques, afin d'améliorer leurs performances. Étant donné que les revêtements en BCR ne comportent pas d'armatures, les faibles teneurs en ions chlorures dans certains adjuvants chimiques n'ont pas d'effets néfastes. Il convient toutefois de prendre des précautions, car certains adjuvants peuvent accélérer ou retarder la prise du BCR, comme c'est le cas pour les plastifiants et les super-plastifiants [3].

Les principaux adjuvants généralement utilisés dans le BCR sont :

1.4.4.1 Les agents retardateurs de prise

Généralement, les retardateurs ralentissent le processus de prise de la pâte sans altérer la nature ni la composition des éléments et des produits d'hydratation. Leur utilisation permet de

prolonger le temps de prise, ce qui facilite la mise en œuvre du BCR. Par conséquent, les délais habituellement spécifiés pour la fabrication, la mise en place et la réalisation des joints horizontaux et verticaux peuvent également être prolongés [8].

1.5 Méthodes de formulation

La plupart des méthodes de formulation généralement utilisées pour le béton conventionnel ne sont pas directement applicables au BCR. Nous pouvons distinguer trois grandes catégories de méthodes de formulation du BCR : théoriques, semi-empiriques et empiriques. Les méthodes théoriques sont basées sur des modèles mathématiques et physiques pour prédire les propriétés du BCR en fonction de ses composants. Les méthodes semi-empiriques combinent des modèles mathématiques avec des données expérimentales pour prédire les propriétés du BCR. Les méthodes empiriques sont basées sur des données expérimentales et ne sont pas basées sur des modèles mathématiques. Les ingénieurs et les entrepreneurs doivent comprendre les différences entre ces méthodes pour choisir la méthode appropriée pour le projet de BCR en fonction de ses objectifs et de ses contraintes.

1.5.1 Méthodes empiriques

Ce sont les plus anciennes utilisées dans la formulation du BCR. Elles requièrent la réalisation d'un certain nombre de gâchées en laboratoire avant d'obtenir le mélange ayant les caractéristiques voulues.

De plus, des gâchées sont souvent requises en chantier pour ajuster la maniabilité du mélange. L'American Concrete Institute (ACI) propose deux méthodes:

- méthode de formulation respectant des limites de maniabilité;
- méthode de formulation basée sur le compactage des sols.

1.5.2 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité

Cette méthode de formulation de l'ACI s'applique à produire des mélanges de BCR visant à atteindre une limite de maniabilité. Elle donne généralement de bons résultats en pratique et permet de réaliser des mélanges optimisés.

Les proportions du mélange de BCR sont déterminées suivant une procédure en trois étapes:

➤ **étape1:** Il s'agira de réaliser une série de gâchées d'essais de mélanges de mortier à différents rapports Eau/Ciment et à différents rapports Sable/Ciment afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chacun des mélanges, la masse volumique est mesurée. La figure 1.2 montre qu'un rapport E/C donné correspond à un rapport S/C qui conduit à une masse volumique optimale.

➤ **étape2:** Elle consiste à choisir le rapport E/C selon les propriétés mécaniques requises. Ce choix se fera à l'aide de la courbe de la figure 1.2 donnant la relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours de différents mélanges de BCR (sans air entraîné).

➤ **étape 3 :** Il s'agira de tracer la droite des optimums. L'intersection de cette dernière avec E/C choisie dans l'étape 2 donne le rapport S/C adéquat. Ainsi, le mortier optimal étant obtenu, il faudra ajouter sur ce dernier Progressivement le gravier jusqu'à obtenir la maniabilité voulue.

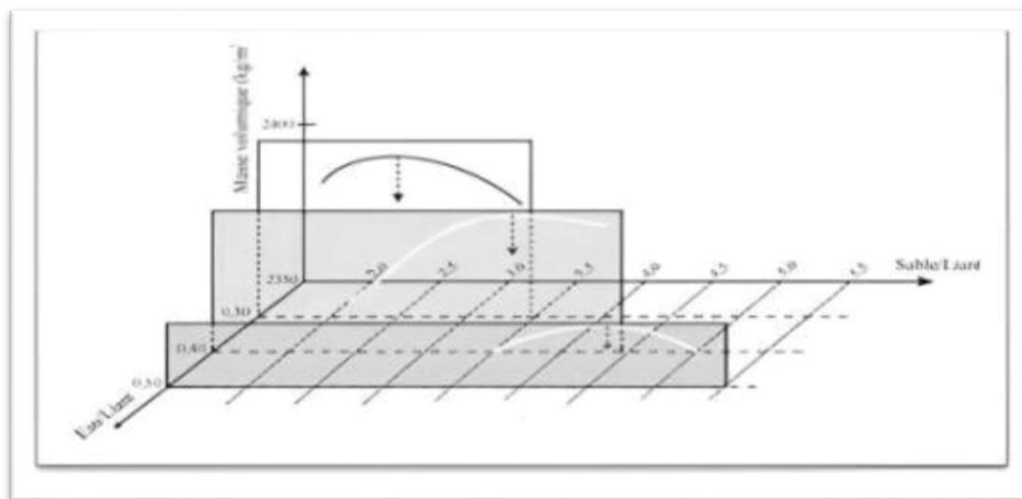


Figure 1.2 : Paramètres optimum d'un mortier pour BCR [7].

1.5.3 Méthode de formulation basée sur le compactage des sols

Cette méthode est basée sur la relation entre la densité sèche et la teneur en eau du BCR. Elle consiste à:

- déterminer les proportions des différentes classes granulaires (sable, gravier) par des courbes de référence établies à partir de résultats d'un grand nombre de mesures faites avec plusieurs granulats.
- faire une série de mélanges à dosages en ciment différents (teneur variant entre 10 et 15%) : on détermine alors, pour chaque mélange, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche correspondante par l'essai Proctor modifié.

- Réaliser les essais de résistance à la compression sur les mélanges à teneur en eau optimale.

Cette méthode n'est pas préférable puisque nécessitant beaucoup de travail de laboratoire. De plus, lors de l'impact du marteau Proctor sur les granulats, ceux-ci sont fragmentés, ce qui modifie la courbe granulométrique, et modifie par ce fait même les résultats obtenus.

C'est ainsi que parmi les méthodes proposées par l'ACI, celle basée sur Les limites de maniabilité est meilleure vu qu'elle fournit de résultats Plus fiables. Dans tous les cas, les méthodes empiriques ne sont pas très flexibles et demandent beaucoup de temps et d'énergie.

1.6 Production et mise en place

La rapidité de mise en place, les faibles teneurs en ciment et l'utilisation d'ajouts minéraux. Béton non armé, est mis en place sans avoir besoin de coffrage. En fait un matériau économiquement très intéressant pour l'industrie de la construction. Le BCR présente cependant une structure interne particulière de par sa forte proportion de granulats et de sa consistance très sèche.

Le BCR peut être produit soit dans une centrale fixe, soit dans une centrale mobile, Puis transporté sur le chantier à l'aide de camions à benne basculante. Sa mise en œuvre se fait à l'aide d'équipements de construction conventionnels, avec des finisseurs à enrobé bitumineux ou à haut pouvoir de compactage pour la mise en place, et des rouleaux tandems à cylindres lisses pour le compactage. Une fois consolidé, le BCR offre une capacité portante suffisante pour supporter la circulation des véhicules sur sa surface dès son jeune âge.

Le processus de production, de déchargement, de mise en place et de compactage du BCR est illustré dans la figure 1.3 à l'échelle du matériau, le BCR se distingue par un squelette granulaire plus compact, dû à son volume de pâte inférieur à celui des bétons plastiques. La formulation du mélange vise à minimiser autant que possible le volume de vide, et dans certains cas, les gros granulats peuvent même être enrobés d'une mince couche de pâte, voire se toucher les uns les autres. Le dosage en ciment varie de 70 à 400 kg/m³ selon la nature des projets et l'intensité des sollicitations qui lui appliqué [9].



Figure 1.3 : Production, de déchargement, de mise en place et de compactage du BCR.

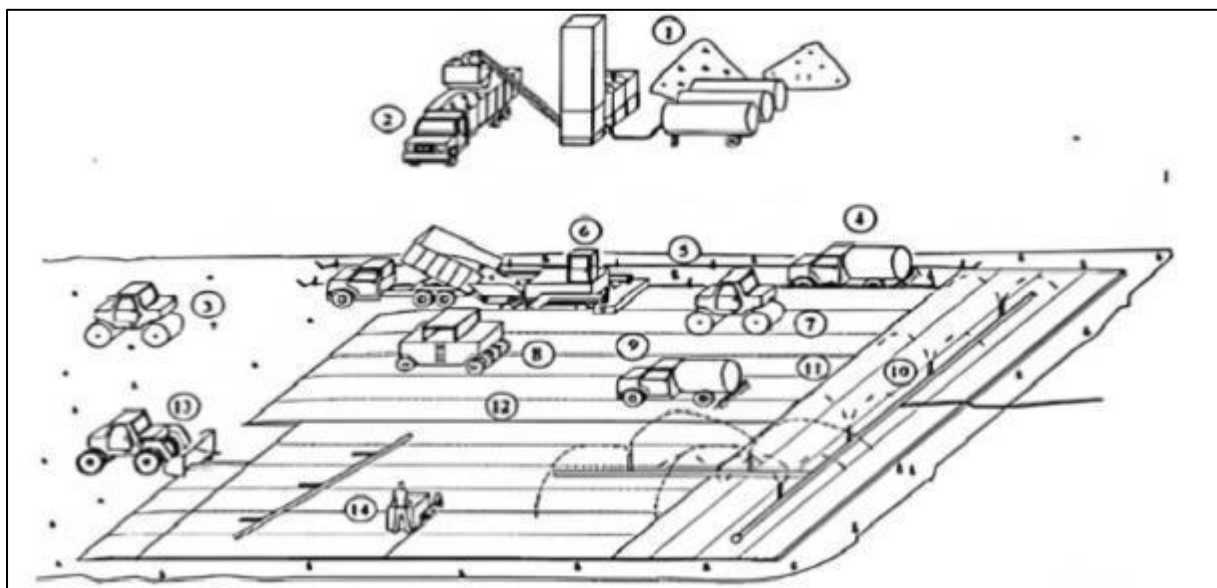


Figure 1.4 : Illustre la séquence visuelle des opérations qui concluent un projet de chaussée en BCR [10].

Des camions-bennes sont généralement utilisés pour transporter le mélange de béton jusqu'au chantier. Les directives iraniennes relatives aux chaussées en béton prévoient un délai maximal de 45 minutes après le malaxage. Ce facteur est particulièrement important lorsque le chantier ou la zone de travail est éloigné de la centrale de mélange. Le compactage du BCR mis en place doit intervenir immédiatement après sa mise en place [12].

La cure et la découpe des cales sont deux autres opérations principales. Le schéma et la photographie présentés aux figures 1.4 et 1.5 illustrent une centrale mobile. Cette dernière assure une production continue grâce à un approvisionnement constant en matières premières. Les matériaux granulaires sont empilés sur le site en évitant la ségrégation. Les trémies sont

constamment alimentées par des chargeurs sur roues pour éviter toute contamination. Les matériaux sont ensuite acheminés au malaxeur par un convoyeur.

Le ciment est dosé à partir de sa trémie et incorporé directement dans le malaxeur via le convoyeur à granulats. L'eau de gâchage et les adjuvants sont introduits par un système de gicleurs sur les matériaux secs à l'entrée du malaxeur. Le malaxage est réalisé par deux arbres d'agitation en parallèle. Cette centrale mobile offre plusieurs avantages, notamment une mobilisation et une démobilitation rapides, une réduction du temps de transport du béton, une productivité élevée et un système de malaxage efficace (Association Canadienne, 2001).

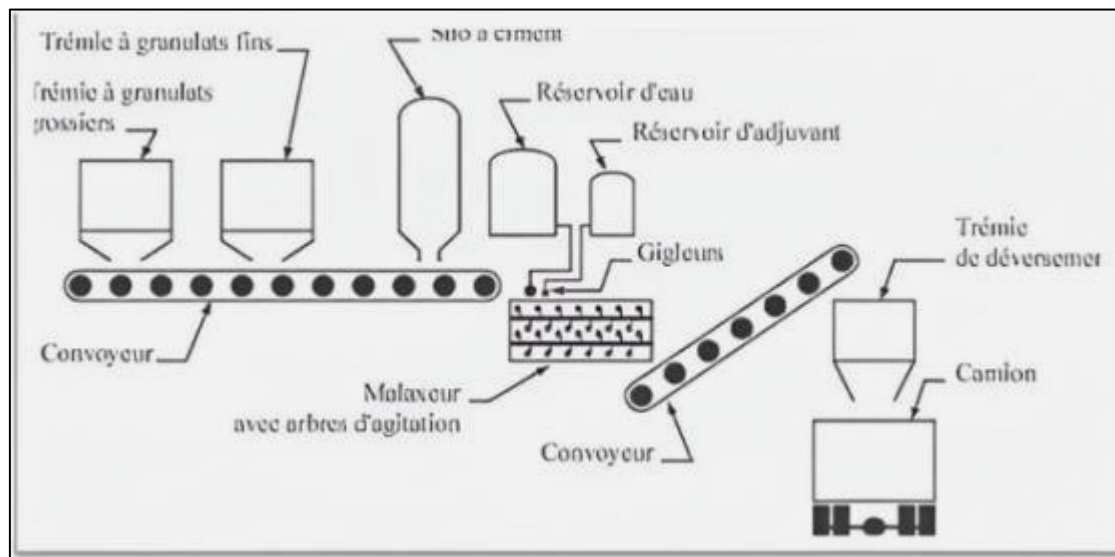


Figure 1.5 : Schéma d'une centrale mobile (Association Canadienne, 2001).



Figure 1.6: Photographie d'une centrale mobile

1.7 Compactage du BCR :

Le compactage représente une étape cruciale du processus, car il garantit la densité, la résistance, l'uniformité et la texture superficielle du revêtement. Il débute dès la mise en place et se poursuit jusqu'à ce que le revêtement atteigne la densité souhaitée. Les caractéristiques essentielles du béton compacté au rouleau BCR à l'état durci, notamment sa résistance à la compression et à la flexion, dépendent étroitement du degré de compactage. Ces propriétés déterminent la capacité du BCR à supporter les charges, sachant que le béton est moins résistant en traction qu'en compression. Un compactage insuffisant laisse des vides entre les granulats, créant ainsi des points de faiblesse et entraînant une baisse de la résistance à la compression. En règle générale, le degré minimal de compactage requis est de 97 % de l'optimum Proctor modifié.

Le processus de compactage se divise en deux étapes : d'abord, deux passages du compacteur à rouleau sans vibration pour consolider les matériaux, puis plusieurs passages avec vibration, généralement quatre ou plus, jusqu'à atteindre la densité spécifiée. Ensuite, quelques passages de l'engin à pneus sont effectués pour combler les éventuels vides ou petites fissures en surface. En l'absence d'un compacteur à pneus, quelques passages supplémentaires du compacteur à rouleau sans vibration peuvent être nécessaires pour finaliser la surface.

Le compactage des bords est crucial et nécessite un support préalable avec des matériaux stables, comme des bordures en zone urbaine, pour éviter des pertes de compacité et de résistance. Les opérations de compactage doivent débuter dans les 10 minutes suivant la mise en place du BCR, et la durée totale ne doit pas dépasser 60 minutes à partir du malaxage en centrale.

le compactage du BCR s'appuie sur les mêmes fondamentaux que celui des sols : optimisation de l'énergie de compactage, contrôle de la teneur en eau et recherche d'une densification maximale. Cette analogie, soulignée par des auteurs comme [13] permet d'adapter les méthodes de compactage géotechniques aux spécificités du BCR, assurant ainsi sa résistance et sa durabilité.

1.7.1 Équipements et Séquence de Compactage Standard :

Généralement, le BCR est répandu par un finisseur d'asphalte modifié et compacté par un rouleau compresseur à tambour en acier, un rouleau vibrant et un rouleau compresseur à roues en caoutchouc [14].

Pour le compactage, il est nécessaire d'utiliser des rouleaux vibrateurs autopropulsés. Ces rouleaux doivent être en nombre suffisant pour compacter le béton à un taux

correspondant à 1,5 fois la capacité nominale de production du malaxeur à béton. Il est recommandé d'avoir au moins deux rouleaux vibrateurs en action simultanément. Les vibrateurs doivent être équipés de deux tambours en acier lisse, avec un diamètre compris entre 1,3 et 1,4 mètre et une largeur de 1,7 mètre. Chaque rouleau vibrateur doit avoir une masse totale supérieure à 9500 kg.



Figure 1.7 : Rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses.

Le béton doit être compacté jusqu'à ce que sa densité atteigne 100 % de la densité optimale déterminée par l'essai Proctor. La densité en place sera considérée comme acceptable si la moyenne de toutes les mesures est supérieure à 99 % et si aucune mesure n'est inférieure à 97 % de la densité modifiée. En général, lorsque les rouleaux vibrateurs sont en mode dynamique, l'arrêt des vibrations doit se faire à une distance de plus de 2 mètres avant l'arrêt complet de l'appareil. Cette procédure vise à prévenir la formation de dépressions à la surface du béton compacté par rouleau. De plus, les changements de direction des rouleaux compacteurs tandem à cylindres métalliques lisses doivent être effectués à distance des finisseurs et sur du béton compacté frais comme montré à la figure 1.8[5].

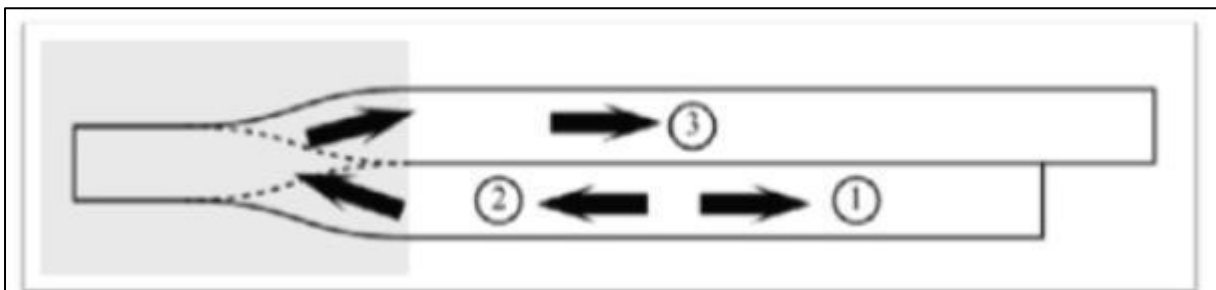


Figure1.8 : les changements de direction de rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses[5].

Les opérations de compactage doivent être réalisées sur toute la surface du béton compacté au rouleau, en commençant près des bordures et en progressant vers le centre de la dalle,

conformément aux instructions fournies dans la figure de la section 1.8 des techniques de construction. Sur les sections en pente, le compactage doit débuter du côté inférieur. À tout moment, la vitesse maximale du rouleau ne doit pas excéder 2,5 km/h. Les passes successives du rouleau vibreur doivent se chevaucher sur une distance minimale de 0,5 m pour garantir une bonne consolidation des bords adjacents du béton compacté au rouleau figure 1.9.



Figure 1.9 :A Jauge nucléaire pour mesurer le degré de compactage d'une chaussée en BCR.

1.8 Cure du BCR:

En raison de la faible teneur en eau du BCR, une cure soignée s'impose, immédiatement après le compactage. Afin d'éviter un délavage à la surface fraîchement compactée, l'eau ne doit être, au début, que finement vaporisée. La cure par aspersion d'eau doit durer au moins trois jours [2].



Figure1.10 : (a)Cure du béton par arrosages ciblés , (b) Bâche de protection contre la pluie [15].

1.9 L'exécution des joints :

Pour faciliter la dilatation et la contraction des dalles en béton compacté au rouleau BCR en réponse aux variations climatiques et pour permettre leurs déformations relatives, des joints sont aménagés entre elles. Cependant, ces joints présentent eux-mêmes des défis pour les

chaussées en BCR, car ils deviennent avec le temps des points sensibles aux affaissements et aux mouvements de la chaussée. Ces zones sont souvent le lieu où des fissures, plus ou moins importantes, finissent par se former. Sur les chaussées rigides en BCR, on observe que de légères déformations des dalles près des joints apparaissent sous l'effet des charges et augmentent progressivement avec le temps, surtout en amont par rapport à l'aval. Ce phénomène, connu sous le nom de "marches d'escalier", est courant sur les chaussées rigides, que ce soit au niveau des joints moulés ou même des joints sciés [11].

En règle générale, sur les chaussées rigides en béton compacté au rouleau BCR, les joints sont sciés après le durcissement du béton afin d'assurer une surface de roulement uniforme (Figure1.11). Ces joints de construction sont disposés longitudinalement et parallèlement à l'axe de la chaussée, correspondant généralement aux zones où le béton a été coulé séparément. De plus, les revêtements en BCR intègrent des joints de dilatation sous forme de coupures dans la dalle sur toute sa hauteur, avec des épaisseurs variant de 20 à 30 mm. Pour améliorer l'uniformité de la surface, des joints de retrait sont également installés, inclinés par rapport à l'axe de la chaussée (à un angle de 1/6) et espacés de manière irrégulière pour éviter la résonance [11].



Figure1.11 :Exécutiondejointsparsciageaprès mise en placeduBCR-aireIndustriel-Montréal[11].

1.10 Domaines d'utilisation du BCR

Le BCR s'est développé selon deux types: le BCR pour les structures de contrôle des eaux (barrages) et ouvrages massifs ; et BCR pour pavages (routes, dépôts de stockage....).La formulation du béton compacté au rouleau dépend de la destination du projet.

Pour résoudre les défis associés à l'utilisation de grandes quantités de terre dans la construction des digues de retenue et pour réaliser des économies, le BCR propose une solution prometteuse. Ce matériau peut servir à la fois dans la structure principale de la digue et comme revêtement pour protéger ses deux faces. L'avantage majeur de cette approche est

qu'elle permet de créer des pentes plus abruptes en amont et en aval de la digue. De plus, l'utilisation du BCR accélère la construction et la mise en service du barrage. Ce matériau, caractérisé par un affaissement nul, est fabriqué dans des centrales de malaxage proches du chantier, puis transporté sur place par des convoyeurs ou des camions. Habituellement, le ciment est utilisé comme liant, mais le dosage est significativement réduit par rapport à celui d'un BCR conventionnel.

Pour ces types d'ouvrages, la taille maximale des granulats varie généralement de 40 à 150 mm [7] une fois déversé, le mélange de BCR est nivelé à l'aide de niveleuses ou de bulldozers mécaniques, puis compacté à l'aide de rouleaux compacteurs vibrants. Après le durcissement, la résistance à la compression du BCR utilisé pour les barrages varie généralement de 7 à 20 MPa [15].

Pour la construction d'ouvrages de grande masse tels que les barrages, il est recommandé d'utiliser des ajouts minéraux tels que les cendres volantes, étant donné que la quantité de ciment utilisée est réduite. Cette substitution de ciment permet de minimiser le dégagement de chaleur lors de l'hydratation pendant le coulage et le durcissement du BCR [16].

Les techniques de construction employées pour les barrages en BCR sont similaires à celles utilisées pour les remblais en terre, comme illustré dans la Figure 1.12.



Figure 1.12 : Les techniques de réalisation utilisées dans la construction de barrages en BCR

Le Tableau 1.2 présente une comparaison entre deux mélanges de BCR, le premier étant destiné à la construction d'un barrage et le second à un projet routier. Étant donné que le BCR routier est soumis à des sollicitations plus importantes en service, à la fois mécaniques et climatiques, il nécessite une résistance mécanique plus élevée, ce qui justifie l'utilisation d'une quantité plus importante de liant. De plus, le diamètre maximal des granulats est limité à 20 mm dans le corps routier pour éviter tout problème de ségrégation.

Tableau 1.2 : Comparaison entre un BCR routier et un BCR pour barrage [7]

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
teneur en liant (kg/m ³)	60-250	200-350
rapport eau/liant	0,4-0,8	0,3-0,4
résistance à la compression 28 (MPa)	15	45
temps Vébé (s)	10-25	30-60

a) Le BCR dans la conception des barrages

L'intégration du béton compacté au rouleau BCR dans la conception des barrages offre des avantages économiques notables. En moyenne, le coût par mètre cube de BCR utilisé dans un barrage poids est environ deux fois inférieur à celui du béton conventionnel, excluant les traitements spéciaux entre les couches. Cette économie tend à croître proportionnellement avec les quantités de matériaux employées. Toutefois, lorsqu'on évalue l'ensemble de la structure, incluant les travaux de fondation, le déversoir et les ouvrages auxiliaires, cet avantage peut être atténué.

La comparaison entre un barrage poids traditionnel et un barrage poids en BCR est simplifiée par plusieurs similarités : l'origine souvent identique des matériaux, des techniques de fondation similaires, un déversoir identique et des profils structurels semblables. En revanche, comparer ces solutions à d'autres types de barrages, comme ceux en terre ou en enrochements, demande une analyse détaillée de la qualité, de la quantité et de la source des matériaux, ainsi que des conditions de fondation [16].

Les projets récents impliquant le BCR ont démontré la possibilité d'une économie globale de 10 à 20 % par rapport aux solutions reposant sur la terre ou les enrochements, à condition que les conditions de fondation soient propices à la construction d'un barrage poids.

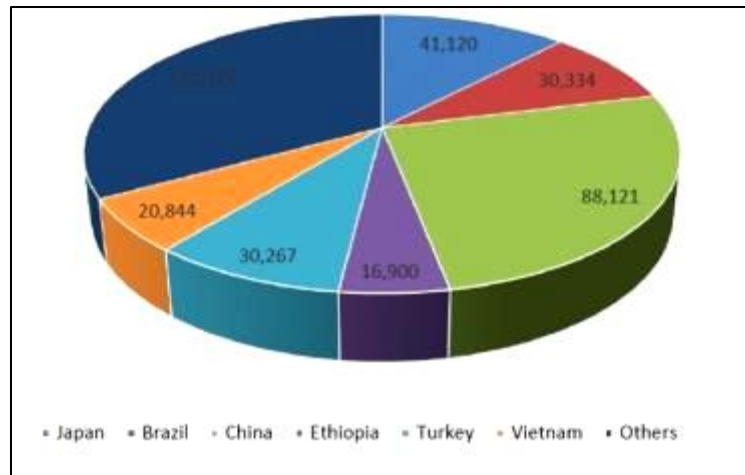


Figure 1.13 :BarrageBCR par pays (%).

Dans les grands projets de construction utilisant le BCR, on observe de plus en plus l'utilisation d'installations de production en continu, similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux, qui offrent des taux de production nettement plus élevés.

b) BCR pour pavages

Le BCR destiné aux pavages tire son appellation de la méthode de compactage employée pour garantir son serrage et sa densification. Les chercheurs expliquent la différence entre les techniques de BCR pour les barrages et celles pour les pavages par le fait que la construction d'un pavage en BCR requiert des contrôles plus rigoureux que celle des barrages. Ce matériau comprend les mêmes composants de base que le béton conventionnel, à savoir du ciment, des granulats (sable et gravier) et de l'eau. Les méthodes de mise en œuvre impliquent l'utilisation du même équipement d'épandage que celui employé pour les revêtements en béton bitumineux (BB) à haute densité. Le mélange utilisé est rigide et ferme, nécessitant un compactage à l'aide de rouleaux compresseurs cylindriques ou pneumatiques.

De plus, une fois solidifié, la résistance à la compression du BCR pour les pavages varie généralement entre 15 et 40 MPa. L'épaisseur du BCR utilisé pour les pavages varie, allant de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les entrepôts [3]. La taille maximale des granulats utilisés pour les BCR de pavage est limitée à 20 mm, afin de résoudre les problèmes de ségrégation et d'assurer une surface dense et lisse [3].



Figure 1.14 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA [3].

En termes de durabilité, le revêtement en BCR a démontré de solides performances. Ces caractéristiques avantageuses en font un choix économique pour une mise en œuvre rapide et aisée. Il est largement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic, les voies très sollicitées par les véhicules lourds. Les chaussées lourdes en BCR peuvent être construites en une ou plusieurs couches, selon la capacité de conception de la route [12] ainsi que dans les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les zones de stockage, entre autres.

Les concepteurs optent pour ce matériau dans les revêtements de chaussées lorsque des considérations telles que la résistance, la durabilité et l'économie sont primordiales.

Les spécialistes soulignent une différence significative entre les chaussées en BCR et en BB. La chaussée en BCR présente une rigidité structurelle plus élevée par rapport à celle en BB. Cette distinction principale entre les deux types de chaussées, souple et rigide, réside dans la répartition de la charge sur la couche de forme (Figure 1.15). Grâce à sa bonne rigidité et sa raideur, le BCR a tendance à répartir la charge sur une plus grande surface de la couche de forme. En revanche, le revêtement en BB, composé de matériaux plus souples et moins rigides, ne répartit pas la charge de la même manière qu'un revêtement rigide.

Pour atteindre les objectifs de répartition de charge, il est nécessaire d'avoir plus de couches de revêtement ou une plus grande épaisseur, afin de garantir une répartition optimale de la charge sur le sol support [8, 9]. De plus, selon des études menées par Saucier et al. [17] ainsi qu'une analyse du coût du cycle de vie réalisée en 1998 par ERES Consultants [18]. La durée de vie prévue d'une chaussée souple en BB est de 17 ans, tandis que celle d'une chaussée rigide en BCR est de 34 ans.

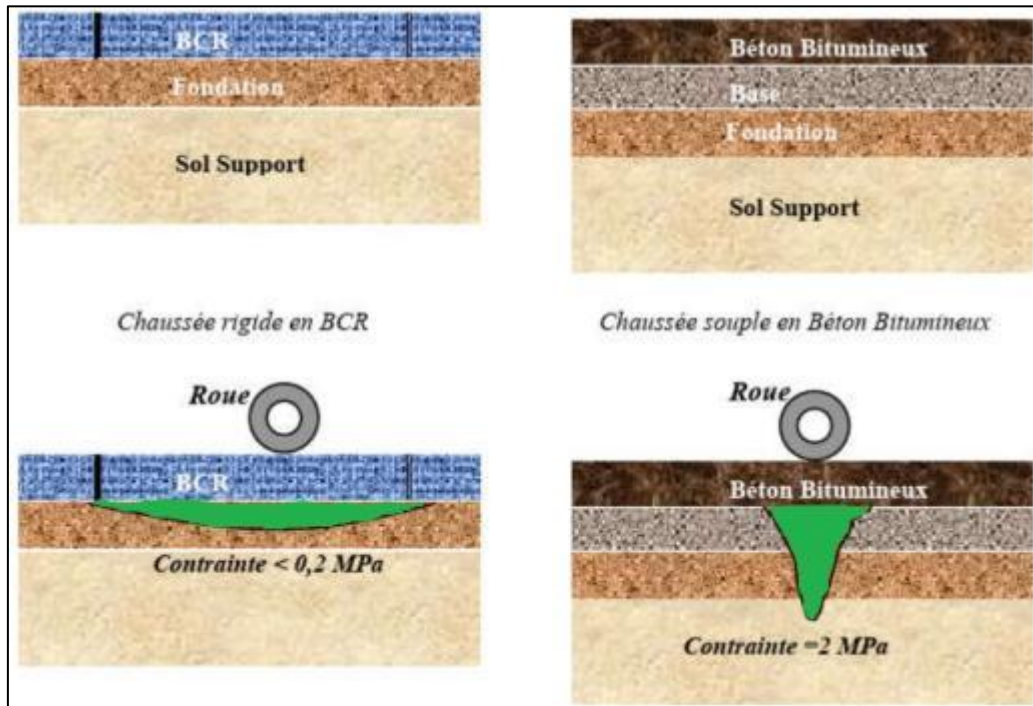


Figure 1.15 : Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB [7].

1.11 Essai sur BCR frais :

Il est essentiel de débiter les tests dès les premières phases de la construction. Les essais en laboratoire peuvent être initiés dès la production du matériau ou dès qu'une source commerciale est identifiée pour le projet. Cette démarche revêt une importance particulière lorsque les résistances calculées pour des durées supérieures à 28 jours sont spécifiées. Souvent, la soumission des matériaux en béton compacté au rouleau est requise dès le début du calendrier de construction.

Il existe toute une série de tests visant à évaluer la qualité du béton compacté au rouleau tel qu'il est produit par l'usine de malaxage. Cependant, aucun test individuel ni ensemble de tests ne peut convenir à tous les types de béton compacté au rouleau.

1.11.1 Échantillonnage :

Lors de l'évaluation de la conformité du béton compacté au rouleau (BCR) par rapport aux spécifications, un échantillonnage approprié est essentiel pour obtenir un échantillon représentatif. Il existe deux principaux endroits pour effectuer l'échantillonnage :

1) Après le mélange et juste avant le placement, habituellement depuis le convoyeur (certaines configurations d'usine peuvent disposer d'un mécanisme de déviation pour dévier le matériau de la bande).

2) depuis le convoyeur de l'ascenseur de béton compacté au rouleau BCR jusqu'à la zone de placement. Dans les deux cas, un échantillon de taille adéquate, conforme à la norme ASTM D 75 doit être prélevé, puis divisé en quatre pour obtenir la taille d'échantillon de test appropriée, selon la norme ASTM C702. Il est crucial de reconnaître que le matériau échantillonné dans la zone de placement de l'ascenseur peut avoir subi une certaine ségrégation due au système de transport ou à la méthode de placement. L'inspecteur du contrôle qualité doit veiller à évaluer si une ségrégation se produit dans le processus de construction et/ou lors de la méthode d'échantillonnage [19].

1.11.2 Test Vébé :

Le test Vébé offre une indication de la cohérence ou de la maniabilité du mélange de béton compacté au rouleau BCR pour certains dessins de mélanges de BCR. Le test standard Vébé pour le béton a été adapté pour le test de BCR. Le résultat du test Vébé est exprimé en temps (en secondes) nécessaire pour qu'un anneau de mortier apparaisse à la périphérie de la plaque de surcharge (voir Figure 1.16). Ce temps correspond généralement à celui nécessaire pour consolider complètement l'échantillon de BCR sous une charge supplémentaire spécifique. Ce test convient aux mélanges de BCR dont le temps Vébé se situe entre 10 et 60 secondes. La procédure générale de test pour le BCR est spécifiée dans la norme ASTM C 1170. Bien que ce test puisse être utilisé pour évaluer de manière générale la maniabilité du BCR, il n'est généralement pas adapté pour contrôler l'uniformité du mélange pendant la production et la mise en place. De plus, cette méthode de test n'est pas appropriée pour les mélanges de BCR dont le temps Vébé dépasse 60 secondes.

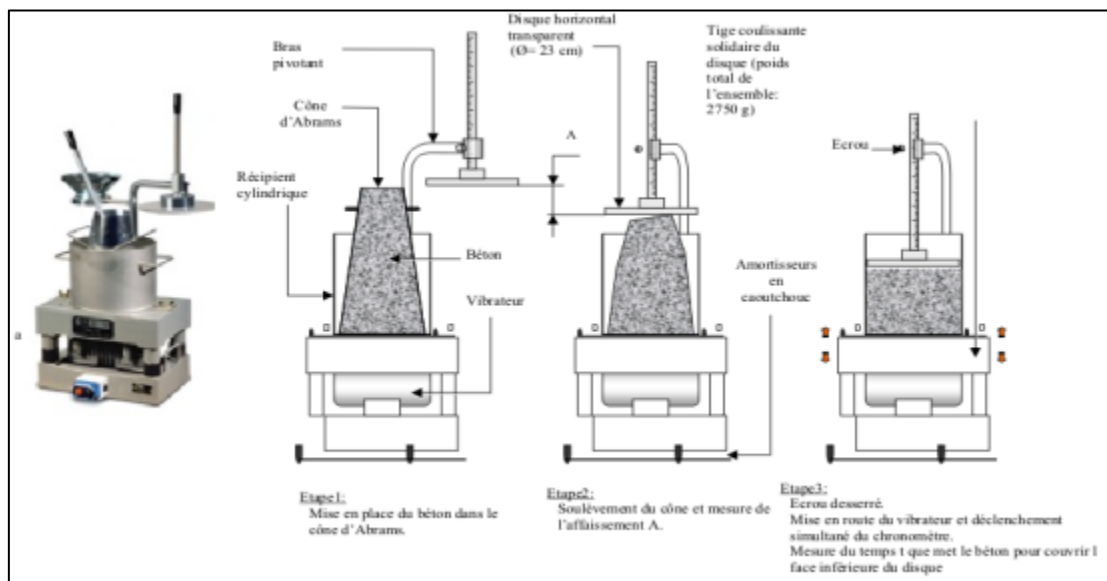


Figure 1.16 : Test de consistance Vébé avec un anneau de mortier sur l'échantillon consolidé.

La maniabilité du BCR dépend principalement du dosage de la pâte (eau, ciment, etc.). Selon la littérature, la maniabilité du BCR est généralement ciblée entre 40 et 90 secondes (mesurée par le temps vébé) au moment de la mise en place. Le délai maximal pour la mise en place du béton, à partir du premier contact eau/liant, est de 60 minutes. Le tableau 1.3 ci-dessous présente la classification de la consistance des bétons en fonction du temps.

Tableau 1.3 : Classe de consistance de bétons en fonction du temps Vébé

Temps Vébé « t » en secondes	Consistance de bétons
$t \geq 31$	Béton très sec
$21 \leq t < 31$	Béton sec
$11 \leq t < 21$	Béton plastique
$5 \leq t < 11$	Béton fluide
$t < 5$	Béton très fluide

La maniabilité d'un mélange de BCR est influencée par divers facteurs, parmi lesquels nous pouvons souligner :

- Le volume et la fluidité de la pâte : une augmentation de ces deux paramètres améliore la maniabilité.
- La proportion des fines dans le fuseau granulométrique : une proportion plus élevée de fines augmente la maniabilité en favorisant une plus grande mobilité de l'ensemble grâce à une plus grande densité de points de contact.
- La forme, la texture et l'absorptivité des granulats : la maniabilité est plus élevée avec des particules rondes plutôt que plates. Les granulats poreux absorbent l'eau et réduisent la maniabilité, tandis que les granulats rugueux nécessitent une plus grande quantité de pâte de ciment pour maintenir la même maniabilité en raison de leurs irrégularités de surface.

La qualité du BCR est étroitement liée à sa maniabilité à l'état frais ; elle ne doit pas être ni trop faible ni trop élevée. Une maniabilité excessive, donc une augmentation du rapport eau/ciment, entraîne une diminution des propriétés mécaniques et de la durabilité du BCR. De plus, lors de la mise en place, une pression interstitielle excessive est générée dans le matériau compacté, entraînant une déformation excessive lors du passage des équipements de compactage, ce qui peut causer des ondulations à la surface du revêtement. Une adhérence

accrue de la pâte avec le rouleau du compacteur peut également compromettre la qualité de la surface [7].

1.11.3 Test de compactage Proctor modifié :

De plus, une attention particulière doit être accordée aux opérations de compactage. L'utilisation du marteau pour compacter le matériau peut entraîner des fractures des granulats et altérer la granulométrie. De même, lors du nivellement de la surface de la couche supérieure, il est essentiel que la qualité de la finition soit comparable à celle obtenue lors du compactage final du BCR sur le chantier. Souvent, des particules fines (inférieures à 5 mm) issues du mélange de BCR sont ajoutées lors du nivellement pour obtenir une surface fermée et ainsi obtenir une masse volumique humide de référence représentative.

Le test de compactage Proctor modifié (ASTM D1557) est un test largement utilisé pour contrôler le compactage du remblai. Ce test établit la relation entre la teneur en humidité et la densité sèche d'un matériau pour l'énergie de compactage spécifiée, et fournit une densité sèche maximale à une teneur en humidité optimale. Pour le contrôle du compactage des remblais, une plage de teneur en humidité et un pourcentage de compactage de la densité sèche maximale sont généralement spécifiés. Un équipement de compactage a été développé pour pouvoir efficacement atteindre plus de 95% de la densité sèche maximale dans le remblai, et la relation entre la « maniabilité » (la facilité avec laquelle le matériau peut être compacté jusqu'au pourcentage de compactage spécifié), l'équipement de compactage et le nombre de passes est comprise par les ingénieurs et les entrepreneurs.

L'équipement et les procédures du test Proctor modifié nécessitent quelques modifications pour être utilisés avec la plupart des mélanges de béton compacté BCR. Dans le test de compactage Proctor modifié, l'échantillon est compacté dans un moule en cinq couches égales par 25 coups d'un marteau de 10 livres, tombant de 18 pouces. Le moule mesure 6 pouces de diamètre et la hauteur de l'échantillon est de 4,584 pouces. L'essai avec BCR est généralement modifié par :

- 1) Ne pas utiliser le remplacement de la fraction granulométrique plus en pouces comme spécifié par la norme.
- 2) Filtrer par voie humide le mélange BCR pour enlever les matériaux de plus de 1,5 de diamètre.
- 3) placement en 3 couches avec 42 coups par levée, au lieu de 5 couches avec 25 coups par levée. Il a également été constaté que, en raison de la fraction granulométrique relativement importante (généralement supérieure à 60 %), une dégradation du matériau peut se produire lors du compactage à l'aide du matériau de compactage standard. Par conséquent, une

modification de l'équipement de test pour utiliser une plaque de compactage pleine face (5 pouce) a été utilisée pour limiter la dégradation du matériau.

Des essais de BCR utilisant la procédure de compactage Proctor modifiée ont été rapportés par Reeves et Yates (1985) [20].

Le Tableau 1.4 résume les résultats des essais Proctor réalisé par Zdiri [3].

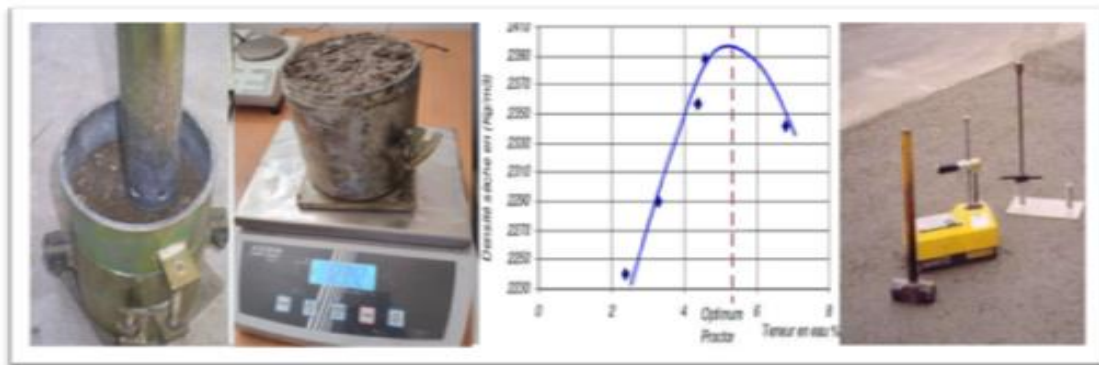


Figure 1.17 : Mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais, en laboratoire et en chantier [3].

Tableau 1.4. Valeurs de l'Optimum Proctor modifié et des masses volumiques l'état humides et à l'état sec pour différents mélanges de BCR.

Mélange	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Teneur en eau optimale (%)	5,7	5,6	6,2	5,8	5,6	5,3	5,4	5,7
Masses volumiques sèche (kg/m ³)	2389	2410	2430	2405	2395	2408	2335	2310
Masses volumiques humides (kg/m ³)	2525,2	2545,0	2580,7	2544,5	2529,1	2535,6	2461,1	2441,7

1.11.4 Masse volumique :

La mesure de la masse volumique humide du BCR à l'état frais est essentielle pour garantir l'uniformité de la production et servir de référence pour évaluer le niveau de compactage du matériau sur site. Elle permet également de comparer la masse volumique humide expérimentale à la valeur théorique. La méthode d'essai doit garantir une consolidation adéquate du BCR, refléter le degré de compactage atteint sur le terrain, et être facilement réalisable et reproductible. Cette mesure est effectuée au laboratoire selon différentes

méthodes, telles que l'essai Proctor modifié, conformément aux normes NF EN 12350-6 et NT21.109-7 [7].

1.11.5 Teneur en air :

La détermination de la teneur en air du BC (béton conventionnel) est habituellement réalisée à l'aide d'un appareil spécifique appelé aéromètre à pression. Cependant, selon les observations de Gauthier et Marchand [7], cette méthode d'essai n'est généralement pas adaptée pour le BCR (béton compacté au rouleau), qui se caractérise par sa relative sécheresse à l'état frais.

Dans le cas du BCR, sa consistance plus sèche ne lui confère pas la déformabilité et la plasticité requise pour conduire efficacement cet essai. En effet, le faible dosage en eau et l'état sec du matériau limitent la capacité de la matrice à se déformer et à maintenir une forme malléable, ce qui rend difficile la réalisation de mesures précises de teneur en air à l'aide de l'aéromètre à pression (figure 1.18).



Figure 1.18 :Aréomètre-pressio-métrique

En outre, cette formulation sèche favorise un contact étroit entre les granulats, réduisant ainsi la présence d'espaces vides dans le matériau, ce qui rend la détermination de la teneur en air encore plus complexe. En conséquence, d'autres méthodes plus adaptées doivent être envisagées pour évaluer les caractéristiques d'air du BCR.

1.11.6 Ségrégation

Lors de la mise en place du BCR, la ségrégation des différents composants peut survenir, entraînant une perte d'homogénéité et de résistance du matériau. En raison du faible volume d'eau, le BCR est particulièrement sensible à la ségrégation, qui dépend de divers facteurs tels que la granulométrie, la taille maximale des granulats et les propriétés de la pâte.

Il est essentiel d'être attentif lors de la mise en place, en particulier dans les zones sensibles à la ségrégation telles que les joints frais et les zones de reprises. Ces opérations doivent être réalisées avec précaution afin de minimiser les risques de ségrégation et d'assurer une distribution uniforme des composants dans le BCR. Le passage des équipements de compactage sur les zones de ségrégation (figure 1.19) (b) doit être précédé de l'ajout de matériaux de dimension inférieure à 5 mm tamisés à partir du BCR frais.

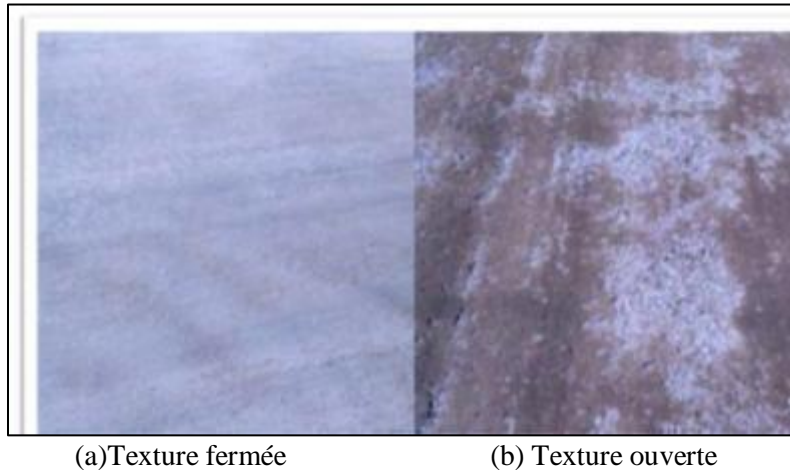


Figure 1.19 :Etat de surface d'un pavage en BCR (a)sans ségrégation, (b) avec ségrégation

1.12 Essai sur BCR durci :

1.12.1Etat de la surface

La fermeture de la surface de roulement du pavage en BCR représente un paramètre très important dans le choix des granulats et le processus de formulation des mélanges. En effet, l'uni d'une chaussée en BCR est fortement influencé par les procédures de mise en œuvre, par les variations de l'indice de serrage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les engins et le mode de compactage. Le confort au roulement est influencé par l'uni d'un revêtement en BCR qui reste, comme on l'a mentionné avant, un facteur limitatif pour des applications du BCR où la vitesse des véhicules est un élément très important telle que pour les voies express et les autoroutes.

1.12.2Propriétés mécaniques : Le comportement mécanique du BCR est principalement déterminé par le faible volume de pâte. La structure granulaire compacte des mélanges de BCR joue un rôle crucial dans l'obtention de performances mécaniques remarquables par rapport aux bétons plastiques.

A) Résistances à la compression :

La résistance à la compression du BCR est couramment perçue comme sa propriété la plus significative. Elle offre une évaluation globale de la qualité de ce matériau, étant directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. En outre, cette résistance constitue un élément crucial pour la conception et le dimensionnement des structures de pavages en BCR [21].

Tableau 1.5: Différence entre un BCR et un béton conventionnel
(Canadian Association Of Cement 2005)

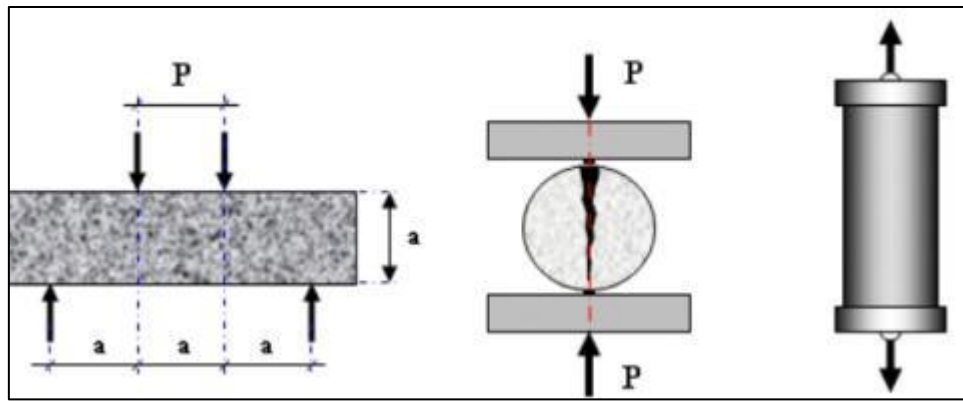
Essais	BCR	Béton conventionnel
Résistance à la compression (MPa)	66	44.8
Résistance à la flexion (MPa)	8.3	5.5
Absorption (%)	2.4	5.1
Porosité (%)	6.0	11.2
Perméabilité à l'eau (m/s) Essai 1 Essai 2	5×10^{-13} 0.1×10^{-13}	14×10^{-13} 9×10^{-13}

B) Résistance à la traction :

En ce qui concerne l'essai de traction, plusieurs modes de chargement permettent de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction, comme illustré dans la figure 1.18 Parmi ces essais, nous pouvons mentionner :

- **La traction directe :**
- **La traction par flexion ;**
- **La traction par fendage** (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale (norme NF P 98-232-3).

Étant donné que les chaussées en BCR sont principalement sollicitées par des efforts de compression qui induisent une traction indirecte, l'essai le plus représentatif de ce phénomène est l'essai de traction par fendage (essai brésilien). La figure 1.20 illustre la propagation des fissures lors de cet essai réalisé sur des éprouvettes de BCR.



Traction par flexion Traction par fendage Traction directe

Figure 1.20 :
Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction.

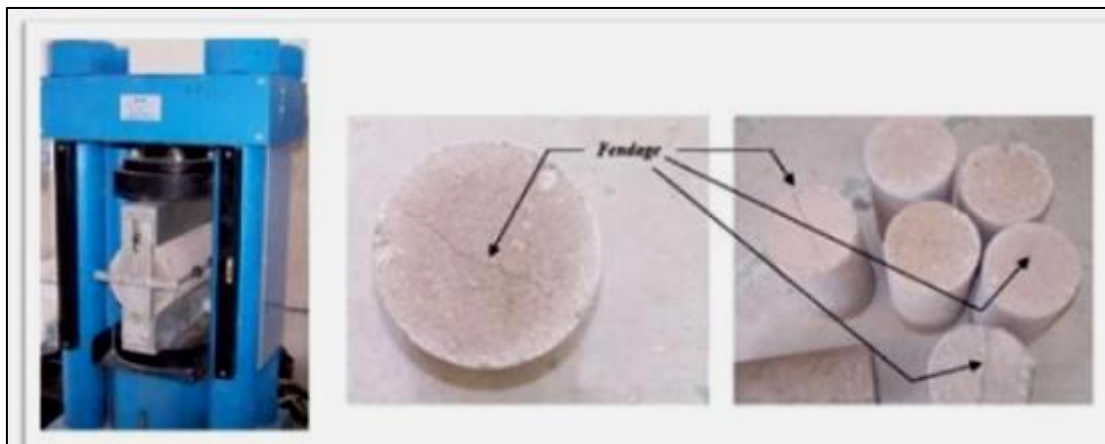


Figure 1. 21 : Propagation des fissures lors de l'essai de traction par fendage sur cylindre de BCR.

Il faut réaliser des essais en laboratoire sur le BCR pour déterminer les caractéristiques de matériau au point de vue physique et mécanique (Figure 1.21) ces essais permettent aussi de fixer les propriétés du matériau ceci soit dans le cas des charges d'exploitation normales [22], les propriétés de la matrice cimentaire et des inclusions granulaires expliquent les résistances à la compression élevées de ces mélanges [23].

La résistance est influencée par la compacité du mélange et le faible dosage en ciment et en eau ces dernières produisent une matrice cimentaire peu poreuse due à une bonne résistance. Aussi les caractéristiques mécaniques du BCR influencées par deux composants, la pâte de ciment hydratée et les granulats [22].

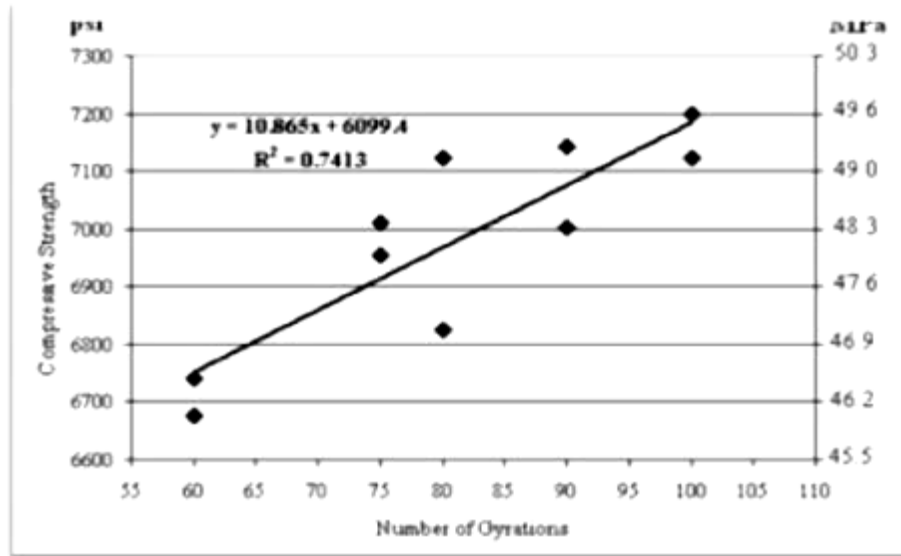


Figure 1.22 : Courbe d'égalité de résistance du BCR [22].

C) Résistance à la flexion

La résistance à la flexion du béton BCR est une propriété importante lors de la conception de dalles de revêtement. L'évaluation du module de rupture d'une éprouvette de BCR consiste à mesurer la contrainte maximale atteinte à la base de l'éprouvette sous l'effet d'une charge. Cela joue un rôle déterminant dans le calcul de l'épaisseur du revêtement.

Dans l'essai NF P18-407, NT 21.109-5, un prisme de BCR est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge au milieu de la poutre. La contrainte théorique maximale de traction atteinte sur la fibre inférieure du prisme correspond au module de rupture. Pour la préparation des éprouvettes nécessaires à l'essai de résistance à la flexion du béton compacté BCR, Zdiri[7] a conçu un moule spécial permettant de fabriquer des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 cm en développant la technique de vibro-compactage. Cette méthode comporte une charge appliquée simultanément avec la vibration au lieu de la vibration seule pour le BCR (Figure 1.23).

Un béton correctement formulé avec une teneur en liant de 300 kg/m³ et un rapport d'E/C de 0,35 développe une résistance en flexion de 5 à 6,5 MPa à 7 jours et 7 MPa à 28 jours de mûrissement.

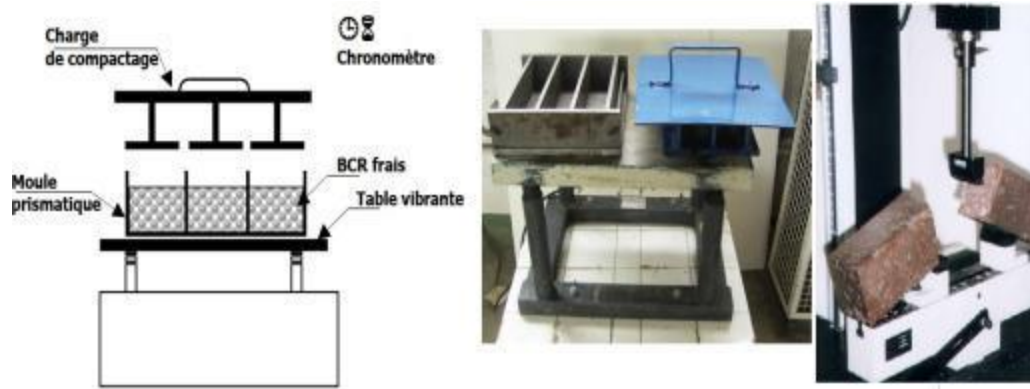


Figure 1.23 : Moule la confection des éprouvettes prismatiques (7x7x28) de BCR et essai de flexion.

D) Écaillage

La résistance à l'écaillage est liée à plusieurs caractéristiques du béton. Le rapport E/C, la teneur en air, la qualité de finition et le type de mûrissement sont des facteurs importants. De manière générale, les BCR sont plus perméables que les bétons usuels, car les vides de compactage sont plus interconnectés et les interfaces pâte-granulat sont plus poreuses [24]. La résistance à l'écaillage est reliée à la perméabilité de la surface, puisqu'une surface poreuse est plus propice à la saturation. L'utilisation de la fumée de silice permet une plus grande homogénéité de la pâte, ce qui permet donc de diminuer la perméabilité et, par conséquent, d'augmenter la résistance à l'écaillage des bétons. La diminution du rapport E/C, l'ajout de fumée de silice et l'application d'une membrane de cure chimique augmentent la résistance à l'écaillage des BCR, mais elles ne suffisent pas toujours à produire des BCR résistants à l'écaillage [23].

La composition des mélanges de BCR est très importante, mais c'est d'abord le malaxage qui permet d'obtenir une bonne homogénéité et ce sont les opérations de mise en place et de compactage qui assurent la qualité de la surface. Ainsi, lorsqu'on décide de faire un pavage en BCR, il est important d'être vigilant à chaque étape afin d'obtenir de bonnes performances.

E) Comportements à la fatigue du BCR

Le BCR présente une résistance à la fatigue supérieure à celle du BC [4]. Malgré cette différence, les méthodes de dimensionnement structural des pavages en BCR sont les mêmes que celles des pavages en BC. Ces études comportent une synthèse des structures types de chaussées en BCR. Le travail présente aussi le logiciel qui a été retenu pour le calcul des épaisseurs de pavage. Ce logiciel s'appuie sur les courbes de fatigue (Figure 1.24) d'un **BCR**

et permet de configurer la majorité des véhicules pour dimensionner les épaisseurs de planchers industriels et de pavage supportant des charges importantes. Les quatre principaux facteurs de conception retenus dans l'obtention des structures types sont: la résistance en flexion du béton en termes de module de rupture, la capacité portante du sol support, les poids, les fréquences de passage et les caractéristiques des véhicules et enfin la période de conception.

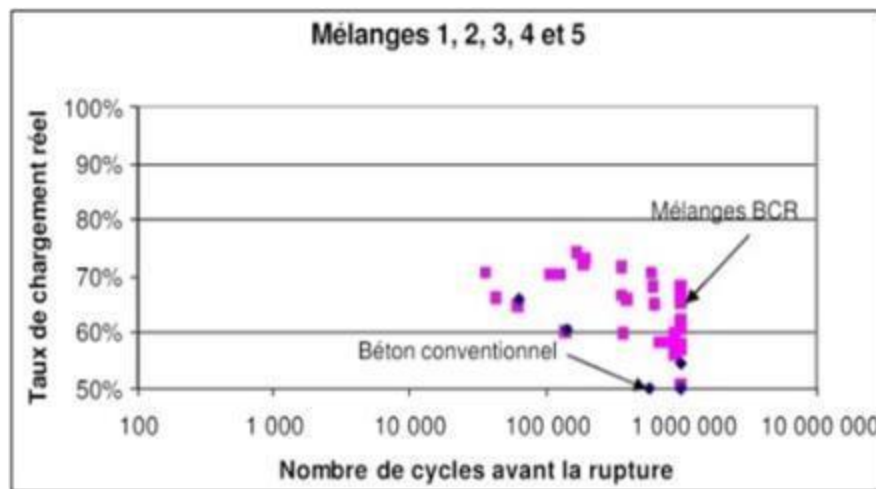


Figure 1.24 : Courbe de fatigue du BCR et du BC [24].

F) Durabilité du BCR

La durabilité du BCR est un aspect très important pour sa compétitivité en tant que matériau de construction. Cette qualité se manifeste particulièrement au printemps, lors de la période de dégel, où le BCR fait preuve d'une résistance notable au ramollissement de sa couche de surface, un problème courant avec les revêtements en bitume (BB). Selon des études menées par l'American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO), environ 61 % des revêtements en bitume subissent des dommages significatifs pendant cette période, tandis que seulement 5,5 % des chaussées rigides en BCR ou en béton sont affectées. Contrairement aux routes en bitume, qui nécessitent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans, les routes en béton n'exigent des réparations mineures qu'après environ 12 ans. Du point de vue de la sécurité, les conducteurs ont tendance à préférer la rigidité du BCR à la souplesse du bitume. De plus, des études menées par l'Université de l'Illinois, notamment celle intitulée "Safety Considerations of Rutting and Washboarding Asphalt Road Surfaces", ont montré que les chaussées rigides offrent généralement une meilleure adhérence et une distance de freinage plus courte que les revêtements en bitume, surtout par temps de pluie.

Du point de vue de la sécurité, l'expérience a montré que les conducteurs préfèrent la rigidité du béton BCR sur la souplesse du bitume bitumineux (BB). En outre, les études faites par l'Université de l'Illinois, notamment celle intitulée "Safety Considerations of Rutting and Washboarding Asphalt Road Surfaces", ont démontré que la chaussée rigide assure, en général, une bonne adhérence et une distance d'arrêt plus courte que les revêtements en BB, surtout en cas de revêtements mouillés. Cela est illustré par la figure 1.25

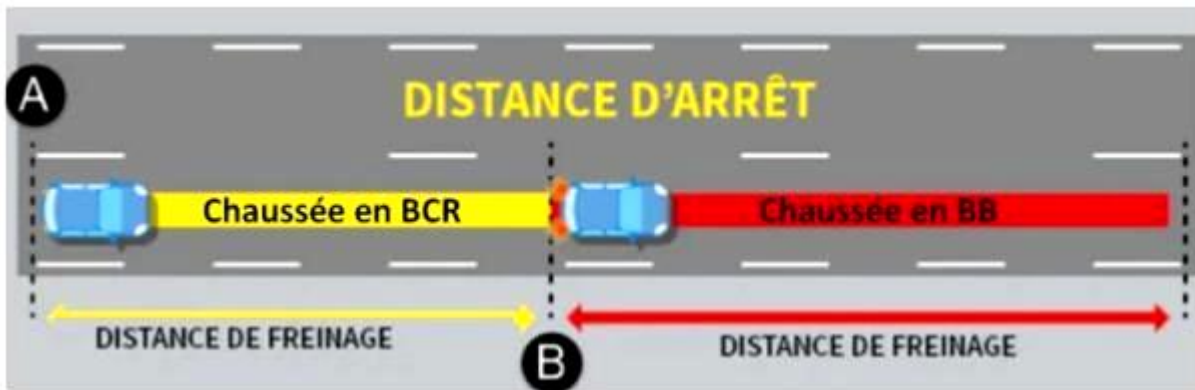


Figure 1.25 : La différence de la distance d'arrêt pour une chaussée en BB et une chaussée en BCR

Les expériences menées par le motoriste Detroit Diesel ont montré que, du point de vue de la consommation d'énergie de carburant, l'estimation de la consommation de carburant d'un camion à 100 km/h sur une chaussée rigide en béton BCR est inférieure de 8% à celle obtenue sur une chaussée en bitume bitumineux (BB) froid et de 17,5% à celle d'une chaussée en BB chaud[24].

En ce qui touche à l'état de surface, il représente l'une des contraintes d'un revêtement en béton compacté au rouleau BCR. Il s'avère moins approprié pour les vitesses de circulation élevées. Cependant, lors de son installation, de nombreuses précautions peuvent être prises.

En général, le béton offre une bonne résistance aux attaques chimiques, à condition d'être correctement compacté, consolidé et formulé. Le Béton Compacté au Rouleau BCR, utilisé dans diverses applications telles que les barrages et les routes de transport, nécessite cependant des études approfondies sur son comportement face aux agressions chimiques.

L'objectif est d'utiliser des matériaux résistants à l'eau et susceptibles d'être compactés. La méthode de formulation et le dosage des constituants doivent permettre au mélange de BCR d'acquiescer les propriétés nécessaires à l'état frais et durci, pour résister aux charges et aux agressions après sa mise en œuvre. La durabilité du BCR dépend principalement de l'agressivité de l'environnement et des charges. Généralement, l'attaque chimique du béton

résulte de la décomposition des produits d'hydratation et de la formation de nouveaux composés. Ces composés peuvent être lessivés s'ils sont solubles, ou causer des dommages s'ils sont insolubles. Les substances agressives agissent généralement en solution. Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est l'hydrate le plus vulnérable, mais les C-S-H et les granulats calcaires peuvent également être attaqués[25].

Les huiles à moteur et autres hydrocarbures se répandent parfois sur les aires de stationnement, les voies urbaines et les pistes des aéroports, se décomposant sous l'effet de la chaleur des gaz d'échappement et réagissant avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ce qui provoque un phénomène de lessivage. Tout comme le béton conventionnel, le BCR contient du ciment Portland, relativement alcalin, ce qui le rend vulnérable aux attaques des acides forts ou de composés pouvant se transformer en acides, en particulier lorsqu'il est utilisé en couche de roulement et non protégé. Parmi les attaques les plus courantes, on trouve celle par le CO_2 . Une concentration de CO_2 entre 30 et 60 % entraîne une attaque sévère, tandis qu'une concentration supérieure à 60 % rend l'attaque très sévère. Le béton peut également être attaqué par des liquides ayant un pH inférieur à 6,5, mais cette attaque ne devient sérieuse que lorsque le pH descend en dessous de 5,5. En dessous de 4,5, l'attaque devient même très sévère. Parmi les substances agressives, on peut citer des composés organiques et inorganiques tels que [25].

Tableau 1.6 : Liste de quelques substances pouvant provoquer de graves attaques chimiques au béton [25].

Acides	
Inorganiques	Organiques
Carbonique	Acétique
Chlorhydrique	Citrique
Fluorhydrique	Formique
Nitrique	Humique
Phosphorique	Lactique
Sulfurique	Tannique
Autres substances	
Chlorure d'aluminium	Graisses végétales et animales
Sels d'ammonium	Huiles végétales
Hydrogène sulfuré	Sulfates

G) Module de Young

Le module d'élasticité ou module de Young caractérise la rigidité du matériau c'est-à-dire la propriété de se déformer de façon élastique, réversible sous l'action d'une charge. Elle est influencée par la propriété de la pâte de ciment hydratée ainsi que celle des granulats.

Le module d'élasticité moyen du BCR est de l'ordre de 30 GPa après 28 jours de mûrissement et est indépendant des variations de température contrairement au béton bitumineux [8].

Nous avons la formule suivante:

$$K = E \times I \quad (1.1)$$

Où

k : rigidité

E : module de Young

I : le moment d'inertie

H) La perméabilité

Des études menées au Québec ont montré que le BCR peut avoir une perméabilité à l'eau du même ordre de grandeur que ceux du béton conventionnel tout en ayant les propriétés mécaniques (Résistance en compression et en traction) supérieures à celles des bétons conventionnels. Le coefficient de perméabilité k est de l'ordre de 10-13 mis [8].

1.13 Avantages et Inconvénients du BCR :

1.13.1 Les avantages du BCR sont nombreux et se résument comme suit :

- 1- Durabilité : Le béton est renommé pour sa durabilité, réduisant ainsi la nécessité de travaux de construction et d'entretien fréquents qui perturbent la circulation [26, 28].
- 2- Moins de travaux d'entretien : Contrairement aux routes asphaltées qui nécessitent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans, les routes en béton ne nécessitent généralement des réparations mineures qu'après 12 ans [28].
- 3- Moins de déformation : La rigidité du béton prévient les déformations causées par le passage de véhicules lourds, contrairement à l'asphalte qui peut s'affaisser sous leur poids ou se plisser à long terme. De plus, le béton ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur [29].

- 4- Meilleure adhérence : Des études ont montré que le béton offre généralement une meilleure adhérence et une distance de freinage plus courte que l'asphalte, surtout par temps de pluie et sur des routes présentant des ornières [30].
- 5- Économies de carburant (jusqu'à 20 %) : La rigidité du béton réduit la déformation de la chaussée sous le poids des véhicules, ce qui entraîne une diminution de la consommation de carburant par rapport aux routes asphaltées, plus flexibles [31].
- 6- La meilleure visibilité nocturne offerte par la chaussée en BCR s'explique par plusieurs aspects. Tout d'abord, la couleur claire du béton lui confère une capacité supérieure à réfléchir la lumière des phares des véhicules et des lampadaires par rapport à l'asphalte, qui est généralement plus sombre. En réfléchissant plus efficacement la lumière, le béton crée un contraste plus net entre la route et son environnement, ce qui permet aux conducteurs de mieux distinguer la configuration de la route et les obstacles éventuels .De plus, la texture souvent lisse et uniforme du béton contribue à une répartition plus homogène de la lumière réfléchie, évitant ainsi les zones d'ombre ou de faible luminosité qui peuvent être présentes sur les routes asphaltées plus rugueuses [31,32].

1.13.2 Les inconvénients du BCR :

Ils sont notamment liés à la qualité et à l'uniformité de sa surface, qui peut être adaptées en fonction des différents types d'applications visées, mais représentent le principal défi de cette technique. La texture de la surface d'un revêtement est évaluée par des méthodes telles que l'essai de tache de sable, qui mesure la profondeur moyenne de la macro texture de la surface (ASTM E 965), ainsi que par d'autres techniques telles que le laser, le texuromètre et la stéréoscopie.

L'uniformité d'une chaussée se réfère à la variation positive ou négative des élévations de sa surface par rapport à une surface plane, comprenant des ondulations longitudinales et transversales. L'uniformité, également appelée confort au roulement, reste un problème relativement limitant pour les applications du BCR où la vitesse des véhicules est une caractéristique importante. L'uniformité de la surface des revêtements en BCR est fortement influencée par les procédures de construction, les variations du degré de compactage, la régularité de la mise en place du finisseur et les opérations de compactage [30-33].

Conclusion

Ce chapitre offre une analyse approfondie du BCR et des principaux mécanismes qui régissent son comportement. La recherche bibliographique souligne que le BCR est reconnu pour ses performances, son coût avantageux et sa durabilité. En ce qui concerne le mélange de BCR, le processus de compactage joue un rôle crucial dans son comportement.

En conclusion tous les recherches précédentes comme suit :

- ❖ Tout comme pour les mélanges de béton conventionnel, les caractéristiques du BCR après durcissement dépendent principalement de la quantité de ciment, du contenu en eau et de la qualité des granulats.
- ❖ Sur le plan physique, la disposition des granulats est principalement influencée par le volume de ciment et la densité du mélange. Un empilement réduit offre une plus grande opportunité aux gros granulats de supporter les contraintes, augmentant ainsi la résistance à la compression.
- ❖ La résistance mécanique du BCR est déterminée par la quantité de pâte entourant les granulats, favorisant la résistance lorsque les gros granulats sont bien agencés dans le mélange de BCR, comparativement au béton conventionnel.
- ❖ Lors de la mesure du module d'élasticité, la courbe contrainte-déformation du BCR montre une pente plus abrupte dans la zone élastique par rapport au béton conventionnel, conduisant à des valeurs de module d'élasticité plus élevées pour le BCR.
- ❖ Le module d'élasticité est influencé par la structure biphasique du BCR, la composition du mélange et la taille maximale des granulats, avec les modèles Trisphère et BAEL considérés comme les plus adaptés pour prédire les modules élastiques.
- ❖ Le compactage augmente significativement les modules d'élasticité en refermant les vides dans le BCR, renforçant ainsi sa résistance.
- ❖ La variation entre les valeurs de résistance à la compression et de modules élastiques mesurées sur trois faces différentes confirme l'anisotropie du BCR.

- ❖ Le processus de vibro-compactage influe considérablement sur le comportement du BCR, car il oriente les gros granulats selon une direction privilégiée sous la pression et la vibration.
- ❖ Les produits d'hydrocarbures ont un impact négatif sur la résistance à la compression du BCR, ce qui souligne sa vulnérabilité aux attaques chimiques.
- ❖ La diminution de la résistance du BCR est notablement affectée par la concentration en CO₂, les niveaux élevés de CO₂ entraînant une baisse significative de la résistance jusqu'à 82% de sa valeur initiale.

En outre, les mélanges de BCR présentent une porosité notable, favorisant l'infiltration des produits d'hydrocarbures et entravant l'hydratation complète du matériau, ce qui affaiblit les liaisons entre les granulats et le liant.

Chapitre 2

*Dégradations des Chaussées Bitumineuses
et Valorisation des Déchets de Béton
Bitumineux (DBB)*

**CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation
des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)**

Introduction

Les infrastructures routières algériennes sont soumises à des sollicitations mécaniques et environnementales sévères qui accélèrent leur dégradation progressive.[37,38] Parallèlement, les opérations de fraisage et de renouvellement des chaussées bitumineuses génèrent d'importantes quantités de déchets de béton bitumineux (DBB), dont la valorisation reste quasi inexistante en Algérie, faute de filière organisée et de données locales sur leurs performances [59,61].

PARTIE A — DÉGRADATIONS DES CHAUSSÉES BITUMINEUSES

2.1 Structure de chaussée et rôle des matériaux dans la durabilité

Une chaussée bitumineuse est un système multicouche dont la fonction principale est de répartir et d'amortir les efforts transmis par les roues des véhicules vers le sol support [41]. Elle est composée de trois couches aux rôles distincts : la couche de surface (revêtement) assure le contact direct avec le trafic et protège les couches inférieures[44] ; la couche de base reprend et distribue les efforts mécaniques[42] ; la couche de fondation assure la liaison avec le sol support et le drainage. La Figure 2.1 illustre la composition structurelle typique d'une chaussée bitumineuse.

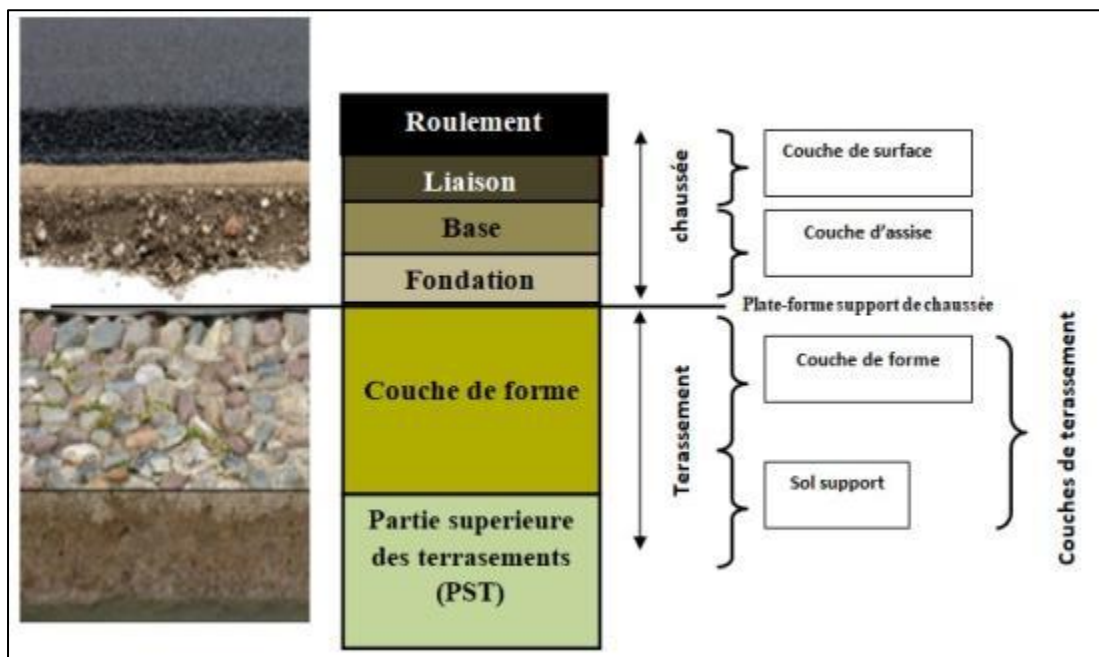


Figure 2.1 : Composition structurelle d'une chaussée bitumineuse — couches et rôles

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation

des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

C'est la couche de surface que cette thèse vise à améliorer, en substituant l'enrobé bitumineux par un BCR intégrant des granulats DBB recyclés. La compréhension des mécanismes de dégradation de l'enrobé justifie directement ce choix.

2.2 Sollicitations mécaniques induites par le trafic lourd

Le trafic lourd constitue le facteur de dégradation mécanique prédominant des chaussées bitumineuses. Chaque passage d'un essieu génère au sein de la structure des états de contraintes complexes. [43] La Figure 2.2 représente schématiquement ces sollicitations :

- Des contraintes de compression verticales en surface, directement sous la zone de contact pneumatique-chaussée, responsables de l'orniérage.
- Des contraintes de traction à la fibre inférieure des couches d'enrobé, à l'origine de la fissuration par fatigue lors de la répétition des cycles de chargement.
- Des déformations de cisaillement dans les couches d'assise, conduisant aux déformations permanentes cumulées.

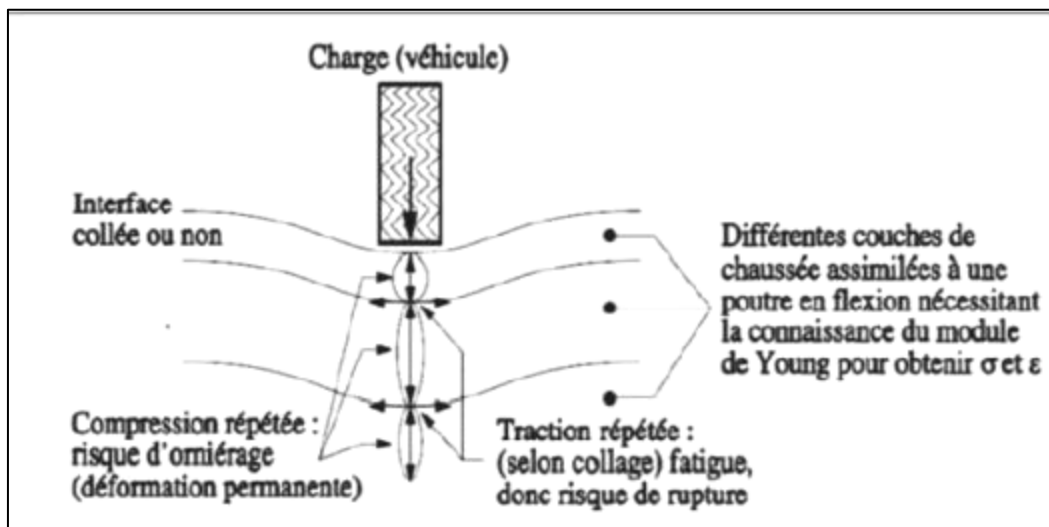


Figure 2.2 : Sollicitations mécaniques induites par le trafic dans la structure de chaussée

2.2.1 Impact des charges lourdes

L'endommagement d'une chaussée suit une loi exponentielle : un essieu de 13 tonnes génère un endommagement environ 16 000 fois supérieur à celui produit par un véhicule léger de 0,5 tonne [43]. En Algérie, la proportion de poids lourds sur les routes nationales a significativement augmenté, dépassant les hypothèses retenues lors du dimensionnement initial de nombreuses chaussées [38].

**CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation
des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)**

2.2.2 Principales pathologies mécaniques

Les dégradations mécaniques observées sur les chaussées bitumineuses algériennes [47,48] sont synthétisées dans le Tableau 2.1. La Figure 2.3 en illustre les manifestations visuelles typiques.

Tableau 2.1 : Principales pathologies mécaniques des chaussées bitumineuses [47, 48]

Pathologie	Mécanisme	Facteurs aggravants
Orniérage	Déformation plastique cumulée sous charges répétées à haute température	Bitume mou, trafic lourd canalisé, haute température
Faïençage (fatigue)	Rupture en traction à la fibre inférieure des couches liées	Sous-dimensionnement, surcharge, bitume vieilli
Fissuration thermique	Contraction différentielle sous gradient thermique	Amplitude thermique élevée, bitume rigidifié
Nids-de-poule	Arrachement local initié par fissuration et eau	Eau d'infiltration, gel-dégel, trafic abrasif
Délaminage	Décollement des couches par perte d'adhérence inter-couches	Interface mal préparée, eau, charges dynamiques

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation

des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

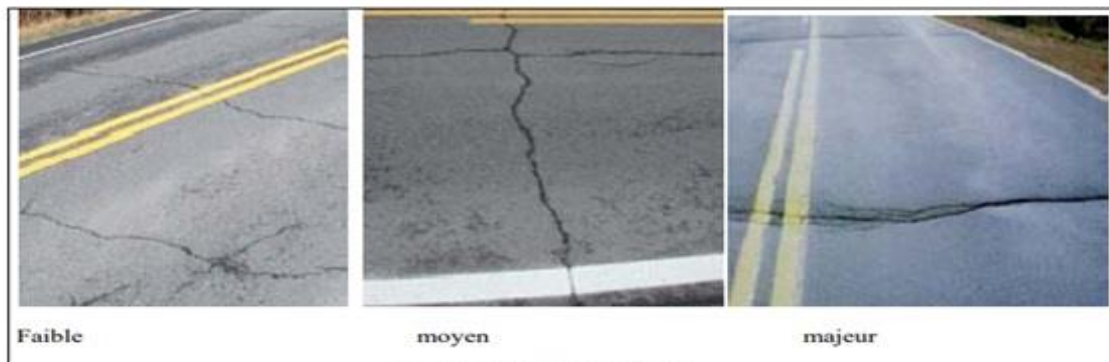


(b) ornières à grands rayons



(c) affaissements

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)



a. Fissures transversales



b. Effondrements

**CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation
des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)**



Figure 2.3 : Types de dégradations observées sur les chaussées bitumineuses algériennes [47]

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

2.3 Facteurs environnementaux et climatiques de dégradation

Les chaussées de l'Algérie occidentale sont soumises à un climat semi-aride caractérisé par des étés très chauds et secs (températures de surface d'enrobé pouvant dépasser 70°C) et des variations thermiques importantes entre saisons, pouvant atteindre 30 à 40°C d'amplitude [49]. Ces conditions amplifient significativement les mécanismes de dégradation par rapport aux hypothèses climatiques des référentiels européens.

2.3.1 Effet des cycles thermiques sur le comportement du bitume

Le bitume est un matériau viscoélastique dont le comportement rhéologique est fortement dépendant de la température. À haute température, sa viscosité diminue, favorisant l'orniérage ; à basse température, il se rigidifie et devient susceptible à la fissuration thermique [52]. La Figure 2.4 illustre les domaines de comportement selon la température et la fréquence de chargement. Les conséquences structurelles sont une réduction de 30 à 50 % de la durée de vie théorique et une multiplication par 3 à 5 des coûts d'entretien [49].

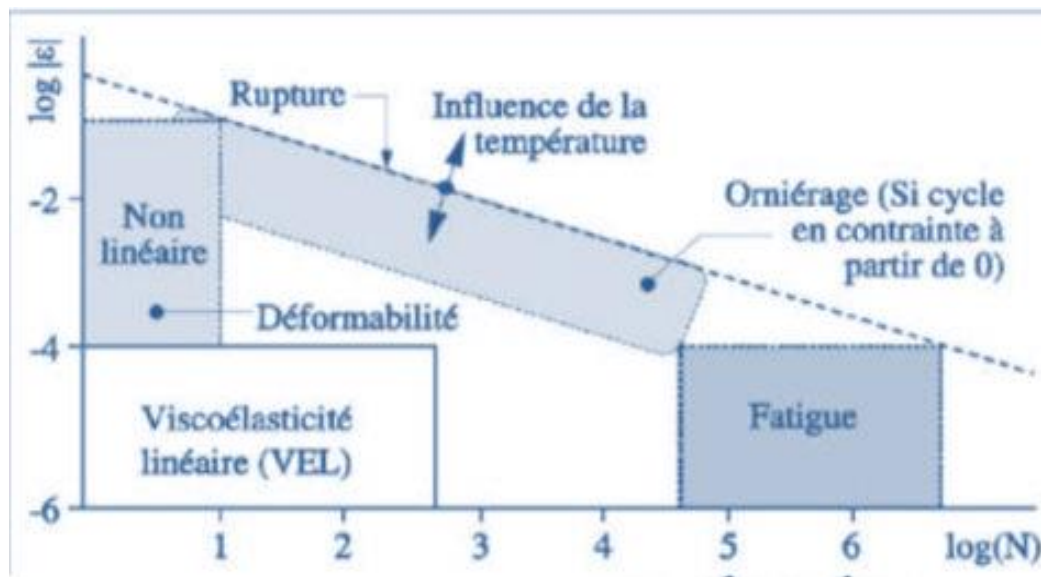


Figure 2.4 : Domaines de comportement des enrobés bitumineux en fonction de la température et de la fréquence de chargement [52]

2.3.2 Rôle de l'eau dans la dégradation des chaussées

L'eau constitue l'un des agents de dégradation les plus actifs des chaussées bitumineuses [49]. Son action se manifeste à trois niveaux : le désenrobage des granulats par rupture du film

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

bitumineux [55], la dégradation structurale par infiltration dans les couches d'assise[47], et l'érosion hydrique superficielle[48]. La perméabilité du matériau de revêtement est donc un paramètre de durabilité central.

2.3.3 Vieillessement oxydatif du bitume

L'exposition prolongée aux UV et aux hautes températures provoque le vieillissement oxydatif du bitume : durcissement progressif, perte de ductilité, réduction de l'adhésivité aux granulats[54]. Les stades successifs ont été documentés : durcissement lors de la mise en œuvre[54], usure normale avec microfissuration[55], surface dégradée à structure solide[56], puis détérioration avancée rendant la chaussée non fonctionnelle[57].

2.4 Attaques chimiques en milieu routier

Les chaussées situées à proximité de réseaux d'assainissement ou en zones industrielles sont exposées à des attaques chimiques. Les sulfates (Na_2SO_4 , MgSO_4) forment des composés expansifs (ettringite, gypse) entraînant gonflements et fissurations[49]. Les acides (H_2SO_4 , HCl) dissolvent la portlandite et décalcifient les hydrates C-S-H, réduisant progressivement la résistance de la matrice. Ces mécanismes sont au cœur de la problématique de durabilité du BCR-DBB étudié dans cette thèse

2.5 État du réseau routier algérien et justification du BCR

2.5.1 Ampleur de la dégradation

Le réseau routier algérien, d'une longueur totale d'environ 112 000 km, souffre d'une dégradation avancée résultant de la combinaison de facteurs climatiques sévères, d'un trafic lourd en forte croissance et d'un entretien préventif insuffisant[37,38]. Les interventions correctives sur chaussées dégradées coûtent de 4 à 7 fois plus cher qu'une stratégie de maintenance préventive.

**CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation
des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)**

2.5.2 Avantages comparatifs du BCR

Tableau 2.2 : Comparaison BCR / enrobé bitumineux pour les conditions de l'Algérie occidentale

Critère	Enrobé bitumineux	BCR
Résistance à l'orniérage	Sensible à haute température (fluage thermique)	Excellente : rigidité indépendante de la T°
Durée de vie estimée	10 à 15 ans	30 à 50 ans
Sensibilité thermique	Élevée : module très variable avec T°	Faible : béton hydraulique stable en T°
Coût initial	faible	élevé : réduit par incorporation de DBB
Bilan économique global	Entretien fréquent, coût cycle de vie élevé	Entretien réduit, coût cycle de vie favorable

PARTIE B — LES DÉCHETS DE BÉTON BITUMINEUX (DBB)

2.6 Définition et origine du DBB

2.6.1 Définition générale

Le déchet de béton bitumineux (DBB), désigné en anglais sous le terme Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), est un matériau granulaire issu du fraisage ou de la démolition de chaussées bitumineuses en fin de vie. Il est constitué d'un squelette granulaire minéral (sable et graviers) recouvert d'un film de bitume vieilli résiduel [66]. Sa teneur en bitume résiduel varie entre 2 et 7,5 % selon l'âge et la nature de la chaussée d'origine [67].

2.6.2 La réalité du DBB en Algérie

En Algérie, les opérations de fraisage et de renouvellement de chaussées génèrent annuellement d'importantes quantités de DBB qui sont, dans la grande majorité des cas, stockées en plein air sans valorisation [59]. La Figure 2.5 illustre le stockage des vieux enrobés sur un chantier. La Figure 2.6 montre les travaux de renouvellement sur la RN5 dans la région de Bouira.

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)



Figure 2.5 : Stockage des déchets de béton bitumineux (DBB) sur chantier .



Figure 2.6 : Travaux de fraisage sur la RN5 : Bouira [58]

2.6.3 Flux des déchets routiers en Algérie

À l'échelle mondiale, environ 47 millions de tonnes de DBB sont produites annuellement en Europe et 72,5 millions de tonnes aux États-Unis[53]. En Algérie, le secteur du BTP a produit environ 11 millions de tonnes de déchets inertes en 2016, dont une part significative de matériaux bitumineux non valorisés[61]. Les Figures 2.7 et 2.8 illustrent respectivement les flux des déchets inertes en Algérie et la composition des déchets de construction en 2019.

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

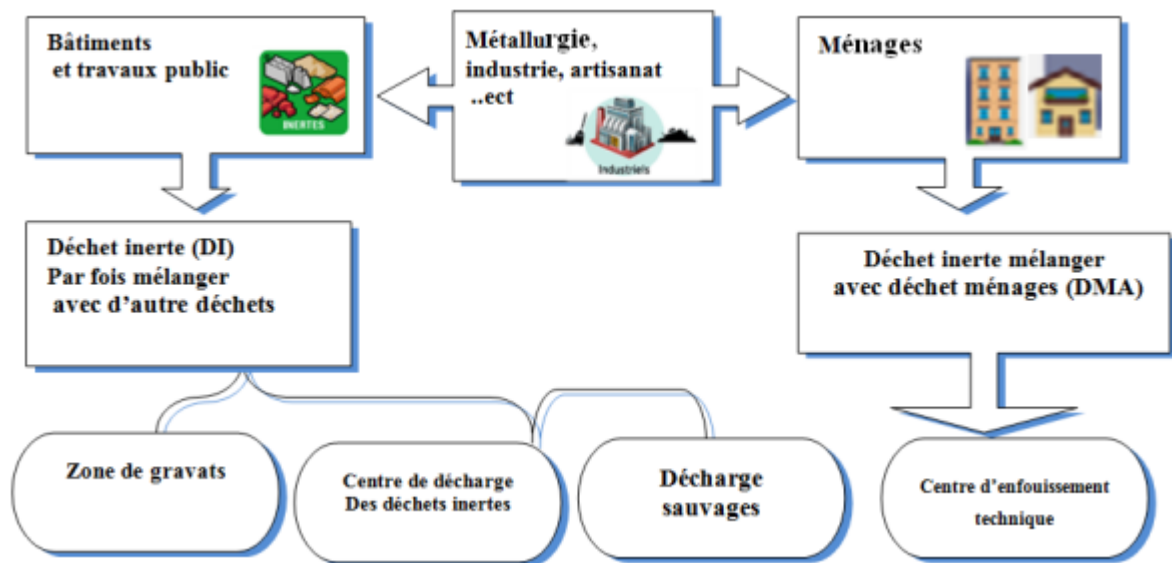


Figure 2.7 : Flux des déchets inertes en Algérie — place des matériaux bitumineux recyclables [61]

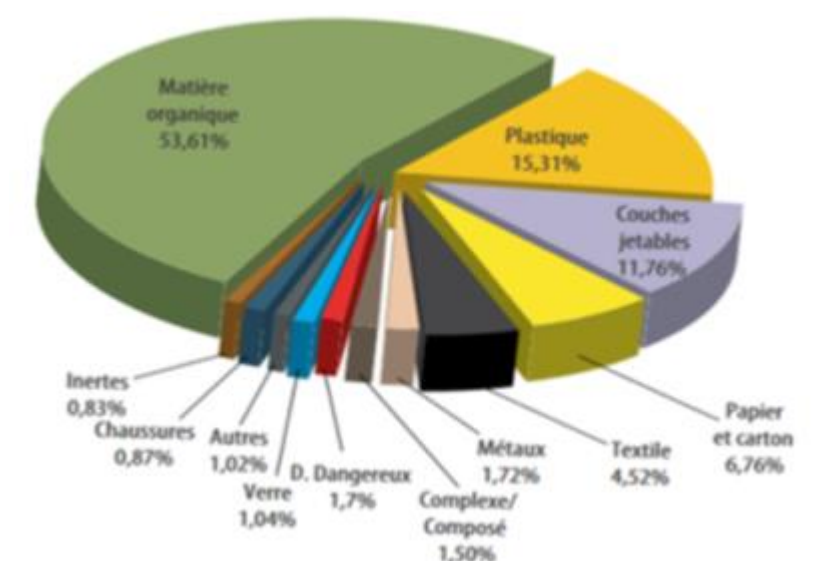


Figure 2.8 : Composition des déchets de matériaux de construction (DMA) en Algérie en 2019 [60]

2.7 Propriétés essentielles du DBB

La présence du film bitumineux hydrophobe à la surface des granulats DBB est la caractéristique fondamentale qui distingue ce matériau des granulats naturels. Elle est responsable d'une densité réduite par rapport aux granulats naturels : remplaçant partiellement le minéral dense ($\rho \approx 2,65 \text{ g/cm}^3$) par du bitume léger ($\rho \approx 1,02 \text{ g/cm}^3$), d'une absorption d'eau limitée, et d'une hydrophobie de surface qui affecte la liaison avec la pâte de ciment [66,67].

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

Si le DBB est extrait via une méthode de broyage incontrôlée, l'absorption d'eau peut augmenter en raison de la contamination par des particules fines[68].

La Figure 2.9 présente les granulats DBB : à l'état de livraison (a) et après séchage et lavage à l'eau (b), traitement systématiquement appliqué avant incorporation dans les mélanges BCR afin d'éliminer les poussières fines susceptibles de perturber l'hydratation du ciment[58].

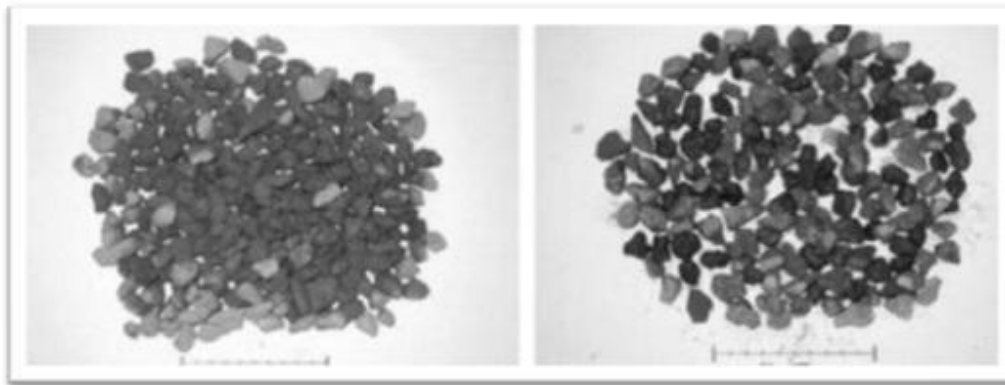


Figure 2.9 : Granulats DBB — (a) à l'état de livraison ; (b) après séchage et lavage [58]

2.8 Valorisation des déchets DBB en Algérie : état des lieux et potentiel

En Europe et en Amérique du Nord, le taux de recyclage du DBB dépasse 90 % dans certains pays[53]. En Algérie, la situation est radicalement différente : les déchets issus des chantiers de fraisage sont majoritairement stockés en plein air, sans traitement ni valorisation[59,61].

Plusieurs obstacles expliquent ce retard : absence de réglementation technique algérienne encadrant l'utilisation des granulats recyclés dans les structures de chaussées[37] ; manque de données expérimentales locales sur les performances des mélanges incorporant du DBB dans les conditions climatiques algériennes.

La présente thèse contribue directement à lever ces obstacles, en fournissant des données expérimentales originales sur les performances mécaniques, la durabilité chimique et le comportement numérique du BCR-DBB dans le contexte spécifique de la région. Ces résultats constituent une base scientifique pour une future normalisation de l'utilisation de ces matériaux recyclés dans les chaussées algériennes.

CHAPITRE 2 Dégradations des Chaussées Bitumineuses et Valorisation
des Déchets de Béton Bitumineux (DBB)

Conclusion

Ce chapitre a établi le cadre scientifique et contextuel qui motive la recherche développée dans cette thèse. L'analyse des mécanismes de dégradation des chaussées bitumineuses algériennes ; sollicitations mécaniques du trafic lourd, effets thermiques et climatiques, infiltration d'eau, attaques chimiques ; met en évidence la nécessité de recourir à des matériaux de revêtement plus durables. Le BCR répond à cette exigence par sa rigidité structurelle élevée, son indépendance vis-à-vis de la température et sa durabilité potentiellement supérieure.

La présentation du DBB a mis en évidence sa caractéristique fondamentale : un film bitumineux hydrophobe qui confère des propriétés spécifiques nécessitant une analyse approfondie. Cette analyse ; classification, propriétés physiques, comportement en matrice cimentaire, ZTI, effets mécaniques , est développée au Chapitre 3.

Chapitre 3

Les mélanges BCR contenant des Granulats DBB.

Introduction

Le béton compacté au rouleau (BCR) représente une technologie de construction routière révolutionnaire qui combine les avantages structurels du béton traditionnel avec la rapidité et l'économie de mise en œuvre des techniques d'enrobage bitumineux. Cette technique consiste à placer un béton à faible teneur en eau, puis à le compacter à l'aide d'équipements de terrassement conventionnels, principalement des rouleaux vibrants.

Le tableau 3.1 met en évidence les plages de taux de substitution étudiées, les propriétés caractérisées et les conclusions des auteurs.

Tableau 3.1 : Synthèse critique élargie de la littérature sur le BCR-DBB

Auteur(s) [Réf.]	Pays	Taux DBB (%)	Type de DBB	Essais réalisés	Résultats principaux
Huang et al. (2005) [40]	USA	0–100%	DBB grossier, fin et combiné	Rc, Rt (fendage), Flexion, Densité, Module élastique	Rc diminue de 9 à 67% selon le taux et le type de DBB. Densité DBB : 2,26–2,63. DBB grossier donne meilleures performances que DBB fin
White et al. (2010) [113]	USA	—	DBB dans chaussées diverses	Analyse cycle de vie (ACV), Émissions CO ₂ , Modélisation climatique	Réduction significative des émissions de CO ₂ avec DBB Impact climatique positif du recyclage. Données quantifiées pour l'ACV
Courard et al. (2010) [57]	Belgique	0–100%	Granulats recyclés de démolition routière	Rc, Flexion, Proctor, Absorption d'eau	Granulats recyclés routiers utilisables dans le BCR. Rc réduite mais acceptable. Absorption d'eau augmente avec le taux de recyclés
Debieb et al. (2010) [92]	Algérie / Belgique	Variable	Granulats recyclés contaminés	Rc, Flexion, Rt, Durabilité, Porosité	Réduction de la Rc avec granulats recyclés contaminés. Durabilité affectée par la contamination. Résistances résiduelles acceptables pour certaines applications
Santero et al. (2011) [107]	USA	—	Matériaux recyclés divers	Analyse cycle de vie complète des chaussées	Revue critique de l'ACV des chaussées. Identification des phases les plus impactantes. Recyclage réduit significativement l'empreinte environnementale
Bilodeau & Doré (2012) [87]	Canada	—	DBB dans enrobés bitumineux	Déflexion, Module, Essais FWD	Méthode de calcul des déformations en traction en fond de couche. Applicable aux chaussées avec DBB
Modarres & Hosseini (2014) [52]	Iran	0–100%	DBB + cendre de balle de riz	Rc, Flexion, Module élastique, Sorptivité	Cendre de balle de riz compense partiellement la réduction de Rc due au DBB. Sorptivité réduite avec DBB hydrophobe. Module élastique diminue de 60% à 100% DBB
Settari et al. (2015) [50]	Algérie	0–100%	DBB de chaussées algériennes	Rc, Proctor, Vébé, Densité	OMC réduit avec l'augmentation du DBB. Rc acceptable jusqu'à 50% DBB. Maniabilité améliorée grâce à l'effet lubrifiant du bitume

Bílý et al. (2015) [88]	Rép. Tchèque	0–50%	DBB local	Rc, Flexion, UPV, Scléromètre	BCR avec DBB présente des propriétés comparables au BCR conventionnel jusqu'à 30%. UPV confirme la qualité du matériau
Abdel-Mohti et al. (2016) [79]	USA	Variable	DBB + matériaux cimentaires supp. (SCM)	Rc, Rt, Flexion, Affaissement, Rhéologie	Béton autoplaçant avec DBB et SCM présente des propriétés rhéologiques acceptables. SCM compensent la réduction de résistance due au DBB
Fakhri & Amoosoltani (2017) [95]	Iran	0–50%	DBB + caoutchouc broyé	Rc, Flexion, Module élastique, Résistance à la traction	Flexion $\geq 3,67$ MPa possible jusqu'à 50% DBB. DBB grossier > DBB combiné > DBB fin. Caoutchouc améliore la ténacité
Singh et al. (2017) [110]	Inde	0–100%	DBB combiné avec ajouts minéraux	Rc, Rt fendage, Porosité, Absorption d'eau, Gel-dégel	Porosité DBB-BCR : 2,4–18% vs 4,2–18,5% standard. Bitume colmate les pores capillaires. Résistance gel-dégel améliorée avec ajouts minéraux
Shi et al. (2018) [108]	USA	Variable	DBB dans béton de ciment Portland	Rc, ACV, Analyse économique, Durabilité	Réduction des coûts de 8 à 46% selon les applications. ACV favorable pour DBB. Durabilité comparable au béton conventionnel jusqu'à 30%
Singh et al. (2018) [111]	Inde	0–100%	DBB grossier et fin	Rc, Rt, Flexion, Attaque sulfatique, Attaque acide, MEB	Dégradation microstructurale en milieu sulfatique. Formation de gypse et ettringite confirmée par MEB. Vulnérabilité accrue avec fort taux DBB
Bashkoul & Divandari (2018) [86]	Iran	0–100%	DBB grossier	Rc, Proctor, Vébé, Densité, Absorption d'eau	OMC diminue avec DBB. Rc reste > 20 MPa jusqu'à 50% DBB. Absorption d'eau réduite grâce à l'hydrophobie du bitume
Debbarma et al. (2019) [93]	Inde	0–100%	DBB grossier, fin et combiné	Proctor modifié, Rc, OMC, Abrasion, Porosité, Sorptivité	OMC réduit de 5–10% avec 100% DBB. Rc diminue avec le taux. Abrasion augmente avec DBB. Porosité variable selon le type de DBB
Aghaeipour & Madhkhan (2020) [81]	Iran	0–100%	Tous types de DBB	Revue : Rc, Rt, Flexion, Durabilité, Porosité, Module élastique	Synthèse complète des propriétés mécaniques et de durabilité du RCCP. Taux optimal 25–50% selon les applications. Lacune sur les attaques chimiques identifiée
Lopez-Uceda et al. (2020) [55]	Espagne	0–100%	Granulats recyclés mixtes	Rc, Flexion, Proctor, Durabilité	BCR avec granulats recyclés viable pour routes à faible trafic. Résistances acceptables. Réduction des coûts confirmée
Morales Fournier et al. (2020) [98]	Cuba / Espagne	Variable	DBB + RCA combinés	Granulométrie, Densité, Absorption, Rc	Combinaison DBB + RCA donne fraction grossière acceptable. Propriétés physiques dans les normes. Cure à l'eau améliore l'hydratation
Boussetta et al. (2020) [49]	Tunisie	0–100%	DBB local tunisien	Rc, Rt fendage, Flexion, Proctor, Modélisation ANSYS 2D	Rc satisfaisante jusqu'à 50% DBB. Bon accord numérique/analytique. Propriétés acceptables pour usage routier à faible trafic
Zdiri et al. (2020) [139]	Tunisie	0–50%	DBB local tunisien	Rc, Modélisation ANSYS 3D, Propriétés analytiques issues de la littérature	Bon accord numérique/analytique (écart < 12%). Propriétés mécaniques de la littérature utilisées. BCR-DBB viable structurellement

Debbarma & Ransinchung (2021) [94]	Inde	0–100%	DBB de différentes sources	Revue critique : Rc, Rt, Flexion, Durabilité, ACV	Réduction de 18% des GES avec DBB. Synthèse de plus de 100 études. Taux optimal entre 30 et 50%. Avantages environnementaux confirmés
Rahman & Khattak (2021) [102]	USA	100%	RCA + DBB combinés	Rc, Rt, Flexion, BCR géopolymère, Attaque sulfatique, DRX	BCR géopolymère avec 100% RCA + DBB présente de bonnes propriétés. Formation d'ettringite en milieu sulfatique confirmée par DRX
Abut et al. (2022) [80]	Turquie	0–50%	DBB de chaussées turques	Rc, Flexion, UPV, Comparaison laboratoire / chantier	Écart laboratoire/chantier < 15%. Performance acceptable à 50% DBB. UPV corrélé avec Rc
Masi et al. (2022) [96]	Italie	0–100%	DBB comme granulats recyclés pour béton	Rc, Rt, Flexion, MEB, Porosité, Absorption	DBB viable comme granulats recyclés jusqu'à 50%. MEB révèle ITZ dégradée. Porosité augmente avec le taux de DBB
Rout et al. (2023) [104]	Inde	0–100%	DBB comme granulats recyclés	Rc, Rt, Flexion, Porosité, Résistance à l'usure	Faisabilité démontrée pour chaussées rigides. Bonne adhérence granulats recyclés/matrice cimentaire. Performances satisfaisantes jusqu'à 50%
Messafah et al. (2024) [141]	Algérie	0–75%	DBB + sédiments de barrage	Rc, Modélisation ANSYS 3D, Analyse des contraintes sous différentes charges	Influence significative du taux DBB sur la distribution des contraintes. Sédiments de barrage améliorent certaines propriétés. Modélisation 3D validée
Chaikaew et al. (2024) [90]	Thaïlande	0–100%	DBB comme substitut des granulats grossiers	Rc, Flexion, Rt fendage, Absorption d'eau, Porosité	Performances acceptables jusqu'à 50% DBB. Au-delà, dégradation notable. Porosité augmente avec le taux de DBB
Oss-Emer & dos Santos (2024) [100]	Brésil	Partiel	DBB dans chaussée semi-rigide	Modélisation mécaniste-empirique, Performance à long terme	Méthode mécaniste-empirique applicable au BCR-DBB. Performance prédite acceptable avec DBB partiel. Modèle validé sur données de terrain
Uygunoğlu et al. (2024) [112]	Turquie	0–50%	DBB de chaussées turques	Rc, Rt, Flexion, Durabilité, Gel-dégel, Carbonatation	Durabilité acceptable jusqu'à 30% DBB. Gel-dégel affecte davantage les mélanges à fort taux DBB. Carbonatation accélérée avec DBB

La gestion des agrégats recyclés d'asphalte (DBB)[69–72] représente un défi majeur pour l'industrie routière. Bien que reconnus comme déchets inertes[73], ils restent largement sous-exploités malgré l'épuisement des granulats de qualité, créant un impact écologique important par leur stockage en décharges[74–77].

L'ampleur du problème est considérable : 85,1 millions de tonnes de DBB stockées aux États-Unis fin 2015[78], avec des proportions similaires attendues en Inde selon Debbarma et al.[93]. Cette accumulation résulte de l'utilisation restreinte dans les nouvelles applications[79] et du manque de savoir-faire technique, particulièrement dans les pays en développement.

L'utilisation du DBB dans les enrobés bitumineux à chaud varie de 15 à 50%[83], mais plusieurs ministères des Transports américains limitent le remplacement à 10-20% pour les couches de surface[82,83] par crainte de compromettre la résistance à la fissuration. La disposition indienne IRC 120[86] recommande 30% pour le recyclage à chaud, mais aucune directive spécifique n'existe pour les applications béton.

Cette utilisation dans les mélanges de béton de ciment constitue un domaine prometteur[80,85–88] de béton compacté au rouleau (BCR)[73,75,79,102–106], pour gérer les excédents. La recherche couvre les mélanges de béton Portland (PCC)[74, 76, 83, 85, 87,88–101], et de béton maigre sec (DLC)[107–109].

Cette diversification offre des perspectives prometteuses pour valoriser ces ressources sous-exploitées, nécessitant toutefois un développement coordonné des compétences techniques et des cadres réglementaires adaptés.

Une avancée majeure dans le développement du BCR concerne l'incorporation de matériaux recyclés, notamment les enrobés bitumineux récupérés (DBB). Cette pratique offre des bénéfices environnementaux notables :

- Réduction significative des déchets de construction
- Diminution des émissions de CO₂
- Préservation des ressources naturelles

De nombreuses autorités publiques encouragent d'ailleurs cette approche par des incitations financières [110,111].

Des recherches ont montré que le BCR incorporant jusqu'à 16% de DBB présente des propriétés de rupture similaires aux mélanges conventionnels, malgré des différences de résistance à la compression [114].

L'incorporation de granulats d'échets du béton bitumineux (DBB - Reclaimed Asphalt Pavement) dans le BCR constitue une approche innovante qui répond simultanément aux défis de la durabilité environnementale et de l'optimisation économique des projets

d'infrastructure. Cette stratégie permet de valoriser les millions de tonnes de déchets bitumineux générés annuellement par les opérations de réfection routière, tout en réduisant la consommation de granulats naturels.

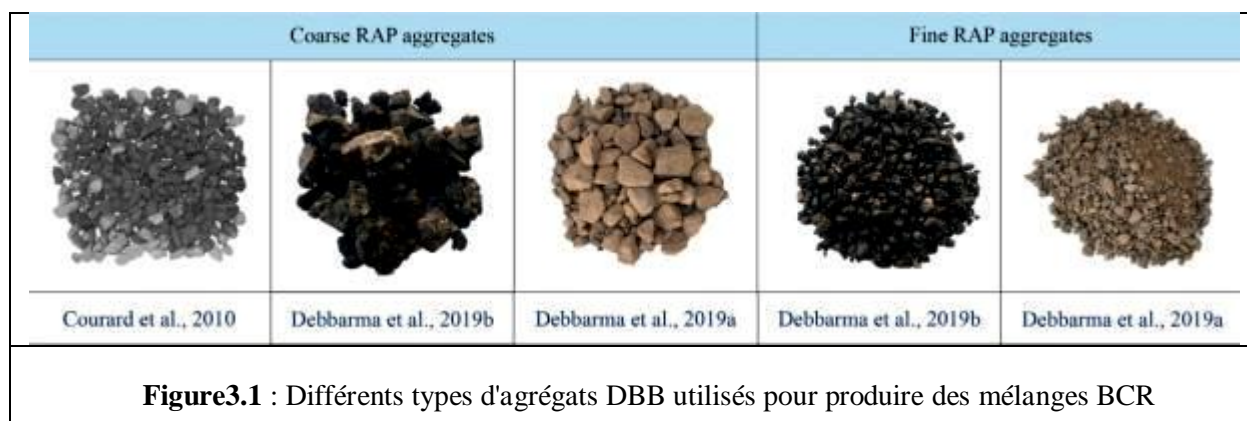
Cette étude analyse de manière exhaustive les effets multidimensionnels du DBB sur les propriétés du BCR, depuis les caractéristiques rhéologiques à l'état frais jusqu'aux performances mécaniques et de durabilité à long terme, en s'appuyant sur les travaux fondamentaux de recherche menés par des équipes internationales.

3 Caractéristiques du DBB et Classification

3.1 Types de DBB et Propriétés Physiques

Les granulats DBB, issus du fraisage des chaussées asphaltiques vieillissantes, présentent une hétérogénéité intrinsèque qui nécessite une classification rigoureuse. Selon les recherches de Debbarma et al. (2019a),[93] ces matériaux sont traditionnellement classés en trois fractions principales basées sur leur distribution granulométrique :

- 1) Le DBB grossier (> 4,75 mm et < 25 mm) se caractérise par une densité relativement élevée et une teneur en bitume modérée, généralement comprise entre 3 et 5% en masse. Cette fraction présente l'avantage d'une manipulation aisée et d'une intégration facilitée dans les mélanges cimentaires.
- 2) Le DBB fin (< 4,75 mm) affiche une teneur en bitume substantiellement plus élevée, pouvant atteindre 6 à 8% en masse, accompagnée d'une granulométrie souvent discontinue qui peut compromettre la compacité optimale des mélanges. Cette fraction requiert une attention particulière lors de la formulation.
- 3) Le DBB combiné, mélange équilibré des deux fractions précédentes, offre des propriétés intermédiaires qui peuvent s'avérer optimales pour certaines applications, comme démontré par Singh et Ransinchung (2018).[110]



3.2 Propriétés Physiques Comparatives :

Les caractéristiques physiques du DBB diffèrent significativement de celles des granulats naturels :

- ✓ Densité DBB : 2,26 à 2,63 (Huang et al, 2005)[40].
- ✓ Densité granulats naturels : 2,6 à 2,9
- ✓ Absorption d'eau : Variable selon la nature hydrophobe du bitume résiduel

Cette différence de densité constitue un paramètre crucial pour la formulation des mélanges et le calcul des proportions optimales.

3.3 Facteurs Influençant la Qualité du DBB

La qualité du DBB, paramètre déterminant pour les performances finales du BCR, dépend de multiples facteurs interconnectés que Monu et al. (2019)[41] ont identifiés comme critiques :

1. L'âge de la chaussée source influence directement la teneur en bitume résiduel et son degré d'oxydation. Les chaussées récentes, fraîsées après quelques années de service, conservent un bitume relativement souple et riche, tandis que les chaussées anciennes présentent un bitume durci et partiellement oxydé, paradoxalement plus compatible avec les matrices cimentaires.
2. Les techniques de récupération déterminent la granulométrie finale et la propreté du matériau. Le broyage contrôlé, réalisé dans des conditions optimisées de température et de vitesse, produit un DBB de meilleure qualité granulométrique avec moins de fines polluantes.
3. Les conditions de stockage impactent directement l'évolution des propriétés du bitume par oxydation progressive, phénomène qui peut être bénéfique dans une certaine mesure pour améliorer la compatibilité avec le ciment.

3.4 Effets du DBB sur les Propriétés du BCR à l'État Frais

3.4.1 Teneur en Eau Optimale(OMC - Optimum Moisture Content): Les mélanges BCR doivent être compactés à l'aide de rouleaux statiques ou vibratoires, ce qui nécessite une conception basée sur les principes de compactage des sols. Cela implique de garantir que la teneur en humidité du matériau soit à un niveau optimal (THO) pour atteindre la densité maximale (DSM) lors du compactage. Pour déterminer ces paramètres, on utilise généralement la méthode Proctor modifiée, conforme à la norme ASTM D1557 [73].

La teneur en eau des BCR fabriqués avec des granulats naturels varie généralement entre 5 et 8 %, exprimée en pourcentage de la masse totale des matières sèches. [81]

L'intégration du DBB tend à réduire généralement la teneur en eau de BCR de 8 à 12 %, principalement en raison de la nature hydrofuge de la couche d'asphalte présente dans le DBB [85].

Cependant, certains chercheurs ont signalé que l'incorporation du DBB pourrait augmenter la teneur en eau jusqu'à 12 %. Cette augmentation peut être attribuée à l'agglomération des particules de DBB, ce qui retient l'eau dans les vides de la structure. [93].

L'ajout de DBB peut diminuer la teneur en bitume en raison de ses faibles capacités d'absorption d'eau. Selon la provenance, l'utilisation de DBB peut également entraîner une augmentation de la teneur en bitume en raison de la présence de particules et de poussières agglomérées.

3.4.2 Densité sèche maximale

Des études ont révélé que l'incorporation de DBB à faible densité réduisait le DSM des mélanges BCR d'environ 5 % et 7 %, respectivement [139]. Cependant, l'utilisation de DBB améliore la maniabilité et la compactibilité des mélanges en raison de l'effet lubrifiant du bitume présent dans le DBB et de la forme moins angulaire de ses granulats. Les variations de la densité des mélanges se sont avérées très minimes, ce qui démontre le potentiel de ces granulats alternatifs, étant donné que la résistance finale du BCR est directement liée à sa densité maximale lors de la mise en place du mélange frais [140].

3.4.3. Temps Vébé

La méthode de la table vibrante, conforme à la norme ASTM C1170, est utilisée pour évaluer la consistance des mélanges BCR rigides et très rigides. Le temps nécessaire pour former un anneau de mortier autour de la périphérie de la surcharge est mesuré comme le temps de consistance Vébé. Selon la norme ASTM C1170, le temps Vébé maximal autorisé est de 60 secondes, tandis que l'ACI 325 recommande un temps Vébé de 30 à 40 secondes pour les mélanges BCR et suggère une fourchette de 50 à 75 secondes [141].

En général, les mélanges BCR présentant un temps Vébé compris entre environ 32 et 39 secondes ont montré des performances satisfaisantes.

À notre connaissance, aucune étude n'a examiné le temps Vébé des mélanges BCR utilisant des granulats alternatifs, à l'exception du caoutchouc en poudre [142]. qui a montré une diminution du temps Vébé de 33 à 27 secondes lorsque le dosage de la poudre de caoutchouc était augmenté de 10 % à 30 %, respectivement. Cette variation est principalement attribuée à la nature hydrophobe du caoutchouc granulé, qui repousse l'eau, libérant ainsi davantage d'eau dans le mélange et réduisant le temps Vébé et l'énergie de compactage.

L'ACI 327 recommande de compacter les mélanges BCR avec un marteau vibrant pendant 15 à 20 secondes ou jusqu'à ce que la pâte de mortier apparaisse autour des coins de la plaque de compactage. Cependant, les mélanges BCR contenant des granulats alternatifs nécessitent généralement un temps de compactage plus long. Pour atteindre leur densité maximale, ces mélanges doivent être compactés pendant au moins 15 à 25 secondes.[143].

3.5 Impact sur les Propriétés Mécaniques

3.5.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est un critère crucial pour le contrôle qualité sur le terrain, nécessitant ainsi une sélection minutieuse des matières premières dès la conception initiale du mélange. Étant donné la complexité de la composition des agrégats alternatifs, leur incorporation peut avoir un impact significatif sur la résistance à la compression finale des mélanges BCR.

Dans le contexte des mélanges DBB + BCR, l'ajout des déchets peut entraîner des baisses de résistance à la compression allant de 9 à 67 %, indépendamment des proportions de DBB utilisées. [144].

Cette diminution est imputable à la présence d'une couche d'asphalte entourant le DBB, qui entrave une adhérence optimale entre le mortier de ciment et les granulats de DBB. Cependant, l'utilisation d'une fraction de DBB plus grossière pourrait contribuer à une réduction de la résistance moindre, d'environ 25 % seulement. En revanche, des réductions de l'ordre de 40 à 60 % pourraient être anticipées lors de l'utilisation de fractions plus fines et/ou d'un mélange d'agrégats de DBB[139].

La résistance à la compression est plus élevée pour le BCR utilisant des granulats naturels. La variation de la teneur en ciment entre 250 et 175 kg/m³ n'a pas un impact significatif sur la densité de l'enrobé. Cependant, la sensibilité de la résistance à la compression à la teneur en ciment tend à maintenir cette valeur minimale à 200 kg/m³[145].

Tableau 3.2 : Compacité et résistance à la compression du BCR avec des granulats naturels et recyclés[145].

	Granulats recyclés DBB	Granulats naturels BCR
Compacité solide	0,809	0,820
Compacité solide efficace	0,864	0,820
Résistance à la compression (7 jours)	23 28	41 46

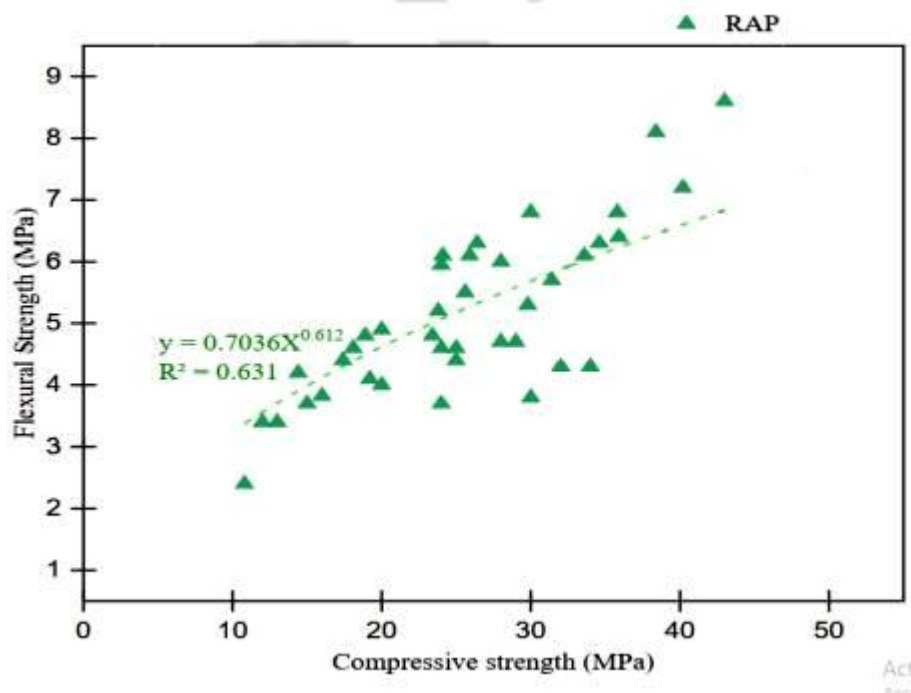


Figure 3.2 :Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion Les données utilisées pour ce modèle sont issues de la littérature « modifier par l’auteur »[134].

3.5.2. Résistance à la traction

La réduction de la résistance à la traction indirecte entre ces deux mélanges est moins marquée, d'environ 40 %. Cette diminution de la résistance peut être attribuée à une adhérence moindre entre le DBB et la matrice cimentaire du béton dans l'enrobé BCR par rapport à celle obtenue avec des granulats naturels, en raison de la présence du film d'asphalte entourant les granulats, comme cela a été rapporté dans [51].

Néanmoins, les caractéristiques demeurent adéquates pour une utilisation routière avec une substitution de DBB allant jusqu'à 60 %, car la résistance à la compression demeure supérieure à 20 MPa et la résistance à la traction indirecte est supérieure à 1,6 MPa, conformément aux exigences pour un béton de chaussée de classe 2 selon la norme française NF P 98-170 (AFNOR, 1992).

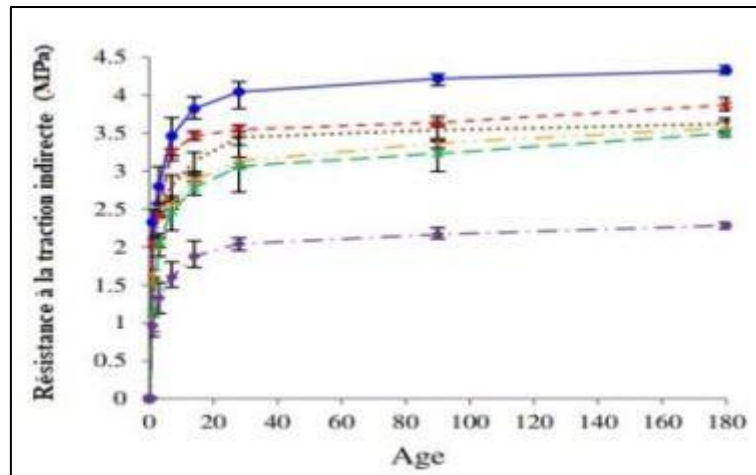


Figure 3.3 : Résistance à la traction indirecte [51].

3.5.3 Résistance à la Flexion

La résistance à la flexion revêt une importance critique pour la conception des chaussées en béton, soumises à des sollicitations dynamiques répétées par le trafic. Cette propriété détermine la capacité du matériau à résister aux contraintes de traction générées par les charges roulantes.

Performances Observées :

Les recherches de Fakhri et Amoosoltani (2017)[45] établissent que :

Valeur cible normative : 3,67 MPa (selon la relation $f_r = 0,7\sqrt{f_{ck}}$)

Atteignabilité : Possible avec des taux de substitution $\leq 50\%$ de DBB

Hierarchie des performances : DBB grossier > DBB combiné > DBB fin

Remarque Critique : La relation normative standard ($f_r = 0,7\sqrt{f_{ck}}$) ne s'applique pas directement aux mélanges DBB-BCR, nécessitant l'établissement de relations empiriques spécifiques basées sur des campagnes d'essais dédiées.

3.6 Autres Propriétés Mécaniques

3.6.1 Résistance à la Traction par Fendage

Les mesures de résistance à la traction par fendage, réalisées selon les protocoles ASTM, révèlent des réductions graduelles avec l'augmentation du taux de DBB :

Réduction de 26% pour 100% de DBB combiné

Réduction de 23% pour 50% de DBB combiné

Réduction de 16% pour 16% de DBB grossier [121].

3.6.2 Ténacité (Effet Positif Notable)

La ténacité, mesure de l'énergie absorbée avant rupture, présente paradoxalement une amélioration significative avec l'incorporation de DBB. [125] documentent :

Augmentation substantielle due à la nature viscoélastique du bitume résiduel

Indice de ténacité :

DBB-BCR : 0,13-0,61

BCR standard : 0,16-0,36

Comportement à la rupture : Évolution d'une rupture brutale vers une rupture progressive et contrôlée

3.6.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité représente la capacité d'un matériau à supporter une déformation élastique réversible sous contrainte axiale [133].

Il est clair que l'incorporation de DBB peut réduire la résistance à la traction.

Il a été constaté que l'utilisation d'agrégats alternatifs a un impact significatif sur le module d'élasticité des mélanges BCR.

L'abaissement du module d'élasticité du BCR avec des matériaux composés à 100 % de DBB est estimé à environ 60 %. Cette réduction est attribuable à l'augmentation de la flexibilité du BCR à mesure que la proportion de DBB augmente. Ceci est dû à la présence du film d'asphalte qui enrobe les granulats de DBB, les rendant ainsi plus flexibles, ainsi qu'à la faible adhérence entre le DBB et la matrice cimentaire dans l'enrobé de BCR[137].

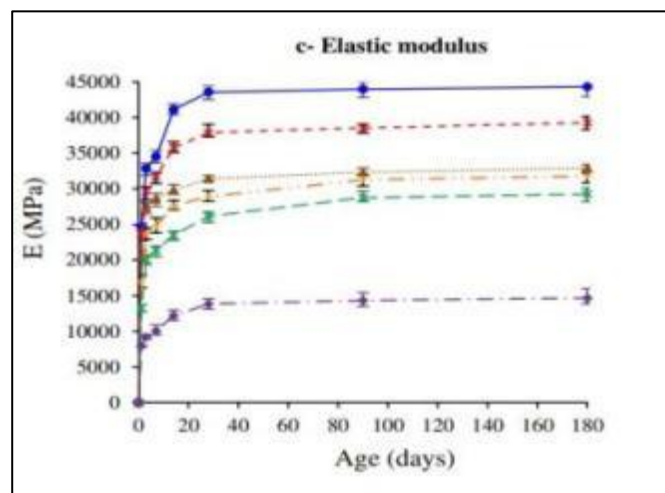


Figure 3.4: Module d'élasticité [51].

3.6.4 Résistance à l'abrasion

En raison de la surface rugueuse des chaussées BCR, il est essentiel d'évaluer la résistance à l'abrasion pour garantir une conduite fluide. Cette résistance dépend principalement de la qualité des granulats utilisés et de la résistance à la compression. Ainsi, l'utilisation d'agrégats alternatifs aux caractéristiques variables comme la densité, l'absorption d'eau, la forme et la texture peut avoir un impact significatif sur la résistance à l'abrasion des mélanges BCR.

Cependant, peu d'études ont été menées à ce sujet. Par exemple, Debarma et al [93]. Ont observé que l'incorporation de DBB augmentait la perte de masse due à l'abrasion, indépendamment de la proportion de DBB ou du type de substitution [139].

La texture de surface du DBB est un facteur crucial dans sa résistance à l'abrasion. Par exemple, l'utilisation de DBB présentant une texture rugueuse et une faible teneur en asphalte peut subir une dégradation moindre face aux forces abrasives, contrairement au DBB à texture lisse et à teneur en asphalte plus élevée, qui est plus susceptible de subir une dégradation accrue. Ceci est également observé dans les mélanges DBB+BCR [139].

3.7 Propriétés de durabilité

3.7.1 Porosité et Absorption d'Eau

La porosité et l'absorption d'eau des mélanges DBB-BCR présentent des comportements contrastés selon les conditions de formulation et les caractéristiques du DBB utilisé.

3.7.1.1 Effets de Réduction de la Porosité

Les mesures réalisées par Singh et al. (2017c) [121] révèlent :

Valeurs observées : 2,4-18% pour DBB-BCR vs 4,2-18,5% pour béton standard

Mécanisme principal : Colmatage des pores capillaires par le bitume résiduel qui agit comme un agent d'étanchéification interne

Bénéfice induit : Amélioration de la résistance aux cycles gel-dégel

Cas d'Augmentation Possible

Paradoxalement, certaines configurations peuvent induire une augmentation de la porosité :

Cause principale : Présence de poussières fines et formation d'agglomérats de DBB mal dispersés

Impact structural : Création de macro-vides supplémentaires dans la matrice cimentaire

Facteur aggravant : Mauvaise liaison à l'interface DBB-pâte de ciment

Facteurs d'Optimisation :

Privilégier les DBB vieillis présentant une faible teneur en bitume mobile

Développer des protocoles de test adaptés (la norme ASTM C642 standard [126] s'avère inadaptée aux mélanges DBB-BCR)

Optimiser les techniques de malaxage pour éviter la formation d'agglomérats

3.7.2 Sorptivité

La sorptivité, mesure de la capacité d'absorption capillaire, présente des variations complexes avec l'incorporation de DBB. Les recherches de Shi et al. (2019)[127].

Diminution possible : Avec DBB fortement hydrophobe réduisant significativement l'absorption capillaire.

Augmentation observée : +20 à 60% dans certains cas, liée à la formation d'agglomérats créant des chemins préférentiels d'absorption.

Cas optimal identifié : 50% de DBB combiné permettant d'atteindre une compacité optimale avec sorptivité réduite.

3.7.3 Réaction alcali- silice (RAS)

La réaction alcali-silice (RAS) est un problème majeur de durabilité dans les structures et les chaussées en béton depuis des décennies. Elle résulte d'une réaction chimique entre la solution alcaline présente dans les pores du béton et la silice des agrégats, qu'ils soient naturels ou synthétiques. L'expansion du gel RAS peut provoquer des contraintes et des fissurations, entraînant ainsi des coûts importants pour la réparation et la réhabilitation du béton. Généralement, le potentiel d'expansion des agrégats est évalué selon la norme ASTM C1260 en mesurant l'expansion des barres de mortier[146].

3.7.3.1 Influences sur la résistance et la durabilité des BCR intégrant des granulats alternatifs

Les mélanges de béton BCR avec des granulats alternatifs sont principalement affectés par la faible qualité de l'interface transitionnelle entre le DBB et la pâte de mortier de ciment, connue sous le nom d'ITZ (zone de transition inter- faciale). La présence d'une couche d'asphalte autour du DBB empêche la formation d'une liaison inter-faciale robuste, créant ainsi une ITZ poreuse et fragile (figure 3.5). En raison des propriétés viscoélastiques de l'asphalte, les fissures se propagent généralement à travers le film d'asphalte plutôt qu'à travers les agrégats. Par conséquent, la défaillance de la cohésion de l'asphalte devient prédominante par rapport à l'adhérence ciment-asphalte dans ces mélanges de béton DBB[147].

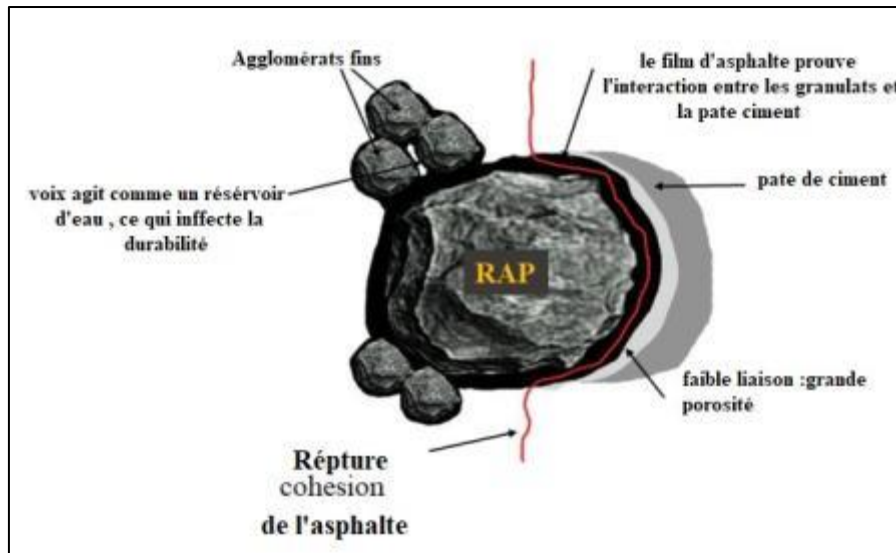


Figure3.5 : Représentation schématique montrant les facteurs affectant la résistance et la durabilité des granulats recyclés (Les images sont réalisées par s . Debbarma et al[134])

La résistance des mélanges DBB+BCR est influencée par plusieurs facteurs : l'ancienneté du DBB, la concentration en asphalte, la taille des particules, et la distribution granulométrique du DBB. L'utilisation de DBB moins oxydé diminue considérablement la résistance, tandis que des concentrations plus élevées en asphalte et des fractions plus fines de DBB peuvent également réduire la résistance. Les particules agglomérées créent des vides d'eau et affaiblissent la structure. Une granulométrie contrôlée du DBB peut améliorer la maniabilité, mais la récupération à pleine profondeur peut entraîner des contaminants. Enfin, une augmentation de la teneur en ciment renforce la résistance à la compression des mélanges BCR avec du DBB .Effet dépendant de la teneur en bitume résiduel

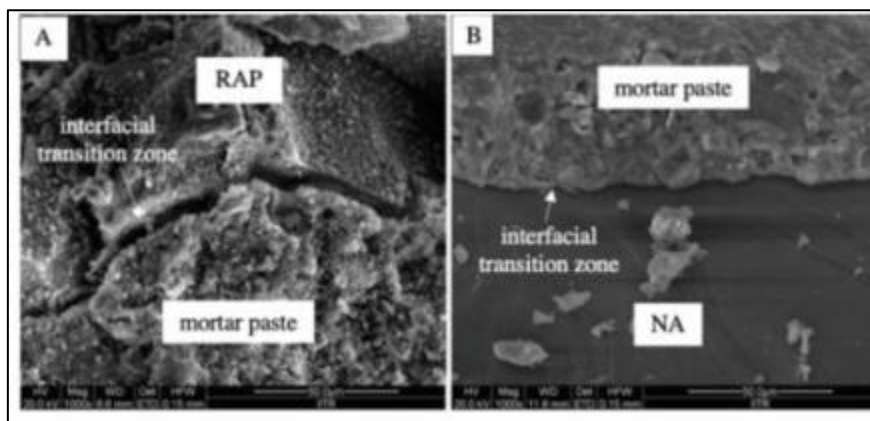


Figure3.6 :Micro graphies SEM de (A)l'ITZ recouverte d'asphalte et (B)l'ITZ normale dans le mélange 50 DBB[134]

3.7.4. Analyse Microstructurale et Mécanismes

3.7.4.1 Zone de Transition Interfaciale (ITZ)

La zone de transition interfaciale entre les granulats DBB et la pâte de ciment constitue le maillon faible des mélanges DBB-BCR. Les analyses microstructurales avancées menées par Brand et Roesler (2017a)[123] au microscope électronique à balayage révèlent :

a) **Caractéristiques de l'ITZ DBB-Ciment** : L'interface présente une structure complexe en multicouches

- Épaisseur du film bitumineux : Approximativement 6-9 µm enrobant uniformément les particules DBB Zone ITZ dégradée
- Épaisseur critique de 40-60 µm présentant des propriétés mécaniques réduites Composition défavorable caractérisée par faible concentration en silicates de calcium hydratés (C-S-H), phases liantes principales Porosité élevée (>25%) créant des points de faiblesse structurelle Teneur élevée en hydroxyde de calcium (CH) sous forme de cristaux orientés Présence d'étrangéité secondaire pouvant générer des gonflements différentiels.

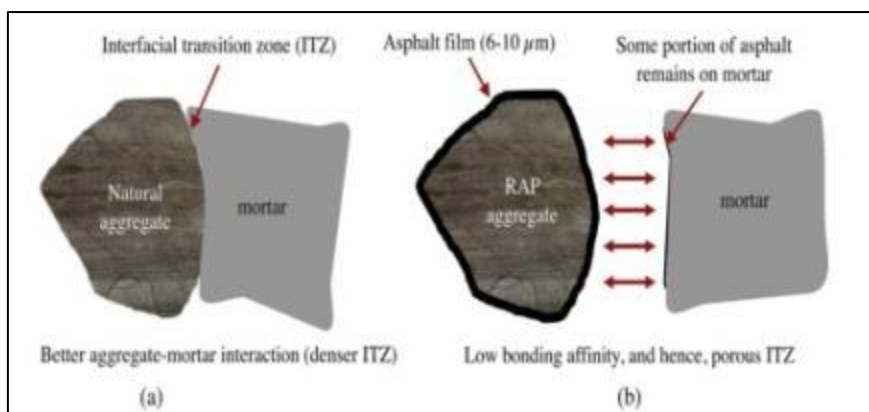


Figure 3.7 : Représentation schématique de l’affinité de liaison dans le BCR réalisée avec (a) des agrégats naturels et (b) des agrégats DB [134]

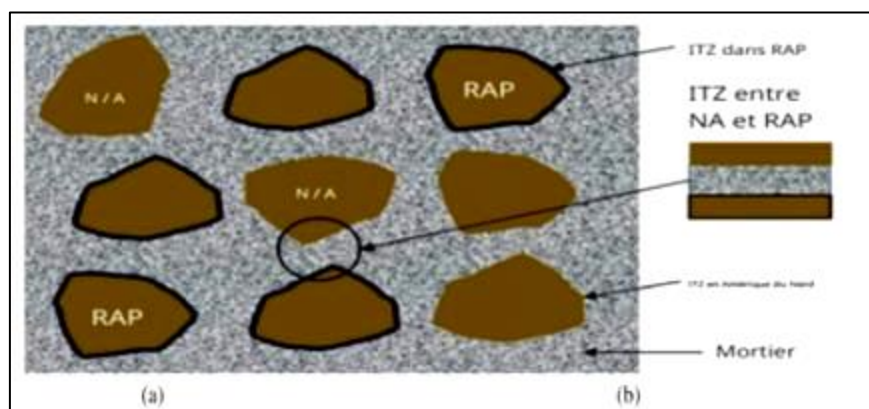


Figure 3.8 : Représentation schématique des deux types de ITZ dans le BCR 50% de DBB

3.7.4.2 Mécanismes de Rupture

La couche d'asphalte hydrophobe constitue une barrière physico-chimique empêchant l'adhérence optimale entre le ciment et les granulats par plusieurs mécanismes :

- 1- Hydrophobie du bitume : Incompatibilité fondamentale avec la phase aqueuse nécessaire à l'hydratation du ciment.
- 2- Hiérarchie des cohésions : La cohésion intrinsèque du bitume demeure supérieure à l'adhérence bitume-ciment, créant un plan de rupture préférentiel.
- 3- ITZ poreuse et hétérogène : Structure facilitant l'amorçage et la propagation des fissures sous contrainte.

3.7.4.3 Conséquences Structurelles :

- Rupture prématurée sous charge avec redistribution des contraintes
- Vulnérabilité accrue aux ions agressifs (chlorures, sulfates)
- Comportement mécanique globalement dégradé avec réduction de la capacité portante

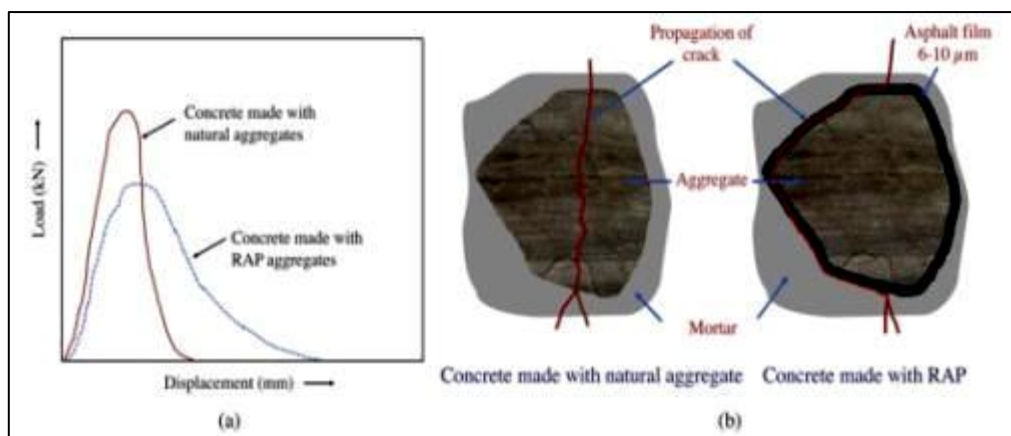


Figure 3.9 : (a) Courbe charge déformation typique, (b) Mécanisme de propagation des fissures dans le BCR +DBB [93].

3.8 Stratégies d'Optimisation

3.8.1 Prétraitements du DBB

3.8.1.1 Vieillissement Accéléré : Le vieillissement contrôlé du DBB constitue une stratégie prometteuse pour améliorer sa compatibilité avec les matrices cimentaires. [128] proposent :

- Objectif technique : Oxydation contrôlée du bitume pour augmenter sa polarité et améliorer son affinité chimique avec le ciment
- Procédés possibles : Exposition à haute température (130-160°C) pendant 24-48h ou irradiation UV prolongée

- Efficacité potentielle : Amélioration de 20-40% de la résistance à la compression selon les conditions de traitement.

3.8.1.2 Lavage et Nettoyage

Les techniques de préparation du DBB jouent un rôle crucial :

- Élimination ciblée des poussières fines et des agglomérats par lavage contrôlé.
- Réduction de la variabilité des propriétés par homogénéisation.
- Amélioration de la compacité finale des mélanges.

3.9 Bénéfices Environnementaux et Économiques

3.9.1 Impact Environnemental

L'évaluation environnementale complète menée par Debbarma et al. (2020)[130] révèle des bénéfices quantifiables significatifs :

- Réduction des émissions : -18% de gaz à effet de serre par rapport aux solutions conventionnelles .
- Diminution du CO₂ : -2% par m³ de béton, impact direct sur l'empreinte carbone des projets
- Valorisation des déchets : Détournement de millions de tonnes de déchets bitumineux des sites d'enfouissement. Préservation des ressources naturelles : Réduction de l'extraction de granulats vierges avec préservation des écosystèmes.

3.9.2 Gains Économiques

L'analyse économique détaillée de Shi et al. (2017)[131] établit des réductions de coûts substantielles :

Mélanges généraux : 8 à 34% pour les applications PCCP (Portland Cement Concrete Pavement) et DLC (Dry Lean Concrete)spécifiquement, Économies pouvant atteindre 46% par rapport aux bétons conventionnels.

- Réduction spectaculaire de 67% des coûts dans certaines applications d'enrobés bitumineux denses ces économies résultent de la combinaison de plusieurs facteurs ,1- coût réduit des matériaux DBB,2- diminution des coûts de transport et de mise en décharge,3-optimisation des formulations.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de parcourir la littérature scientifique relative aux principaux thèmes abordés dans cette thèse. Nous avons passé en revue les différents types de routes, leurs modes de dégradation, ainsi que les caractéristiques des déchets de béton bitumineux (DBB) générés par les opérations de fraisage. Cette lecture approfondie des travaux antérieurs nous a conduits à nous interroger sur la possibilité de valoriser ces déchets comme alternative aux granulats naturels dans la formulation du béton compacté au rouleau (BCR), dans une perspective à la fois environnementale et économique.

En parcourant les études existantes, nous avons remarqué que la plupart d'entre elles ont été réalisées dans des contextes géographiques très différents du nôtre, notamment en Amérique du Nord et en Europe, avec des matériaux dont les propriétés ne reflètent pas nécessairement celles des gisements locaux algériens. Nous avons également constaté qu'aucune étude ne s'est penchée simultanément sur la caractérisation mécanique complète, la durabilité chimique et la modélisation numérique 3D des mélanges BCR-DBB, tout en tenant compte de l'effet de la température de cure dans un climat semi-aride comme celui de région de relizane .

C'est précisément à partir de ces manques que nous avons défini notre démarche de recherche, en cherchant à apporter des réponses concrètes et adaptées au contexte local de l'ouest algérien.

Chapitre 4



Matériaux et méthodes d'essais

Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons tous les essais et les matériaux utilisés au cours de cette recherche. Nous présentons les essais réalisés ainsi que les résultats de caractérisation des granulats, abordons l'identification et la composition des divers bétons BCR, et enfin, expliquons les différentes expériences menées sur ce béton. L'étude expérimentale a été réalisée au niveau des laboratoires suivants:

- ✓ Laboratoire des Matériaux Innovants et Énergies Renouvelables (LMIER) de l'université de Relizane.
- ✓ Laboratoire ENCEP Ecole Polytechnique d'Oran.
- ✓ laboratoire MATIM (Matériaux et Ingénierie Mécaniques) de Université de Reims Champagne-Ardenne, France.

4 Matériaux utilisés :

on utilise le sable, le ciment, deux types de graviers naturel et recycle (déchets de béton bitumineux) chaque type à deux classes 3/8 et 8/15 et de l'eau potable.

4.1Caractéristiques et Préparation des matériaux utilisés:

4.1.1 Ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé calcaire et pouzzolane CEM II/C-M (P-L) 32.5 R. produit par la cimenterie d'Oggaz à Mascara. Conforme a la norme algérienne (NA 17092) et européenne (en 197-5).Les analyses physiques et mécaniques du ciment sont représentées sur tableau 4.1.



Figure 4.1 : Ciment Chamil éco planète

Tableau 4.1 : Analyses physiques et mécaniques du ciment

Analyses chimiques	
Perte au feu%(Na5o42)	11±01
Teneur en sulfates (So3)%	2.4± 0.5
Teneur en oxide de magnesium Mgo%	Max 5%
Teneur en Chlorures (Na5o42)%	<0.1
Composition minéralogique	
C3S%	60-70
C3A%	8±2
Propriétés physiques	
Consistance normal %	27±02
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (Na231)	4800-5500
Retrait à 28j (um/m)	<1000
Expansion (mm)	<10
Temps de prise	
Début de prise	170±20
Fin de prise	250±50
Resistance a la compression	
2j (Mpa)	≥ 10
28j (Mpa)	≥32.5

4.1.1.1 Calcule de la masse volumique absolue du ciment : avec le densimètre le chatelier

$$P_{abs} = \frac{P}{V} = 2.95 \text{ g/cm}^3 \text{ (4.1)}$$



Figure 4.2: Densimètre le chatelier

4.1.2 Granulats

4.1.2.1 Sable

un sable naturel 0/4 provenant d' Oued Ras, région de Chlef (Algérie).



Figure 4.3 :Sable naturel (0/4)

A) Analyse granulométrique

La granulométrie, en effet, permet d'évaluer la répartition par poids des divers composants constitutifs du sable selon leur dimension (Tableau 4.2) pour une quantité de 1kg.



Figure 4.4 :Tamiseuse

Tableau 4.2: Analyse granulométrique de sable

TAMIS mm	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
5	3,1	3,1	0,31	99,69
4	1	4,1	0,41	99,59
3,15	3,2	7,3	0,73	99,27
2	13,8	21,1	2,11	97,89
1,6	11,2	32,3	3,23	96,77
1,25	13,3	45,6	4,56	95,44
1	18,3	63,9	6,39	93,61
0,63	47,6	111,5	11,15	88,85
0,08	844,8	956,3	95,63	4,37
fond	14,7	971	97,1	2,9

B) Module de finesse

Le module de finesse du sable est calculé suivant la norme NF P 18 304 comme suit :

$$MF = \frac{1}{100} \sum Refuscumulés en \% destamis(0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5)(4.2)$$

$$Mf = \frac{3.15+2+1.6+1.25+1+0.63 \times 100}{100} = 2.45 \% \quad \text{notre sable est un sable préférentiel}$$

C)Équivalent de sable : L'équivalent de sable est donné par:

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100(4.3)$$

ES : équivalent de sable mesuré

h1 : Hauteur du sable propre et élément fins

h2 : Hauteur du sable propre seulement



Figure 4.5 : Essai équivalent de sable

Es= 73.08 selon la norme NF P18-541, on a un sable propre à faible pourcentage de fines

4.1.2.2 Gravier

A) Graviers naturels

Le gravier ramené de la carrière de la région de la wilaya de RELIZANE. Dans ce travail on a utilisé deux classes de graviers naturels de 3/8 et 8/15.



Figure 4.6 : (a) graviers naturel classe (3/8), (b) Graviers naturel classe (8/15).

A1) Analyse granulométrique : Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés sur les tableaux suivants :

Tableau 4.3: Analyse granulométrique de Gravier 3/8N

TAMIS mm	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
20	0	0	0	100
16	0	0	0	100
12.5	0	0	0	100
10	0	0	0	100
8	7	7	0.44	99.56
6.3	83	90	5.62	94.38
5	317	407	25.43	74.57
4	416	823	51.43	48.57
3.15	430	1253	78.31	21.69
fond	345	1598	99.78	0.22

Tableau 4.4 : Analyse granulométrique de Gravier 8/15N

Tamisen mm	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés %	Tamisât (%)
20	0	0	0	100
16	74	74	2.44	97.56
12.5	680	754	22.62	77.38
10	781	1535	46.05	53.95
8	765	2300	75.9	24.1
6.3	447	2747	82.41	17.59
5	187	2934	88.02	11.98
4	48	2982	89.46	10.45
3.15	13	2995	89.85	10.15
Fond	5	3000	100	0

4.1.2.3 Gravier du Déchets Bitumineux DBB

Ces granulats sont obtenus par fraisage des anciennes routes bitumineuses provenant d'une décharge de la région de la wilaya de Relizane. Pour notre étude, nous avons employé les deux classes granulaires 3/8 et 8/15 pour substituer les graviers naturels dans la matrice de BCR.



Figure 4.7 : (c) Grapiers DBB classe (3/8), (d) Grapiers DBB classe (8/15).

4.1.2.4 Teneur en bitume des granulats DBB

Selon la littérature, plusieurs techniques sont proposées pour évaluer la teneur en mortier ou en pâte de ciment adhérente. Les deux méthodes les plus utilisés sont:

a) Méthode de la dissolution dans l'acide.

Une quantité 100 (g) de DBB a été immergée dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl) à une concentration de 10 % (en volume) pendant 8 h (Figure 4.8). Ensuite, l'échantillon a été lavé à nouveau avec de l'eau pour éliminer les particules libres et séché dans un four à une température de 105 °C pendant 24 h. Finalement, la teneur en bitume attaché a été détachée à l'aide d'une brosse métallique.

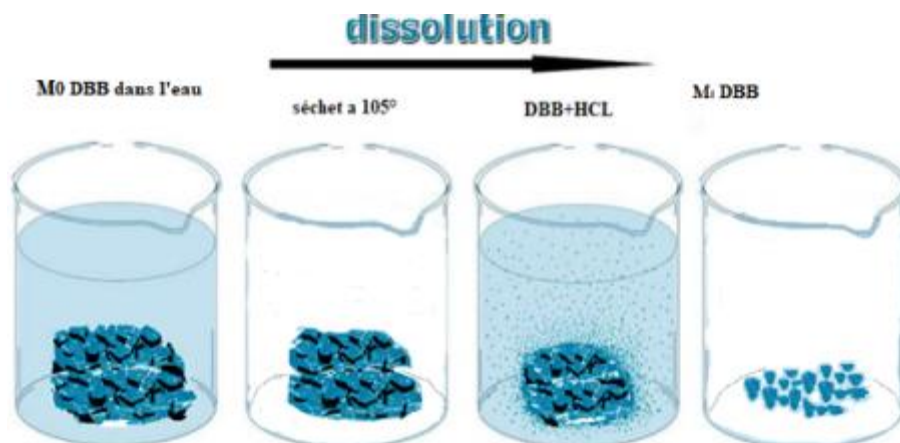


Figure 4.8 : Méthode de la dissolution dans l'acide Chloridrique

La teneur en bitume a été estimée par la relation :

$$T\% = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (4.4)$$

Le résultat obtenu est une teneur en bitume de 5.9 %

b) Méthode de l'expansion thermique

L'échantillon est immergé dans l'eau pendant 2 h pour une pré-saturation. Puis, l'échantillon est séché dans un four à une température de 500 °C pendant 2 h (Figure 2.5). Ensuite, l'échantillon est immédiatement immergé dans de l'eau froide. Ce refroidissement brusque provoque des chocs thermiques qui permettront de faire décoller le bitume résiduel. En fait, une faible teneur en bitume attaché reste généralement attachée, ce dernier est détaché à l'aide d'une brosse métallique.

La teneur en bitume a été estimée par la relation :

$$T\% = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (4.4)$$

Bien que cette approche ait permis une première appréciation visuelle et quantitative du film bitumineux adhérent, elle ne constitue pas une méthode normalisée et présente des limites en termes de reproductibilité et de précision, notamment en raison des pertes de matière lors du nettoyage mécanique.

Le résultat obtenu est une teneur en bitume de 4.1 %,

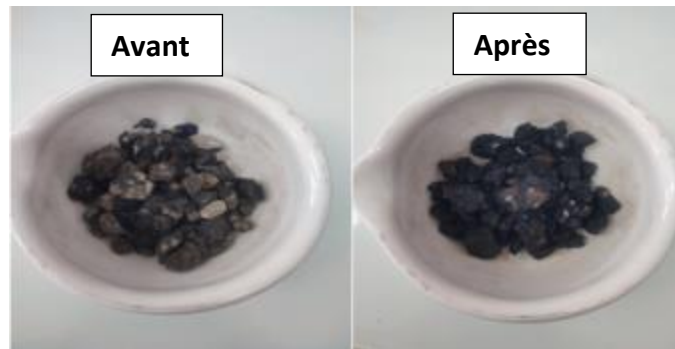


Figure 4.9 : Teneur en bitume des granulats de **DBB**.

Le tableau 4.5 récapitule la teneur en mortier attaché déterminée par les deux méthodes.

Tableau 4.5. Teneur en bitume attaché des granulats DBB

Méthode	Chimique	Thermique
Bitume attaché en(%)	5.9%	4.1%

Donc en prend 5.5% comme moyen , c'est valeur cohérente avec les données de la littérature qui rapportent des teneurs variant de 2 à 7,5 % selon la fraction granulaire, la méthode d'extraction et les conditions de service du matériau [51, 93].

Gravier 3/8 DBB

Tableau 4.6 : Analyse granulométrique de Gravier 3/8DBB

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cummulé (g)	Refus cummulé (%)	Tamisats cumulé (%)
20	0	0	0	100
16	0	0	0	100
12.5	0	0	0	100
10	0	0	0	100
8	18	18	1.125	98.87
6.3	453	471	29.44	70.56
5	574	1045	65.31	34.69
4	462	1507	94.18	5.82
3.15	74	1581	98.81	1.19
Fond	11	1592	99.5	0.5

Gravier 8/15 DBB

Tableau 4.7: Analyse granulométrique de Gravier 8/15DBB

TAMIS (mm)	Refus (g)	Refus cummulé (g)	Refuscummulé (%)	Tamisats (%)
20	0	0	0	100
16	41	41	1.36	98.64
12.5	691	732	21.96	87.04
10	993	1725	51.75	48.25
8	1008	2733	81.99	18.01
6.3	156	2889	86.67	13.33
5	30	2919	87.57	12.43
4	20	2939	88.17	11.83
3.15	15	2954	88.62	11.38
Fond	43	2997	89.91	10.09

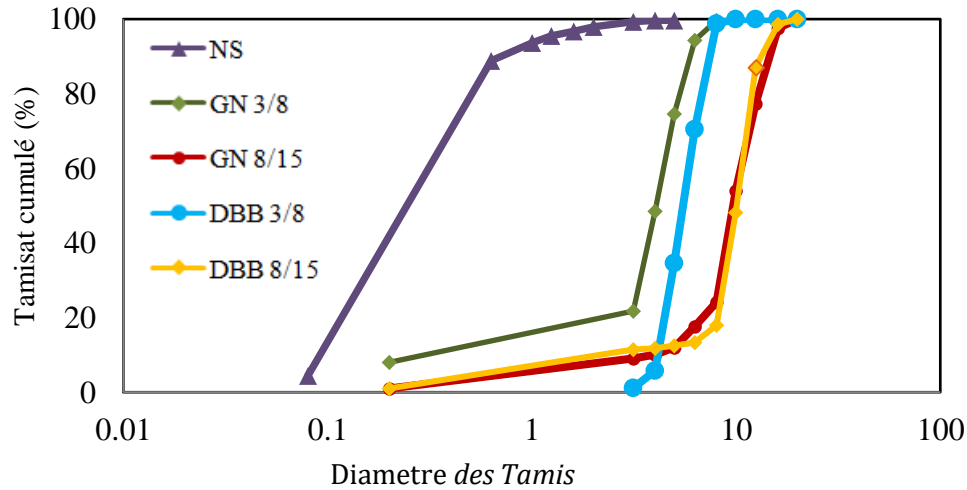


Figure 4.10 : Courbe granulométrique

Les propriétés sont récapitulées dans le Tableau 4.7.

Tableau 4.8 : Masse volumique des granulats

Type de granulats	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Sable 0/5	1.446
Gravier 3/8 N	1.3
Gravier 8/15N	1.37
Gravier 3/8 BB	1.15
Gravier 8/15 BB	1.09

4.1.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage pour le béton est de provenance du réseau d'eau potable de la commune Bermadia (wilaya de Relizane), est pure et conforme à la norme [NFP 18-303] [62].

4.2 Formulation du béton compacté au rouleau (BCR)

Dans la littérature, on retrouve un grand nombre d'approches et méthodes de formulation pour les BCR, nous avons retenu pour notre étude la méthode dite celle de « DREUX-GORISSE » cette méthode qui est purement expérimentale nous semble très pratique et ne demande pas beaucoup de moyen pour son application. Nous avons respecté les étapes et le mode opératoire de laboratoire tel qu'il est. A fin de voir l'influence de la méthode de composition sur les propriétés fraîche et durcis du béton

La teneur volumique du béton en ciment est fixée à 250 kg/m^3 de leur compacité. On note que les auteurs ne précisent pas comment a été mesurée la compacité des gravillons. Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le béton est convenablement formulé.

De même, afin d'assurer une compacité suffisante au béton, ils fixent le volume de sable du volume total du béton. Il est important de noter que les auteurs excluent du terme sable toutes les fines inférieures à $90 \mu\text{m}$, qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants. Les taux de substitution retenus de DBB (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %) dans les mélanges ont été choisis de façon à couvrir l'ensemble de la plage de substitution potentielle, permettant ainsi d'identifier le seuil optimal à partir duquel les performances mécaniques deviennent insuffisantes pour un usage en revêtement routier. Le pas de 25 % offre une résolution suffisante pour tracer des courbes d'évolution des propriétés en fonction du taux de DBB, conformément aux recommandations de l'ACI 325.10R-95 et aux pratiques des études de référence [7,93]. Le taux de 0 % constitue le mélange témoin (BCR0) servant de référence absolue.

4.2.1 La formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse

pour trouver les quantités des granulats utilisés ont adopté la méthode « Dreux-Gorisse », fixons la quantité de ciment de 250 kg/m^3 sur tous types de mélange BCR.

Suivant la méthode de Dreux et Gorisse on a trouvé les pourcentages des granulats utilisés comme suit :

- Sable = 32%
- Gravier 3/8=13%
- Gravier 8/15=55%

Donc dans $1\text{M}^3 = 1000\text{L}$ de béton on a :

- Ciment (C) = 250 Kg/m^3
- Sable (s) = 631.7 Kg/m^3
- Gravier (G3/8N) = 258.5 Kg/m^3
- Gravier (G8/15 N) = 976.1 Kg/m^3

4.3. Méthode de compactage du BCR en laboratoire

4.3.1 Essai Proctor Modifié (NF P 94-093)

En laboratoire, le compactage du béton compacté au rouleau (BCR) a été réalisé en appliquant une énergie équivalente à celle d'un rouleau compacteur sur chantier. Pour cela, nous avons

utilisé l'essai Proctor modifié, une méthode standardisée permettant de déterminer les conditions optimales de compactage.

4.3.1.1 Principe de la méthode

Cet essai implique le compactage d'un échantillon de BCR dans un moule normalisé, utilisant une dame normalisée, selon une procédure précise. Après le compactage, la teneur en eau et le poids spécifique de l'échantillon sont mesurés. Cette opération est répétée plusieurs fois sur des échantillons préalablement portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\gamma_d ; \omega$), on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.



Figure 4.11 : Essai Proctor Modifié

4.3.1.2 Détermination de l'optimum Proctor

a) Caractérisation du BCR par l'essai Proctor modifié

Le BCR est compacté après malaxage pour ajuster ses propriétés mécaniques, nécessitant l'utilisation de finisseurs et de rouleaux. Ses caractéristiques, telles que densité et résistance, influencent son utilisation en couches de chaussée. La recherche de la teneur en eau optimale est cruciale pour sa compacité et sa durabilité, et cette étude vise à déterminer cette teneur idéale pour un compactage maximal. Une nouvelle méthode basée sur la compactibilité du BCR est proposée. L'analyse des résultats présentés révèle une tendance cohérente concernant l'influence du DBB sur la teneur en eau optimale (OMC) des mélanges de béton compacté au rouleau. Les valeurs d'OMC des mélanges incorporant du DBB se situent généralement entre 3% et 7% du poids total, avec une diminution progressive en fonction de l'augmentation de la teneur en DBB [52]. L'amplitude de cette réduction varie selon les études [52] ; ont rapporté une diminution de l'OMC comprise entre 8,5% et 12%, indépendamment de la granulométrie du DBB utilisé. De manière similaire, Debbarma et al. (2019) [93] ont observé une réduction de 5% à 10% dans les mélanges de BCR incorporant 100% de DBB en remplacement total

des granulats naturels. Cette diminution de la teneur en eau optimale s'explique principalement par les propriétés physico-chimiques du DBB. Les granulats recyclés d'enrobés bitumineux sont recouverts d'une pellicule de bitume résiduel présentant un caractère hydrophobe. Cette couche limite considérablement l'absorption d'eau par rapport aux granulats naturels poreux, réduisant ainsi la demande globale en eau du mélange pour atteindre la densité maximale lors de la compaction. Le bitume agit également comme lubrifiant, facilitant le réarrangement des particules durant le compactage avec une quantité d'eau réduite.

b) Teneur en eau optimale et densité sèche

Le BCR est similaire à un sol légèrement humide, nécessite une quantité d'eau optimale pour atteindre la densité maximale. L'objectif est d'obtenir un serrage maximal pour un mélange granulaire de BCR. Nous utilisons la méthode de Proctor modifié pour déterminer cette teneur en eau optimale, basée sur la compaction dans un moule avec une dame standardisée. Les essais sont effectués avec différentes teneurs en eau, et les résultats sont représentés graphiquement pour déterminer l'optimum Proctor. Nous avons choisi le moule CBR adapté aux sols grossiers, avec un diamètre de grain maximal de 20 mm. Les quantités de matériaux nécessaires sont calculées conformément à la méthode Proctor modifié.

Nous avons calculé le volume du moule V . Nous avons pesé aussi le moule vide avec son embase P_1 . Après confection de l'éprouvette nous avons pesé de nouveau le moule plein P_2 , le poids volumique humide est déterminé par l'équation 1 :

Plusieurs essais sont réalisés avec différentes teneurs en eau. Pour chaque essai, on mesure la densité sèche obtenue après compactage. En traçant la courbe de la densité sèche γ_d en fonction de la teneur en eau, on identifiant l'optimum Proctor.

pour calculer la teneur en eau optimale de chaque type de BCR avec les substitutions des graviers naturel par des graviers de DBB comme suite : (0%, 25% , 50% , 75% , 100%) .

$$V_0 \text{ Proct} = 4L \quad (4.5)$$

Donc on trouve que : $S_N = 2.53\text{kg}$, $G_{N\ 3/8} = 1.03\text{Kg}$, $G_{N\ 8/15} = 3.90\text{kg}$.

Pour calculer les γ_h et γ_d avec :

$$\gamma_h = \frac{P_2 - P_1}{V} \quad (4.6)$$

Le poids volumique sec ou la densité sèche est déterminé par la formule 2 :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + \omega)} \quad (4.7)$$

Tableau 4.9 : Calcul des poids en fonction de quantité d'eau pour 4%, 6%,8% ,10%

Sub% W %	0%	25%	50%	75%	100%
4%	12.199kg	12.429	12.079	12.084	11.86
6%	12.663	12.610	12.437	12.342	12.15
8%	12.822	12.585	12.39	12.250	12.21
10%	12.692	12.069	/	/	12.06

Tableau 4.10:Densité humide γ_h (Kg/m³)

W% BCR	0%	25%	50%	75%	100%
4%	2.26	2.35	2.22	2.22	2.14
6%	2.43	2.42	2.35	2.31	2.25
8%	2.49	2.40	2.33	2.28	2.27
10%	2.37	2.22	/	/	2.218

Tableau4.11: Densité sèche γ_d (Kg/m³)

W% BCR	0%	25%	50%	75%	100%
4%	2.17	2.26	2.13	2.13	2.057
6%	2.29	2.28	2.21	2.17	2.12
8%	2.30	2.22	2.11	2.07	2.10
10%	2.15	2.02	/	/	2.016

4.4 Étapes de confection du béton

Dans cette partie on explique le mode de travail de notre étude, après la détermination des quantités des composants de chaque méthode pour un mètre cube de béton, on doit transférer les quantités pour un volume d'éprouvette de 10×10×10 cm³et 7×7 ×28cm³.



Figure 4.12 : Malaxeur à béton à axe horizontale

4.4.1 Procédure expérimentale

4.4.1.1 Séquence de malaxage : Les BCR élaborés en laboratoire sont introduits dans un malaxeur équipé d'une cuve rotative horizontale d'une capacité de 100 litres, les séquences de malaxage des mélanges de BCR est comme suit:

1. Peser les quantités des composants de BCR correspondants au volume calculé pour chaque type de béton
2. Incorporer le mélange, et si nécessaire, les granulats recyclés (DBB) et mélanger pendant 30 secondes .
3. Sans interrompre le malaxage ajouter de l'eau de gâchage, puis malaxer pendant 3 minutes.
4. Arrêter le malaxage



Figure 4.13 : Masse volumique BCR

4.4.2 Procédures des essais à l'état frais

4.4.2.1 Maniabilité (temps Vébé)

Pour mesurer la maniabilité, on utilise l'appareil Vébé (voir figure 4.14). Cet appareil se compose d'une table vibrante (A), d'un récipient (B) et d'une surcharge de 23,2 kg (C).

Conformément à la norme ASTM C 1170, l'essai consiste à remplir le récipient avec 14 kg de béton frais. Une fois le récipient fixé sur la table vibrante, la surcharge est placée à l'intérieur. Ensuite, la vibration est appliquée à l'échantillon jusqu'à ce qu'un anneau de pâte se forme à la base de la surcharge. Le temps Vébé correspond au laps de temps entre le début de la vibration et la formation de cet anneau de pâte.



Figure 4.14 : Essai Vébé

4.4.2.2 Mesure du pourcentage d'air occlus

La mesure de la teneur en air se fait à l'aide d'un air-mètre à pression d'air (Figure 4.15). Suivant une procédure similaire à la norme CSA A23.2-4C, à l'exception de la manière dont le béton est disposé dans le récipient.

Pour cela, l'échantillon utilisé pour l'essai de la masse volumique est également employé.



Figure 4.15 : Airomètre à pression d'air essai de l'air occlus

4.4.2.3 Programme de préparation des éprouvettes

Pour étudier l'impact des granulats DBB sur la performance du BCR, nous avons préparé quatre mélanges avec différents niveaux de granulats DBB de classe 3/8 et 8/15 avec

substitution s : 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Nous avons comparé ces mélanges à un mélange de référence ne contenant que des granulats naturels, sans déchets béton bitumineux. Les granulats DBB ont été introduits dans le BCR pour remplacer une partie des granulats naturels (BCR0% témoin).

a) Étapes de réalisations

1- Le compactage a été réalisé à l'aide d'un marteau vibrant conforme à la norme NF EN 12697-32+A1[61] (figure4.16).

2- Nous exposons les éprouvettes à différentes températures, 20°, 40° et 60°C,

3- en les recouvrant d'une cure humide avant de les démouler 24 heures après leur préparation.

4- Ensuite en les remettre dans différents milieux à mêmes températures précédentes jusqu'au moment des tests. (figure 4.17) montre les étapes.



Figure 4.16: Marteau vibrant HILTI.



Figure4.17: Étapes de réalisations de BCR au laboratoire

Des éprouvettes cubiques de dimensions 100x100x100 mm³ ont été employés pour évaluer la résistance à la compression, mesurée à l'aide d'une presse à béton et aussi à l'absorption d'eau,

essai abrasion et aussi pour l'essai de sportivité (pesé hydrostatique) .quant à l'essai de flexion, des échantillons prismatiques de dimensions 70x70x280 mm³ ont été utilisés.

4.5 Essais non destructifs

4.5.1 Ultrason (UPV)

L'ultrason dans le béton est une méthode non destructive qui utilise des ondes sonores à haute fréquence pour évaluer la qualité et l'intégrité du matériau. En mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers le béton, les ingénieurs peuvent détecter les défauts internes tels que les fissures et les vides, fournissant ainsi des informations précieuses sur la durabilité et la fiabilité des, structures en béton voir figure 4.18.



Figure 4.18 : Mesure de l'UPV des BCR.

4.5.2 Essai au scléromètre

Évalue la résistance du béton en mesurant le rebondissement d'une masse lâchée sur sa surface. Cette méthode simple et non destructive permet de contrôler rapidement la qualité des ouvrages en béton. Développé par Ernst Schmidt en 1948[71].

cet essai, également connu sous le nom d'essai au marteau Schmidt, reste largement utilisé malgré les défis associés à l'impact et à la propagation des ondes, comme souligné par T. Akashi et S. Amasaki en 1984[72].



Figure 4.19:Essai au scléromètre

4.6 Essais destructifs

4.6.1 Essai de compression

La résistance à la compression à été évaluée à des âges de 2, 7 et 28 jours selon les normes ASTM C39/C39M-11a , ASTM C496 .

La résistance à la compression du BCR est essentielle pour évaluer la qualité du béton, en particulier pour les pavages. Les essais en laboratoire sur des éprouvettes permettent de mesurer cette résistance. Le principe consiste à soumettre les éprouvettes à une charge jusqu'à la rupture, en utilisant une presse conforme aux normes NF P 18-411 et NF P 18-412.



Figure 4.20: Essai de compression

4.6.2 Résistance à la traction par flexion

Cet essai a été mené selon les spécifications de la norme américaine ASTM C293 [69]. Il implique l'utilisation d'une éprouvette prismatique de BCR mesurant 280 mm de long, avec une hauteur et une largeur de 70 mm chacune (Figure 4.21).



Figure 4.21: Essai de flexion

4.6.3 Analyse des essais de flexion par fendage : (essai brésilien) sur cylindres de BCR

La méthode d'essai a été utilisée sur des échantillons cylindriques de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur. L'essai a été réalisé sur des échantillons durcis pendant 7 et 28 jours. Avec une vitesse de charge 0,51 MPa/min, un équipement d'essai de compression d'une capacité de 3 000 KN a été utilisé. La résistance à la traction indirecte du matériau a été déterminée suivant l'essai Brésilien (Figure 4.22), le principe consiste à appliquer une charge diamétrale jusqu'à rupture, puis à calculer la résistance à la traction à l'aide de la formule suivante :

$$F = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (4.7)$$

où F est la charge maximale, d le diamètre et L la longueur du cylindre.

Les résultats présentés dans le tableau incluent généralement la charge maximale (kN), la résistance calculée (MPa), la teneur en eau (%), la densité (kg/m³) et des observations sur le mode de rupture. L'analyse de ces données permet de vérifier la conformité aux normes (par exemple $\geq 1,5$ MPa pour certains BCR routiers), d'identifier d'éventuels problèmes d'homogénéité ou de compactage, et d'étudier l'influence de la teneur en eau sur les performances du matériau.

Une résistance moyenne conforme aux attentes indique une bonne formulation du BCR, Ces essais sont essentiels pour valider la qualité du BCR, optimiser ses paramètres de compactage et prédire son comportement mécanique en conditions réelles.



Figure 4.22 : Essais de flexion par fendage (essai Brésilien) sur cylindres de BCR (16×32 cm²)

4.6.4 Essais d'abrasion

Les essais d'abrasion ont été effectués sur des éprouvettes de âge 28 j suivant la norme IS: 1237-1980.[70] Pour les essais d'abrasion, les éprouvettes ont été pesées sur une balance de précision. Après un pré séchage et une pesée initiale, Les éprouvettes étaient coloré en trois couleur a l'aide d'une peinture vaporisateur pour le but de séparer les trois milieux de conservation afin de les identifier après l'opération voir tableaux 31,32 et (figure 4.22).



Figure 4.23 : Coloration pour différencier les éprouvettes avant l'expérience

Les éprouvettes ont été fixées dans le dispositif de la machine d'abrasion los angles. La machine était alors mise en mouvement à une vitesse de 500 tours par minute. Chaque éprouvette a été rodée pendant 15 minutes. Les essais ont été réalisés pour les périodes de temps indiquées, et les mesures effectuées à la fin des essais d'abrasion, les éprouvettes étaient à nouveau pesées afin de déterminer la perte de poids.

W_1 = poids initial de l'éprouvette (en g), W_2 = poids final de l'éprouvette (g), ensuite un essai de compression a été appliqué sur ces éprouvettes afin d'examiner leur résistance après la perte de masse (figure 4.24).



Figure 4.24 : Format des éprouvettes avant et après l'essai avec leurs écrasements.

4.7 Essais de durabilité

Les différents tests appliqués sur les types de BCR sont :

4.7.1 Absorption capillaire : L'absorption d'eau par capillarité d'un échantillon de béton est directement influencée par la taille et la forme des pores, ainsi que par la connexion entre eux dans le matériau poreux [64].

Lorsque de l'eau entre en contact avec un matériau poreux à l'état sec, le fluide non mouillant (l'air) présent dans les pores est progressivement remplacé par le fluide mouillant (l'eau), sans qu'une pression extérieure ne soit nécessaire.

Le principe de cet essai consiste à immerger la surface inférieure d'un échantillon de béton dans l'eau (figure 4.25) et à mesurer la variation de masse de l'échantillon au fil du temps. Avant l'essai, les échantillons sont séchés à 105°C jusqu'à ce que leur masse se stabilise (avec une variation de masse inférieure à 0,01 %). Les côtés de l'échantillon sont recouverts d'un revêtement en résine étanche. La quantité d'eau absorbée est déterminée en pesant les échantillons à intervalles de temps prédéfinis (0, 4, 9, 16, 25, 36, 49 et 64 minutes). Avant chaque pesée, la surface de l'échantillon en contact avec l'eau est essuyée avec un chiffon

humide pour éliminer les éventuelles gouttelettes d'eau superficielle. Cet essai est réalisé conformément à la norme américaine [65]

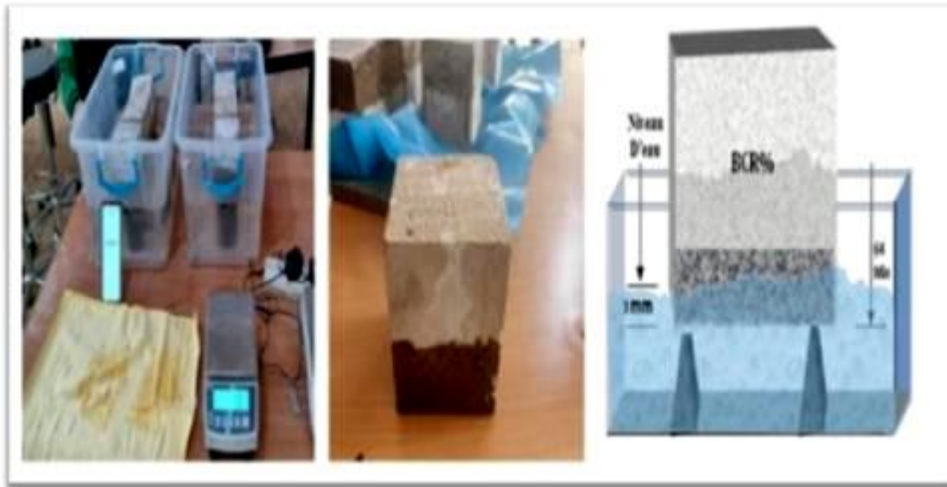


Figure 4.25; Dispositif de mesure d'absorption capillaire

4.7.2 Essai de Porosité

La mesure de la porosité accessible à l'eau, qui indique le volume de pores, se fait en saturant sous vide les échantillons M_A . Ensuite, on calcul la porosité en divisant la masse d'eau contenue dans les pores par le volume apparent de l'échantillon, déterminé par une pesée hydrostatique. Cette procédure suit les recommandations du groupe de travail (AFPC-AFREM. 1997) [66].

Pour obtenir la porosité P (%), On doit mettre les éprouvettes avant l'essai dans l'étuve (105°) au moins 48h On les pèse masse (A) ensuite les mettre dans un bac de 20° pendant 24h On les retire de bac et les pesé une deuxième fois masse (B) enfin on les remettre dans un bac d'eau de température 60° et a l'étuve pendant 5h On les retire et les pèse masse (c) a la fin on fait l'essai de pesé hydrostatique :

On pèse les éprouvettes attaché avec un fil Suspendu dans la balance et on les faire plonger dans l'eau 20° et en marque la masse (D) figure 4.26.

$$P\% = \frac{C-A}{C-D} \times 100(4.8)$$

$$Ab\% = \frac{B-A}{A} \times 100(4.9)$$



Figure 4.26: Pesée hydrostatique des BCR

4.8 Attaque acide et sulfatique

4.8.1 Attaque acide

Les revêtements en béton deviennent vulnérables aux attaques physiques et chimiques des ions sulfate et chlorure lorsqu'ils sont soumis à des environnements agressifs, rendant ainsi leur évaluation nécessaire. Cinquante échantillons cubiques de 100 mm ont été préparés selon la norme ASTM C267 [79] et durcis pendant 28 jours pour évaluer l'effet du durcissement des mélanges de BCR dans un environnement agressif de sulfate et riches en ions chlorure. Pour simuler les conditions environnementales agressives en laboratoire, des solutions acides d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide sulfurique (H₂SO₄) ont été préparées avec un niveau de concentration de 3% chacune. deux séries de dix échantillons chacune des mélanges de BCR ont été conservées dans des réservoirs individuels de solutions acides (HCl et H₂SO₄). Par la suite, un autre ensemble de dix spécimens de chacun des mélanges de BCR a été testé pour la perte en masse chaque 15 jour de durcissement. Les solutions acides ont été renouvelées tous les 30 jours pour maintenir un niveau de concentration acide constant tout au long de l'étude. Les échantillons ont été exposés à des solutions acides agressives pendant une période de 45 jours, puis retirés des bacs de solution, lavés à l'eau potable et nettoyés avec un chiffon en coton. Par la suite, leur poids saturé en surface a été noté. Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer la perte de masse, du mélange de BCR durci exposé à l'environnement acide.

4.8.2 Attaque sulfatique : Na₂SO₄-MgSO₄

Les essais utilisés pour étudier la résistance des bétons aux attaques sulfatiques sont très divers (Bassuoni et Nehdi, 2009)[73].

Ils ont étudié deux fonctions principales (la dégradation du béton et la quantification de cette dégradation). Etant donné que les sulfates sont essentiellement présents dans des solutions aqueuses, le principe de base des essais consiste le plus souvent à immerger des éprouvettes en béton dans une solution sulfatique. Dans notre étude, des essais d'immersion dans la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et la solution de sulfate de magnésium (MgSO_4) ont été effectués. Selon la norme (ASTM C1012-04, 2004).

Pour évaluer la durabilité des BCR avec les différentes additions utilisées et de pouvoir mettre évaluer l'effet de déchets de béton bitumineux sur la résistivité aux attaques sulfatiques, on a réalisé des essais chimiques sur des éprouvettes de bétons immergées pendant 45 jours dans les solutions de 5% de sulfate de sodium, 5% de sulfate de magnésium. De la même manière et avec les mêmes étapes, nous testons les échantillons dans les milieux basique suivants Na_2SO_4 et MgSO_4 .

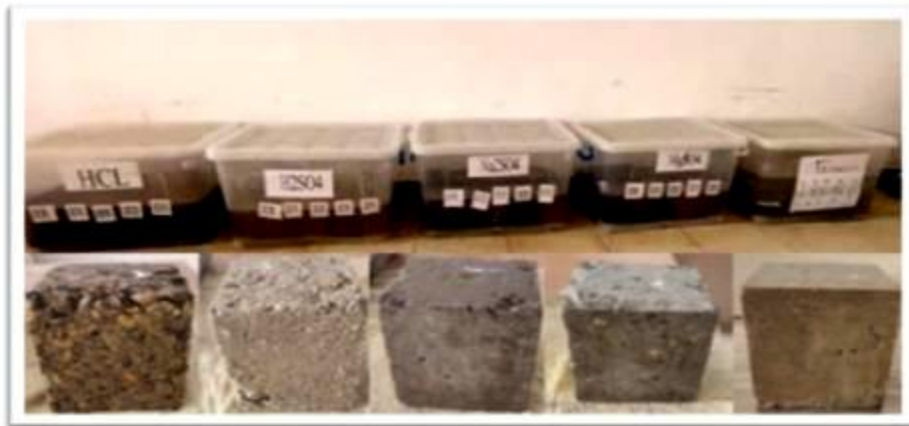


Figure 4.27 : Conservation des éprouvettes de BCR dans les milieux d'attaque.

4.8.3. Analyse microstructurale par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) et Diffraction des Rayons X (DRX).

Ces analyses ont pour but de caractériser à l'échelle microscopique la microstructure interne du BCR et d'identifier les phases minéralogiques formées lors de l'hydratation, pour différentes formulations avec et sans incorporation de déchets de béton bitumineux (DBB).

a) Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

L'essai a été réalisé à l'aide d'un microscope électronique à balayage, appareil permettant d'observer la morphologie et la texture des surfaces à des grossissements élevés grâce à un faisceau d'électrons focalisé balayant la surface de l'échantillon (Figures 4.28). Les observations ont été effectuées sur des surfaces de rupture d'éprouvettes de BCR préalablement fracturées. Avant l'observation, les échantillons ont été séchés puis métallisés

par dépôt d'une fine couche conductrice afin d'assurer leur conductivité électrique et d'éviter les effets de charge lors du balayage électronique. Les images ont été acquises à différents grossissements afin d'observer aussi bien la structure globale de la pâte de ciment que les zones interfaciales entre les granulats et la matrice cimentaire.



Figure 4.28: Microscope électronique à balayage(MEB)

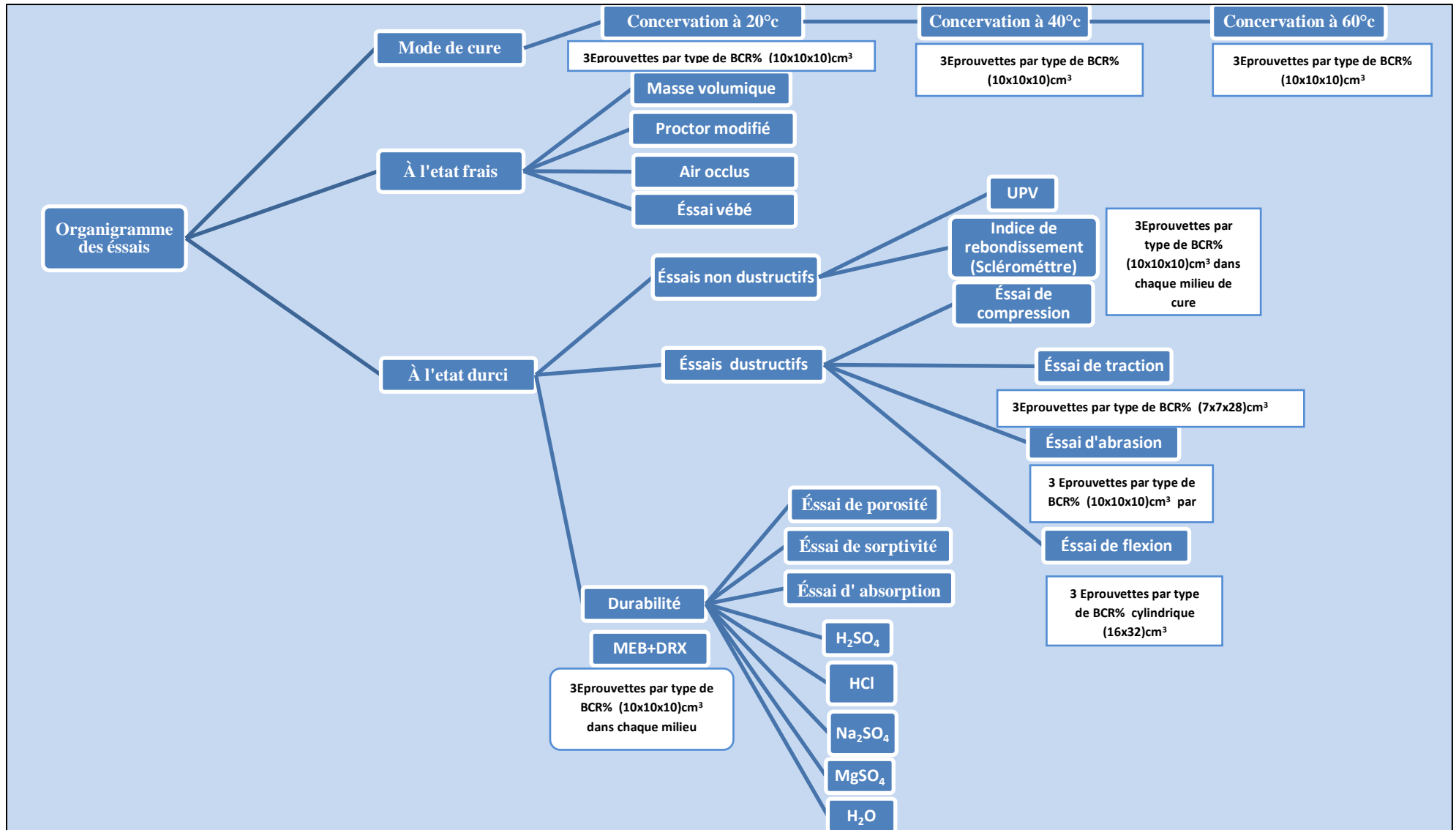
b) Diffraction des Rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X a été conduite à l'aide d'un diffractomètre à rayons X, appareil qui mesure l'intensité des rayons X diffractés par la structure cristalline du matériau en fonction de l'angle d'incidence, conformément à la loi de Bragg. Les échantillons ont été préparés par broyage fin de la pâte de BCR durcie jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène, puis placés sur un porte-échantillon plan pour l'acquisition des spectres. L'analyse a été menée sur des formulations de BCR avec et sans DBB, dans le but d'identifier et de comparer les phases minéralogiques présentes au sein de chaque mélange après hydratation.



Figure 4.29 : Etapes de préparation d'échantien pour essai DRX.

Organigramme



Conclusion

Ce quatrième chapitre se divise en plusieurs sections. Tout d'abord, une caractérisation physique, mécanique et chimique des matériaux utilisés dans la fabrication des divers mélanges de BCR est présentée. Ensuite, en se basant sur cette caractérisation des matériaux, la formulation des BCR est abordée selon les principes de la géotechnique. Enfin, les différents protocoles d'essais (physiques, mécaniques) des BCR avec des substitutions de granulats de déchets de béton bitumineux, la rigueur de cette démarche expérimentale, s'appuyant sur des matériaux locaux bien caractérisés, une formulation adaptée au contexte algérien et un programme d'essais multidimensionnel, garantit la fiabilité des résultats présentés dans le chapitre suivant. Les données obtenues permettront d'analyser quantitativement l'influence du taux de DBB, de la température de cure et de l'âge de mûrissement sur l'ensemble des propriétés du BCR.

Chapitre 5

Résultats et Discussions

Introduction

Dans ce chapitre on présente l’analyse et l’interprétation des résultats de l’étude expérimentale et qui consiste à étudier l’effet de la substitution des granulas naturels par des déchets de béton bitumineux sur les propriétés du béton compacte au rouleau (BCR) routier.

5.1 Résultats à l’état frais

5.1.1 Formulation du béton compacté au rouleau (BCR)

5.1.1.1 Formulation par essai Proctor

Les densités humide (γ_h) et sèche (γ_d) ont été calculées ont utilisant les équations (4.6) et (4.7). Ceci nous permet d’établir les courbes Proctor des différents BCR suivant la teneur de granulat recyclé du BB schématisé sur la Figure 5.1. Pour calculer la teneur en eau optimale de chaque type de BCR avec les substitution des graviers concassé par le gravier recyclé du béton bitumineux DBB suivant les teneur de substitutions suivante (0%, 25%, 50%, 75% et 100%).

Tableau 5.1:Essai Proctor modifie

Sub (%) / W %	0%	25%	50%	75%	100%
4%	12.199kg	12.429	12.079	12.084	11.869
6%	12.663	12.610	12.437	12.342	12.156
8%	12.822	12.585	12.39	12.250	12.213
10%	12.692	12.069	/	/	12.064

les résultats sont mentionnés dans lafigure suivant:

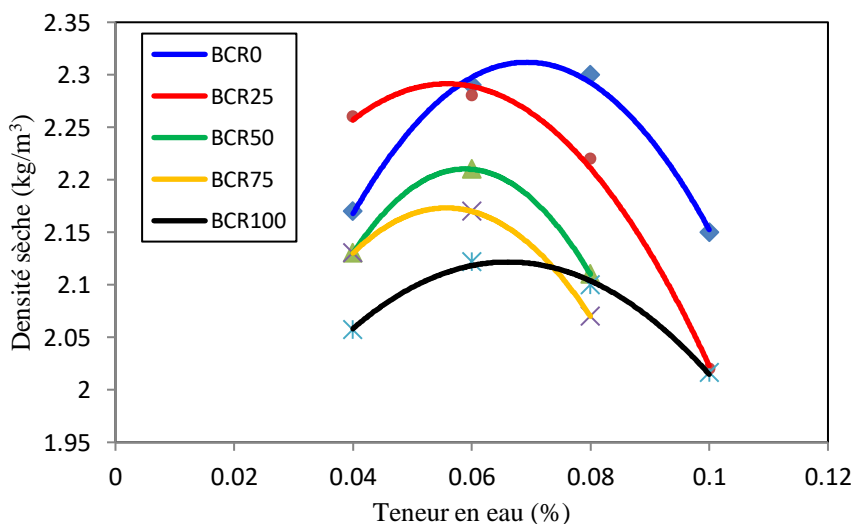


Figure 5.1: Densité sèche en fonction de la teneur en eau W

Pour ce qui est de la teneur en eau, les résultats des BCR 0%, 25% ,50% ,75%,100% indiquent que l'optimum se situe entre 5 et 6 % les résultats sont indiqués dans le tableau 5.2

Tableau 5.2: la teneur en eau optimale de chaque type de BCR

Type de BCR	BCR0	BCR25	BCR50	BCR75	BCR100
W _{opt} (%)	6.9	5.58	5.8	5.57	6.61

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{BCR0: } Y = -168,75x^2 + 23,375x + 1,5025 \\ \text{BCR25: } Y = -137,5x^2 + 15,35x + 1,863 \\ \text{BCR50: } Y = -225x^2 + 26,5x + 1,43 \\ \text{BCR75: } Y = -175x^2 + 19,5x + 1,63 \\ \text{BCR100: } Y = -93,125x^2 + 12,313x + 1,7148 \end{array} \right. \quad (5.1)$$

5.1.1.2 Temps Vébé

Les résultats d'ouvrabilité des BCR formulés sont présentés dans, Pour mieux comprendre l'impact de la substitution de gravier par le déchets de BB sur la maniabilité à travers différentes proportions, on observe une augmentation de maniabilité des mélanges de BCR avec la teneur de substitution par rapport au mélange de référence BCR0(figure 5.2).

En d'autres termes, en augmentant le taux de substitution on remarque une diminution du temps Vébé. Cette variation peut être attribuée à la forme et au taux d'absorption des particules de DBB En effet, les DBB on une couche de bitume qui enrobe les granulats et forme une surface hydrofuge qui empêche l'absorption d'eau, ce qui entraîne une croissance de maniabilité des mélanges. cependant, il convient de noter que l'effet de cette croissance de maniabilité due à cette couche de bitume qui enrobe les DBB. D'autre part, le temps Vébé des mélanges BCR25, BCR50, BCR75 et BCR100 était de 29s, 25s, 19s et 13s, soit environ 12 %, 14%, 42% et 61% inférieur à BCR0 respectivement. Ces travaux sont en accord avec les résultats d'autres chercheurs (Debieb et al.)[73].

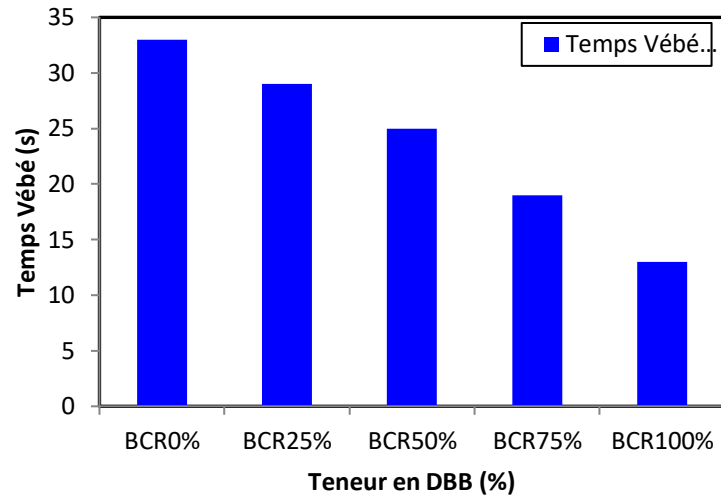


Figure 5.2 : Temps vété

5.1.1.3-Masse volumique à l'état frais :

Les résultats de la masse volumique des BCR formulés sont présentés dans la Figure5.3. On observe On observe une diminution progressive de la masse volumique apparente avec l'augmentation du taux de substitution par du DBB, en raison de la densité plus faible des granulats bitumineux par rapport aux granulats naturels. Cette réduction atteint environ 13 % pour BCR100 par rapport à BCR0.

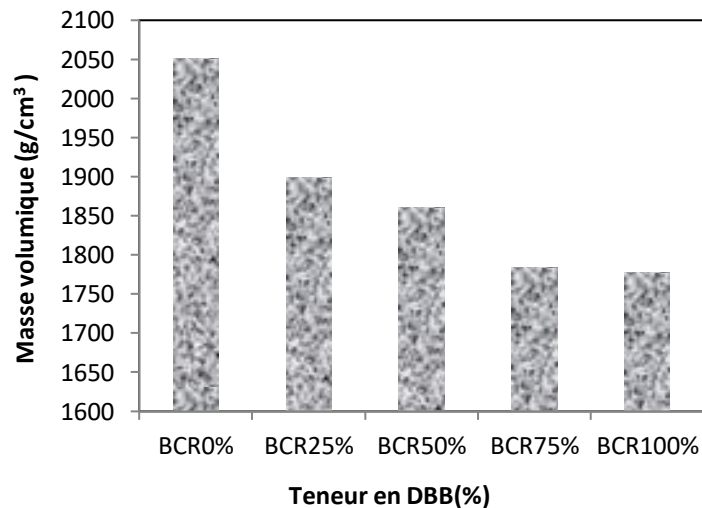


Figure 5.3 :Masse volumique apparente de BCR

5.1.1.4 Air Occlus

L'essai d'air occlus sur le BCR mesure la quantité d'air piégé dans le matériau compacté. Il consiste à soumettre un échantillon de BCR à des cycles de compression et de relâchement

pour libérer l'air occlus. Un faible pourcentage d'air occlus indique une meilleure compacité et qualité du BCR, essentiel pour ses performances à long terme voir chapitre 3.

La teneur en air des bétons témoin est élevée par rapport aux bétons à base de déchets DB, ce résultat est comparable aux résultats des travaux antérieurs [75,76].

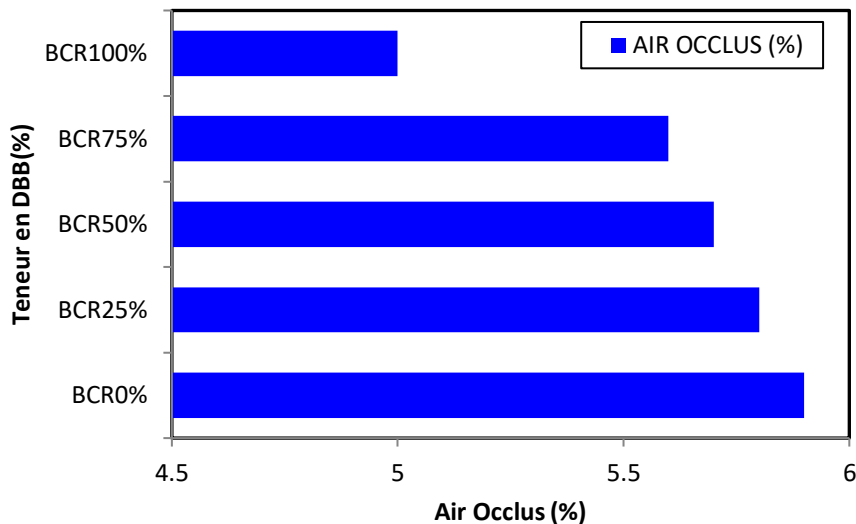


Figure 5.4. Graphe de la teneur en air des BCR testé

5.1.2 A l'état durci

5.1.2.1 Essais non destructives

a) Auscultation dynamique (Vitesse ultrasonique) :

la Figure.5.5 montre les résultats des mesures de la vitesse du son pour différents mélanges BCR, illustrant comment ces vitesses varient en fonction de la composition des matériaux étudiés

La relation entre la température et la vitesse de transmission sonore dans les mélanges de béton compacté avec des déchets de béton bitumineux est complexe et évolutive. À un jeune âge 2 à 7j, une température élevée de 60 degrés favorise une transmission sonore plus rapide, atteignant environ 4000 mètres par seconde. Cependant, cette tendance s'inverse après 28 jours dans tous les mélanges BCR, où la vitesse de transmission sonore diminue de manière significative dans tous les éprouvettes, particulièrement à haute température suivant l'étude de menou et al [78]. Cette évolution reflète les changements dans les propriétés du béton au fil du temps et sous l'effet de la chaleur. Au jeune âge, la chaleur accélère le durcissement initial du béton, augmentant sa rigidité et permettant une transmission sonore plus rapide. Cependant, à mesure que le béton mûrit, une exposition prolongée à des températures élevées peut entraîner

des microfissurations ou des altérations structurales internes, réduisant sa rigidité et sa capacité de transmission sonore.

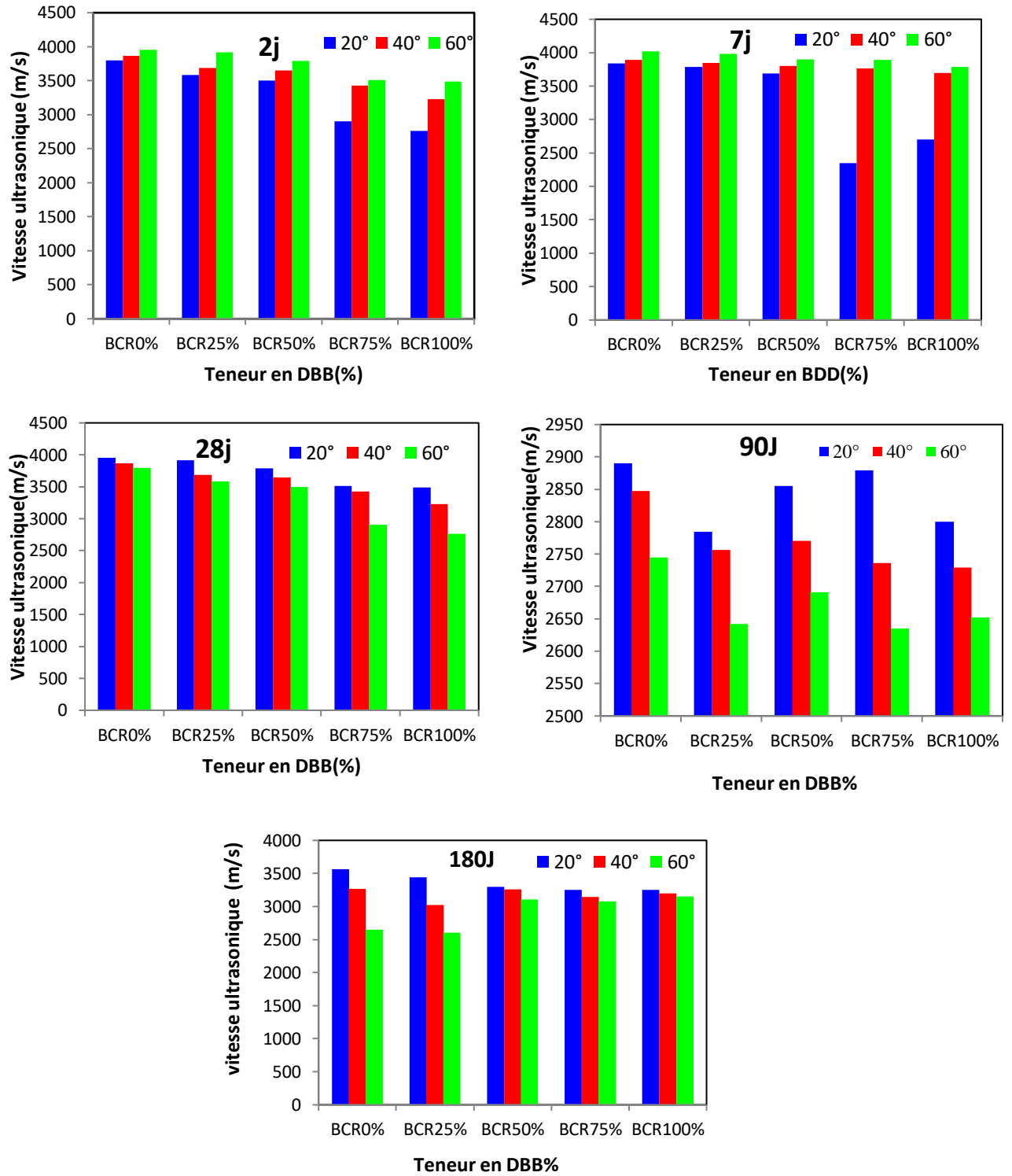
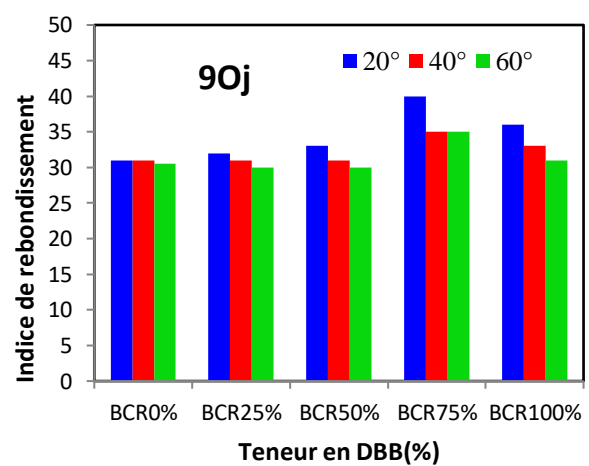
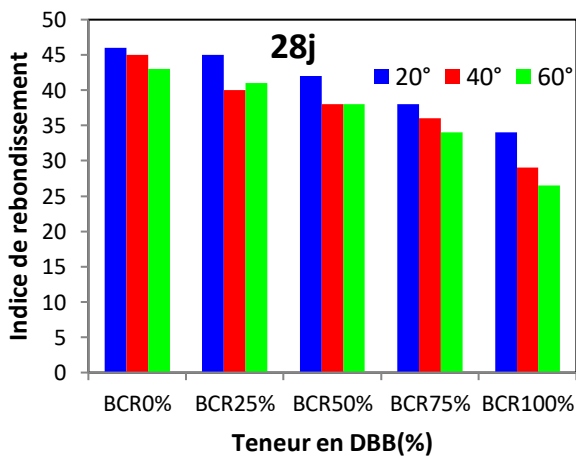
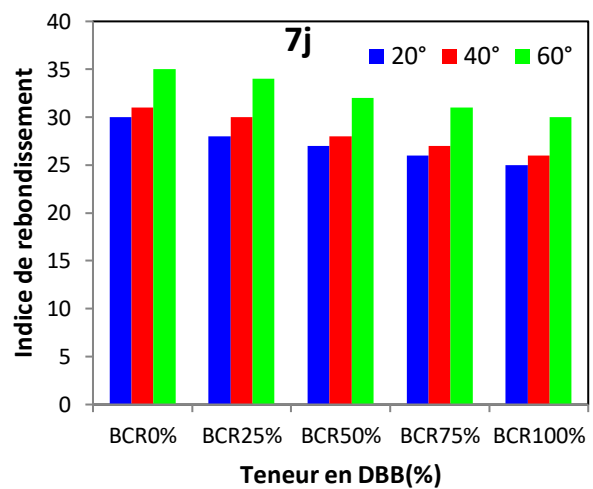
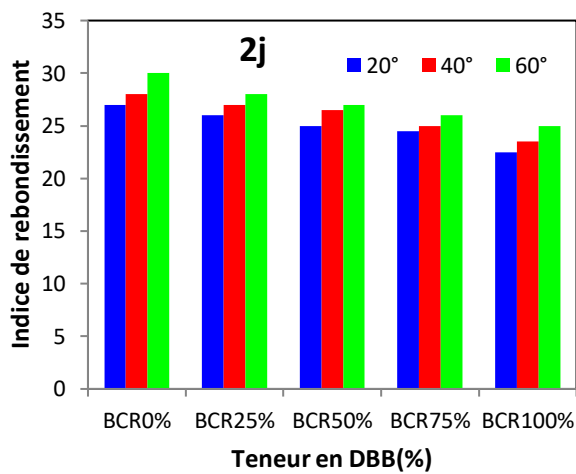


Figure 5.5: Vitesse ultrasonique (UPV)

b) Indice de rebondissement

À partir des courbes de figure 5.6, on observe une convergence notable des valeurs de résistance de surface pendant la période de jeune âge, allant de 2 à 7 jours. La chaleur joue un rôle majeur dans l'atteinte de valeurs élevées de résistance, ainsi que dans l'augmentation des substitutions des granulats de DBB remplacées, mais ces valeurs restent également très significatives. Cependant, cette tendance change radicalement après 28 jours : les valeurs de résistance commencent à diminuer et atteignent sont minimum dans BCR 100% comme le confirment des recherches antérieures[72].



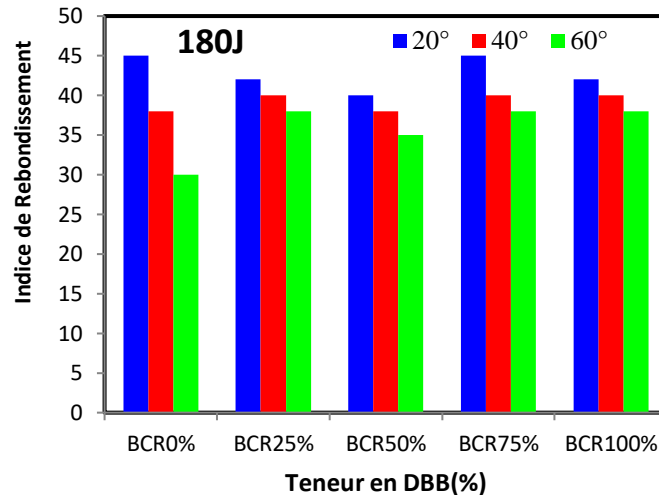


Figure 5.6: Indice de rebondissement

5.2.2 Essais destructives

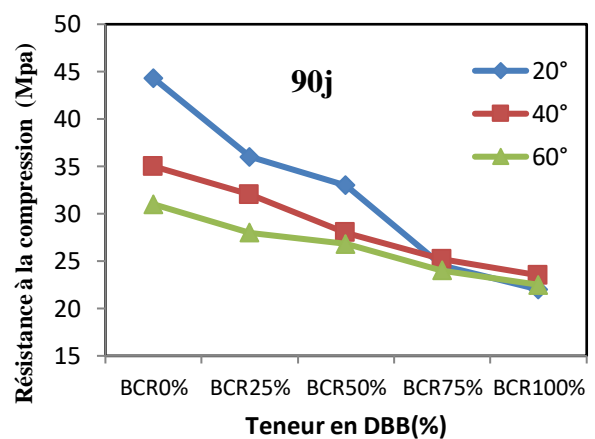
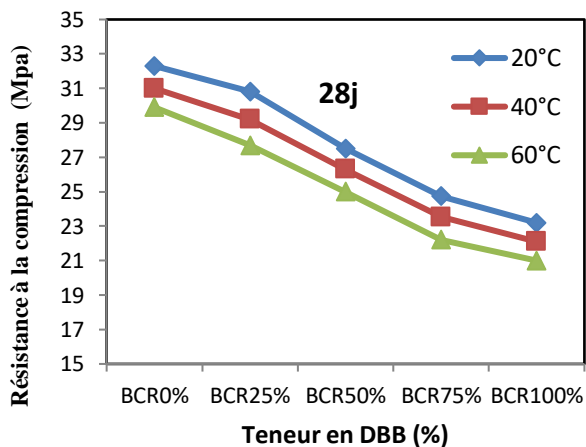
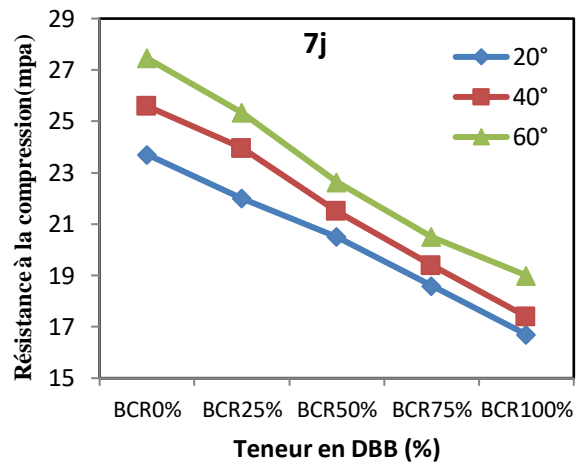
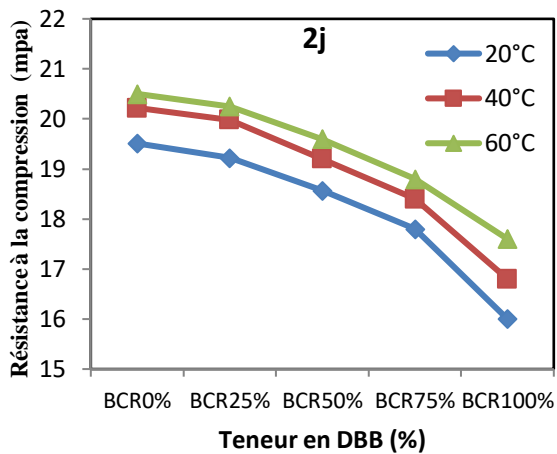
a) Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression de plusieurs composés pour les âges de 2,7, 28, 90 et 180 jours sont présentés à la figure 5.7. Comparé au béton de référence (BCR0%), il est clairement établi que l'augmentation de la teneur en DBB a des effets négatifs sur le volume de résistance à la compression.

Les auteurs ont montré dans leurs études que les propriétés mécaniques du béton BCR diminuaient avec l'augmentation de la teneur en matériau (DBB).

Les résultats montrent que les bétons ont durci pendant 2 et 7 jours sous haute température pour atteindre la résistance à la compression supérieure à celui durci à 20 C pendant trois et sept jours. Exposition des mortiers à haute température de prise accélère l'hydratation processus et conduit à la formation d'un grand nombre d'hydrates ce qui a un effet considérable sur l'augmentation de la résistance. Au début âge, les mortiers à base de poudre de calcaire ont une résistance élevée suivie par ceux du ciment ordinaire, du ciment pouzzolanique naturel et du laitier ciment respectivement. Mortiers à base de pouzzolane naturelle ou de scories ont la plus faible résistance à la compression en raison d'une quantité plus faible de ciment et la présence d'ajouts minéraux moins actifs à ce stade d'hydratation. Au-delà de cet âge, les diminutions de résistance à la compression sont observées en fonction de la température de durcissement et de la composition de chaque mélange. La diminution de la force est le résultat d'une rapide hydratation initiale conduisant à une répartition moins uniforme de l'hydratation des produits. Cela peut se refléter dans un changement dans la distribution de la taille des pores, en particulier des pores capillaires plus grands [54].

Figures 5.8, montrent la variation de la résistance à la compression des différents mortiers. A 28 jours, la pouzzolanité de la pouzzolane naturelle et l'hydraulicité du laitier de haut fourneau sont activées et provoquent une augmentation de la compression mortiers de résistance. Ces résultats sont conformes à ceux rapporté par d'autres enquêteurs [16,27] dans lesquels l'augmentation de la température de durcissement à un âge précoce a un grand effet sur la résistance développement à un âge plus avancé[110].



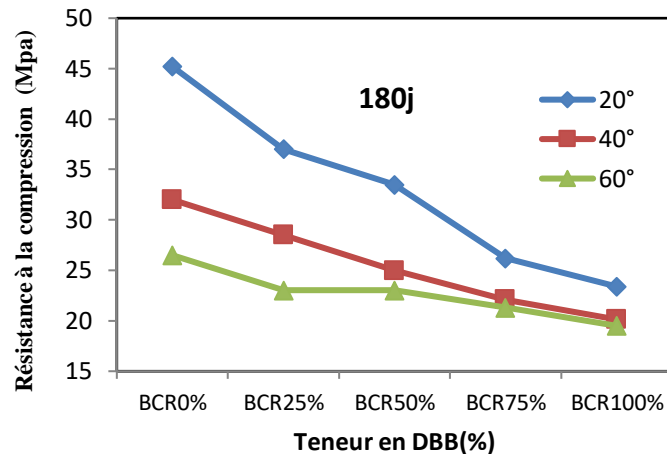


Figure 5.7 : Résistance à la compression des BCR

- Les résistances à la compression obtenues pour le BCR0 (mélange de référence sans DBB) à 28 jours sont cohérentes avec les valeurs rapportées dans la littérature pour des BCR formulés avec 250 kg/m³ de ciment et un rapport E/L similaire [7,9]. L'incorporation de 25 % de DBB entraîne une légère diminution de Rc, de l'ordre de 5 à 8 %, restant néanmoins au-dessus du seuil minimal de 20 MPa. Ce résultat est conforme aux tendances observées par Huang et al. (2005) et Debarma et al. (2019)[40,93], qui rapportent une réduction comprise entre 5 et 15 % pour des taux de DBB allant jusqu'à 50 %. Au-delà de 50 % de substitution, une diminution plus prononcée des résistances est observée, attribuable à l'augmentation de la teneur en bitume résiduel dans le mélange, qui réduit l'adhérence entre les granulats DBB et la pâte de ciment au niveau de la zone de transition interfaciale (ITZ). Ce phénomène est clairement mis en évidence par les analyses MEB présentées en section 5.5.

b) La résistance à la traction par flexion

La résistance à la flexion est un aspect crucial dans la conception des mélanges et des chaussées en béton de ciment. Des facteurs tels que le rapport eau-ciment et la granulométrie des granulats influent considérablement sur le comportement en flexion des chaussées en béton. L'incorporation de granulats recyclés d'asphalte DBB entraîne généralement une réduction de la résistance à la flexion des mélanges en béton compacté au rouleau, allant de 5 à 31 % pour le DBB[45]. Pour notre cas, la réduction était d'environ 12% à 39% par rapport au BCR de référence. Cette réduction est moins prononcée avec l'utilisation de DBB grossier, mais la présence d'une couche d'asphalte sur le DBB peut encore diminuer la résistance à la flexion en raison d'une liaison interfaciale moins solide.

La Figure 5.8 montre que les résultats de la résistance à la flexion du BCR avec ou sans matériaux (DBB) révèlent des comportements distincts selon le taux de substitution et l'âge du béton. Aux âges jeunes (7 jours), les BCR fortement substitués (75% et 100%) présentent une chute drastique de résistance ne dépassant pas 1,76 MPa, soit une réduction d'environ 60-77% par rapport au béton témoin (4.47 MPa). À 28 jours, le béton témoin atteint 5.57 MPa tandis que les mélanges à 75% et 100% de DBB montrent des valeurs de 3.52 et 3.37 MPa respectivement, confirmant une réduction significative de 37-39%. Cependant, à 90 jours, on observe une récupération progressive de la résistance pour tous les mélanges substitués : le témoin atteint 6.37 MPa, les BCR à 75% et 100% se stabilisent autour de 4.01-4.05 MPa (réduction d'environ 37%), tandis que les mélanges à 25% et 50% atteignent 4.85 et 4.77 MPa respectivement (réduction de 24-25%). Cette évolution tardive suggère que le bitume résiduel retarde l'hydratation du ciment mais permet une récupération partielle à long terme. Ces résultats concordent avec d'autres études [4-10] où Debieb et al. [92] ont observé des réductions de résistance à la traction d'environ 56% avec l'incorporation de DBB, confirmant l'effet inhibiteur du bitume sur les propriétés mécaniques du BCR.

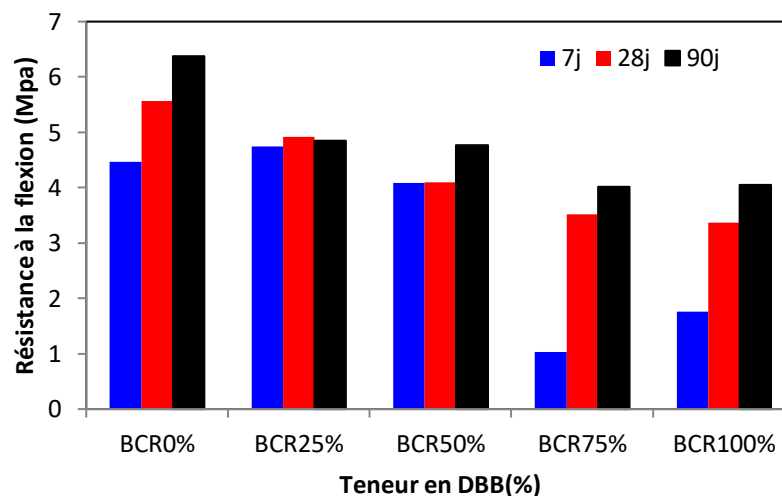


Figure 5.8: Résistance à la flexion

c) Essai de traction par fendage (Essai brésilien)

L'essai de traction par fendage sur cylindres 16x32 cm est pertinent pour le BCR car il simule mieux les sollicitations réelles de traction en chaussée que la compression simple, utilise des éprouvettes standardisées faciles à préparer, et permet d'estimer indirectement la résistance à la flexion par compression diamétrale du cylindre.

Pour calculer la résistance à la traction par fendage, j'utilise la formule

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi \times D \times L} \quad (5.2)$$

où $D = 0.16$ m et $L = 0.32$ m, ce qui donne $12.44 P$ (en MPa si P est en MN).

Les résultats de traction par fendage révèlent un comportement préoccupant car contrairement aux attentes, la Figure 5.10 illustre que les BCR substitués à 25% et 50% présentent des résistances supérieures au témoin à 7 jours (1.40 et 1.64 MPa contre 1.03 MPa), suggérant un possible effet de confinement ou de compacité améliorée par les granulats bitumineux à jeune âge, mais cette tendance s'inverse dramatiquement à 28 jours où le témoin double sa résistance pour atteindre 2.17 MPa tandis que les mélanges substitués stagnent voire régressent (2.03 MPa pour 25%, 1.86 MPa pour 50%). Les taux élevés de substitution (75% et 100%) montrent des performances médiocres à tous âges avec des résistances ne dépassant pas 1.26 MPa à 28 jours, soit une réduction de 42-48% par rapport au témoin, confirmant l'effet inhibiteur du bitume sur l'hydratation du ciment et la faiblesse de la liaison interfaciale entre la matrice cimentaire et les granulats enrobés. Ces résultats corroborent les essais de flexion sur prismes et démontrent que seule une substitution maximale de 25% pourrait être envisagée, bien que la stagnation de résistance entre 7 et 28 jours reste problématique pour la durabilité à long terme du BCR en chaussée.

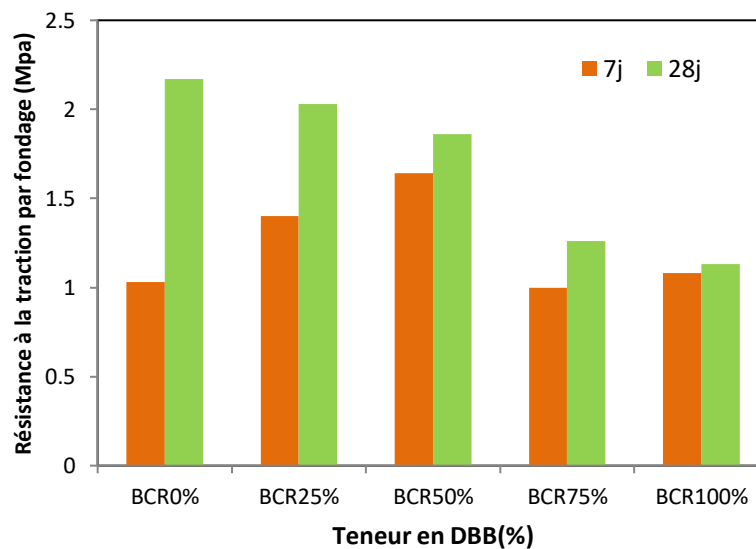


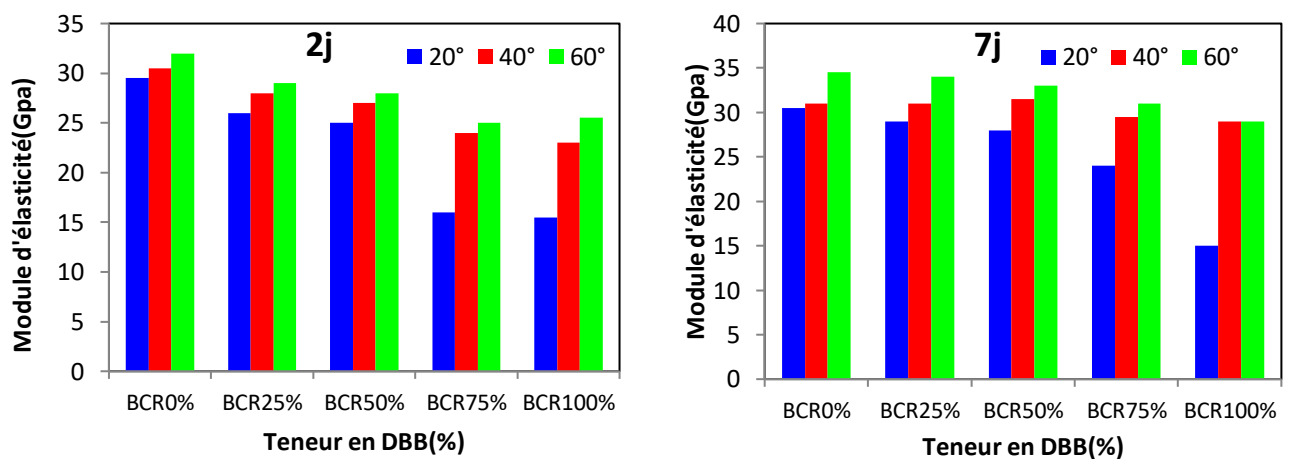
Figure 5.9: Résistance à la traction par fendage (Essai Brésilien)

c) Module d'élasticité

La figure 5.10 montre la variation du module d'élasticité dynamique (ME) des mélanges BCR avec l'âge de durcissement et de la température de cure. Le ME de BCR à 2 jours augmente avec l'augmentation de la température de cure (20°C, 40°C et 60°C). En revanche,

il diminué avec la teneur de substitution des déchets de BB. Le mélange BCR0 présente une valeur maximale du module d'élasticité à 2 jours de cure à 60 °C, tandis que, cette valeur Devienne minimale pour le mélange BCR100 durci à 20 °C. A sept jours de durcissement dans les trois températures la figure 5.10 montre les valeurs de ME des BCR. Cette figure montre que la même tendance a été enregistré que l'échéance de deux jours. En revanche à 28 jours de cure, nous constatons une diminution du module d'élasticité en fonction de la température et la teneur de substitution du déchet de BB.

À 90 jours, le ME des mélanges BCR enregistre une légère diminution par rapport à 28 jours, particulièrement prononcée pour les cures à 40°C et 60°C. La valeur maximale reste celle de BCR0 à 20°C (32,8 GPa) et la minimale celle de BCR100 à 60°C (19,3 GPa). La réduction du ME avec le taux de substitution en BB s'explique par la présence du bitume résiduel qui maintient une phase souple au sein de la matrice cimentaire, dont l'effet s'intensifie à haute température de cure,tandis que à 180 jours, le ME se stabilise pour l'ensemble des mélanges BCR, avec un resserrement des écarts entre les différents taux de substitution, notamment à 60°C (entre 29,4 et 27,0 GPa). Néanmoins, la réduction du ME en fonction de la teneur en BB demeure systématique : la nature souple du bitume résiduel et la fragilisation des interfaces granulat-pâte cimentaire constituent une limitation mécanique durable. Ces résultats confirment que les déchets de béton bitumineux réduisent significativement et durablement le module d'élasticité des BCR.



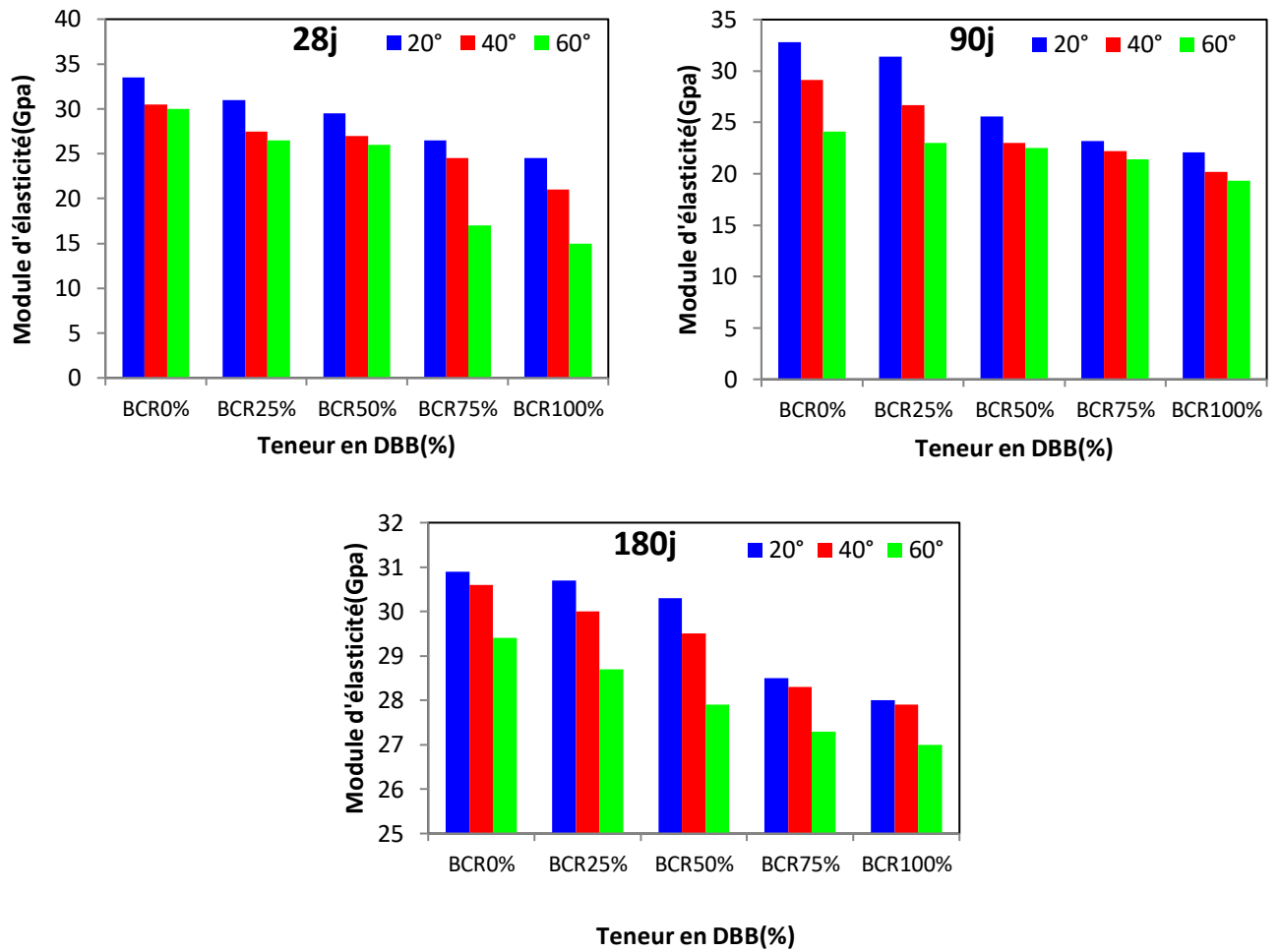


Figure 5.10: Module d'élasticité dynamique des BCR en fonction de la température

d) Essais d'abrasion

A partir de la figure 5.11, on remarque que l'effet de la température joue un rôle important sur la dureté des échantillons. Par exemple, une température de 40 est considérée comme idéale pour tous les échantillons.

Debbarma et al.[93]. Ont rapporté que l'incorporation de DBB pouvait augmenter la perte de masse due aux forces abrasives, indépendamment de la fraction de DBB ou du type de remplacement. La texture de surface du DBB joue un rôle essentiel dans la résistance à l'abrasion. Par exemple, l'utilisation de DBB à texture rugueuse avec une faible teneur en asphalte peut montrer une moindre dégradation face aux forces abrasives, par rapport au DBB à texture lisse avec une teneur en asphalte plus élevée, qui présente une dégradation plus importante[45,51].

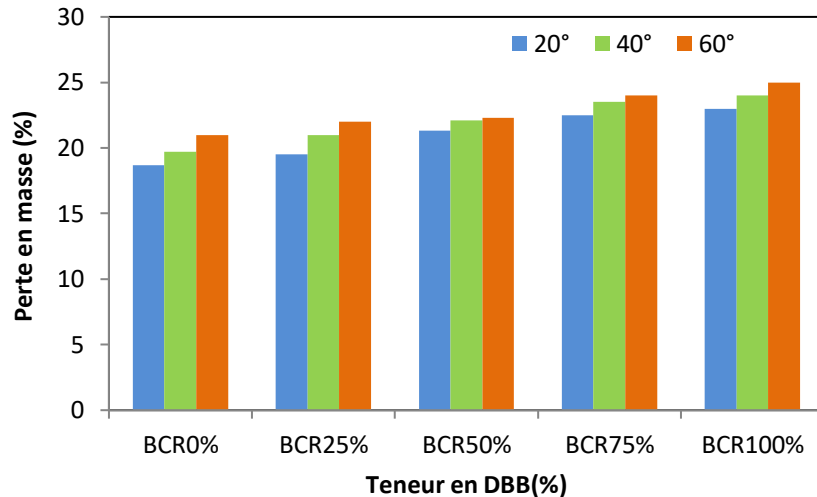


Figure 5.11:Perte en masse (%) essai abrasion

5.2.3-Essais durabilité

a) Résultats de l'absorption capillaire

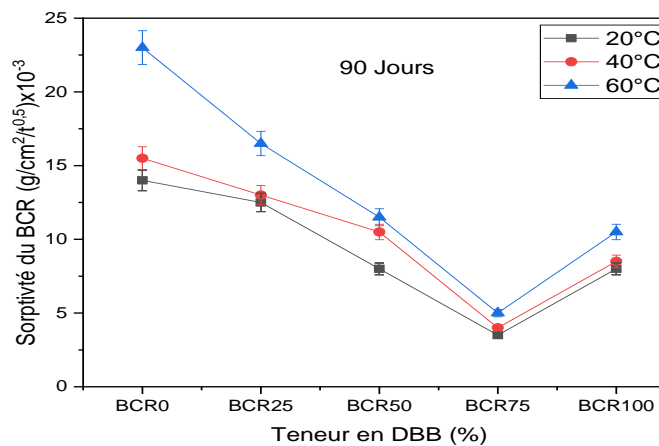
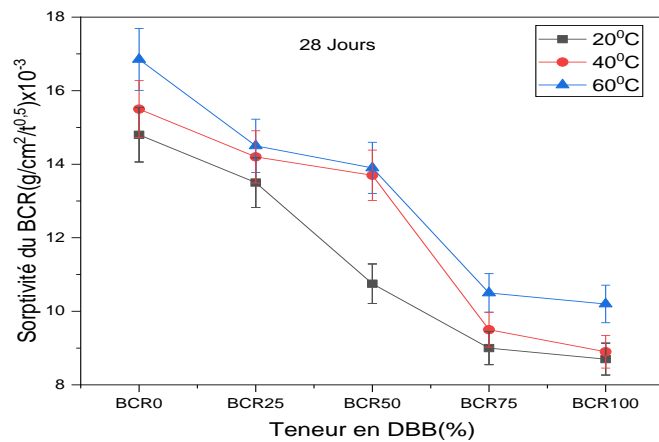
La figure 5.12 présente les résultats d'absorption capillaire du béton BCR incorporant différents pourcentages de DBB à différents âges (28, 90 et 180 jours) et après cure à trois températures (20 °C, 40 °C et 60 °C). L'analyse révèle une corrélation entre la teneur en DBB, la température de cure et les caractéristiques d'absorption capillaire du béton au fil du temps.

À 28 jours, l'absorption capillaire diminue avec l'augmentation de la teneur en DBB, quelle que soit la température de cure. Par exemple, à 20 °C, l'absorption capillaire du béton BCR0 est de 14,8, tandis qu'elle chute à 8,7 pour le BCR100. Cette tendance se confirme à 40 °C et 60 °C, où les bétons à forte teneur en DBB présentent une absorption plus faible. La réduction de l'absorption capillaire aux teneurs élevées en DBB semble résulter d'une microstructure du béton plus dense et moins poreuse.

À 90 jours, un changement notable est observé, notamment aux températures de cure élevées. À 20 °C, l'absorption capillaire diminue significativement avec l'incorporation de DBB. Pour BCR0, elle reste relativement élevée[14], mais chute à 8 pour BCR50 et BCR100. Ceci indique qu'une hydratation prolongée et une cure à température modérée améliorent la résistance à l'absorption dans les mélanges contenant du DBB. Une tendance similaire est observée à 40 °C et 60 °C, où les valeurs d'absorption capillaire sont nettement inférieures à celles mesurées à 28 jours, ce qui indique que des températures élevées et des durées de cure plus longues favorisent une meilleure hydratation et une densité de béton accrue.

À 180 jours, les valeurs d'absorption capillaire se stabilisent davantage, le BCR0 présentant toujours des taux d'absorption relativement plus élevés que les mélanges incorporant du DBB. Par exemple, à 20 °C, le BCR0 enregistre une absorption de 13 unités, tandis que celle du BCR100 chute à 7, ce qui représente une amélioration notable. Cette même tendance se maintient à 40 °C et 60 °C, les mélanges contenant du DBB présentant systématiquement une absorption plus faible. Ces résultats suggèrent qu'un durcissement à long terme, en particulier à haute température, réduit la porosité et augmente la densité du béton, améliorant ainsi sa résistance à l'absorption capillaire.

Les résultats démontrent qu'une augmentation de la teneur en DBB réduit l'absorption capillaire, notamment lors de cures prolongées. Cette réduction peut être attribuée à la structure plus compacte du béton qui s'hydrate progressivement. De plus, des températures de cure plus élevées (40 °C et 60 °C) semblent réduire davantage les taux d'absorption, probablement en raison de l'hydratation accrue qui se produit à ces températures élevées. Ceci est cohérent avec les résultats d'autres études, qui indiquent que l'utilisation de DBB dans le béton peut améliorer certaines propriétés de durabilité, telles qu'une absorption réduite et une meilleure résistance à la pénétration de l'eau [75].



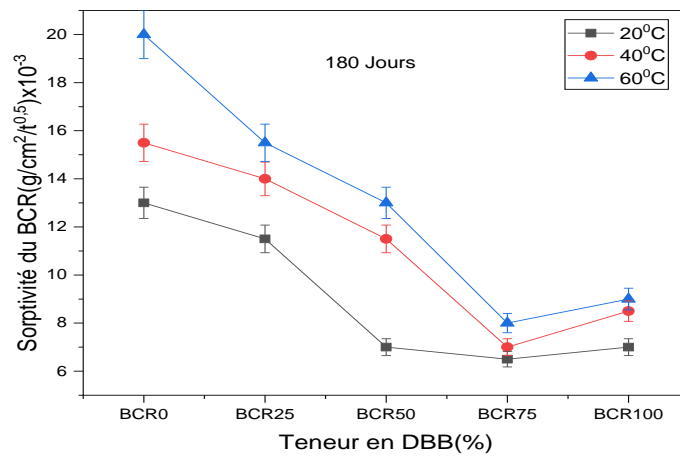


Figure 5.12 : Sorptivité des BCR en fonction de la température de cure

b) La Porosité

La figure 5.13 présente une analyse de la porosité du béton compacté au rouleau (BCR) incorporant des enrobés bitumineux recyclés (DBB) à différents taux de substitution (BCR0, BCR25, BCR50, BCR75, BCR100) sur différentes durées de cure (28, 90 et 180 jours) à des températures de 20 °C, 40 °C et 60 °C. Les résultats indiquent qu'une teneur accrue en EBR réduit la porosité du béton, ce qui permet d'obtenir un matériau dense.

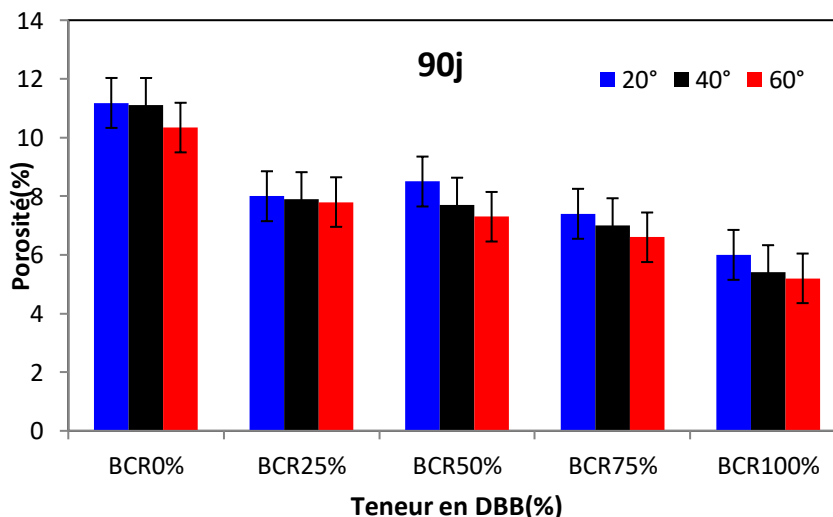
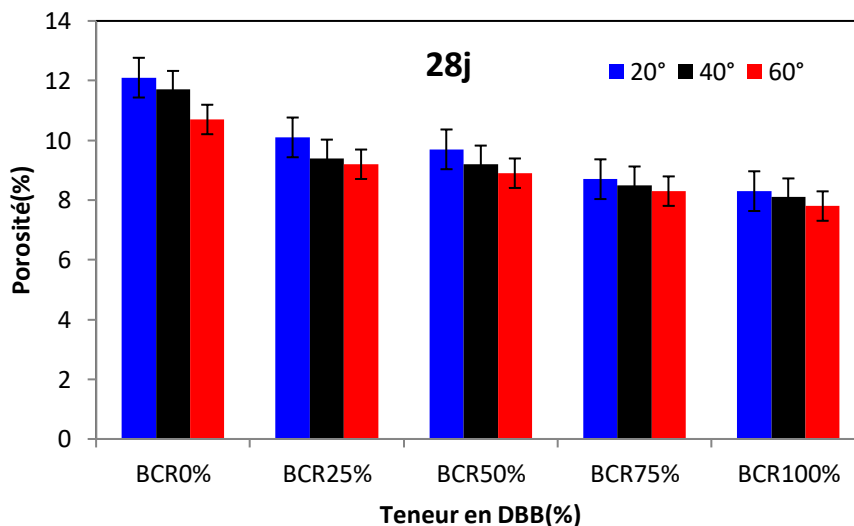
À 28 et 90 jours, la porosité reste relativement similaire quelle que soit la température.

À 20 °C, elle diminue avec l'augmentation de la teneur en DBB, le BCR0 présentant la porosité la plus élevée (12,1 %) et le BCR100 la plus faible (8,3 %). Cette tendance se confirme à 40 °C et 60 °C, où la porosité est légèrement réduite pour des taux de substitution en DBB plus élevés. Ces données suggèrent que, bien que le DBB soit un granulat susceptible de contenir des vides, il influence également l'hydratation du béton, contribuant ainsi à une augmentation globale de la porosité par rapport au BCR.

À 180 jours, la porosité présente une différence marquée par rapport aux mesures précédentes. Par exemple, à 20 °C, le béton BCR0 affiche une porosité de 10,9 %, tandis que le béton BCR100 présente une diminution significative de sa porosité, ce qui indique que la teneur en DBB influence considérablement la densité du béton à long terme. La réduction de la porosité observée à 40 °C et 60 °C dans les mélanges à forte teneur en DBB peut être attribuée aux températures de cure plus élevées, qui favorisent une meilleure hydratation et potentiellement

une microstructure plus compacte, réduisant ainsi la porosité dans certains mélanges, notamment pour les mélanges BCR0 et BCR25.

Globalement, les résultats suggèrent que si l'augmentation de la teneur en DBB entraîne une porosité plus élevée lors des premières phases de cure, à plus long terme (180 jours), les mélanges contenant du DBB peuvent atteindre des niveaux de porosité comparables, voire supérieurs, probablement grâce à l'hydratation continue du ciment et aux effets des températures plus élevées sur la pâte de ciment. Ceci indique que le DBB peut influencer la durabilité et les performances du béton ; cependant, ces effets dépendent de la température de cure, et une substitution plus importante de DBB peut néanmoins permettre d'obtenir une porosité et une résistance optimales après des périodes de cure prolongées. Les tendances observées concordent avec les recherches existantes sur l'influence du DBB sur les propriétés du béton, où une teneur plus élevée en DBB augmente généralement la porosité, mais où des performances à long terme peuvent être obtenues grâce à des formulations et des conditions de cure appropriées [12]. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Modarres et al.[52].



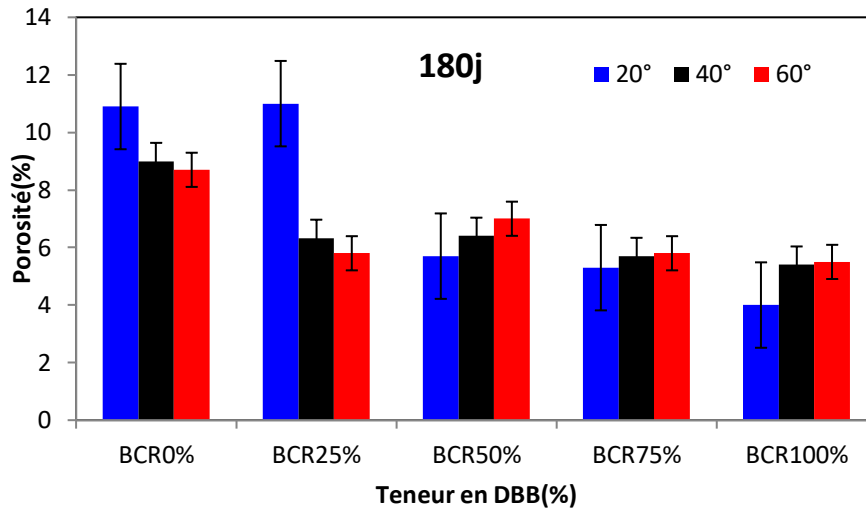


Figure 5.13 : Porosité totale des BCR

c) Absorption d'eau

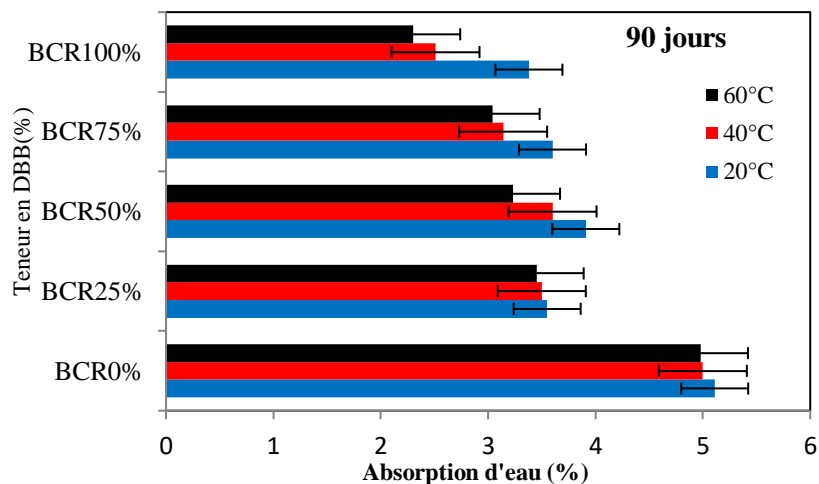
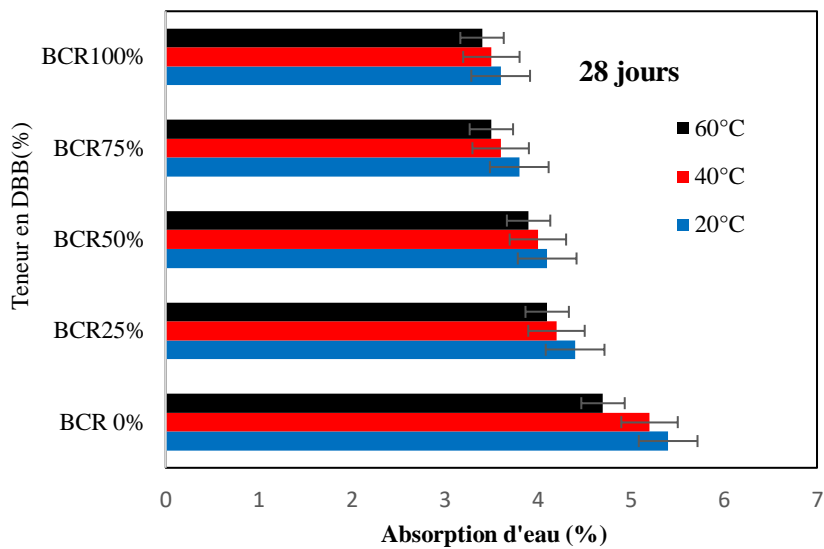
Les résultats d'absorption d'eau pour différentes périodes (28 jours, 90 jours, 180 jours), en fonction du pourcentage de substitution de chaussée en asphalté recyclé (DBB) (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) et de diverses températures de durcissement (20 °C, 40 °C et 60 °C), montrent des tendances intéressantes.

À 28 jours, les résultats montrent une tendance à la baisse de l'absorption d'eau avec l'augmentation du pourcentage de DBB dans le béton. Par exemple, à 20 °C, le béton sans DBB (BCR0) présente une absorption d'eau de 5,4 %, tandis que les mélanges contenant des pourcentages plus élevés de DBB affichent des valeurs d'absorption inférieures, atteignant 3,6 % pour BCR100. Ceci peut être attribué à la densification de la matrice du béton due à la substitution des granulats naturels par du DBB, réduisant ainsi la porosité et limitant la quantité d'eau que le béton peut absorber [30].

À 90 jours, les résultats montrent que l'absorption d'eau reste relativement stable pour les échantillons à faible pourcentage de DBB (25 %, 50 %), tandis que les mélanges contenant 75 % et 100 % de DBB présentent des réductions significatives de l'absorption. Ce phénomène semble lié à la progression des réactions d'hydratation au fil du temps et à l'effet de remplissage du DBB, qui contribue à une structure de béton plus compacte et moins perméable. À 60 °C, les résultats indiquent des réductions d'absorption plus importantes, suggérant que les températures plus élevées favorisent une meilleure réactivité du DBB et, par conséquent, une meilleure densification de la matrice de béton [31].

À 180 jours, les tendances observées à 28 et 90 jours persistent, mais avec des différences plus marquées. Les échantillons de béton présentant des pourcentages de DBB plus élevés (en particulier BCR75 et BCR100) affichent une absorption d'eau de plus en plus faible. Ceci indique que l'effet du DBB sur la réduction de l'absorption d'eau devient plus significatif avec le temps, probablement en raison de l'achèvement du processus de durcissement et de la formation de produits secondaires qui réduisent la porosité [32].

Les résultats à long terme suggèrent que le remplacement partiel des granulats naturels par des granulats d'enrobés recyclés (DBB) peut améliorer la résistance à l'absorption d'eau du béton, notamment lorsque la durée et la température de cure augmentent. Ceci peut accroître la durabilité du béton en le rendant moins perméable et plus résistant à l'infiltration d'eau, un facteur important pour les structures exposées à des environnements humides ou à des cycles de gel-dégel [33].



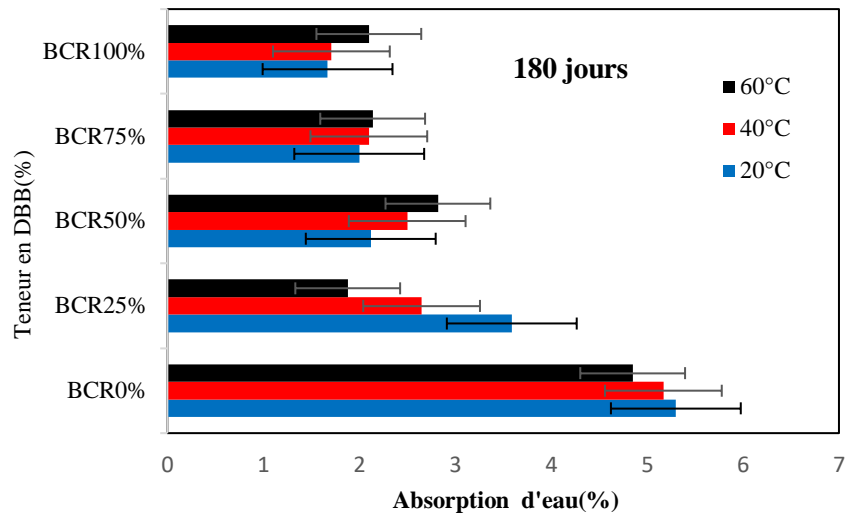


Figure 5.14: Absorption d'eau des BCR

5.1.3 Corrélation entre les propriétés

a) Corrélation entre le temps vébé et l'air occlus

Les mesures de teneur en air et temps vébé de tous les mélanges BCR sont présentés dans la figure 5.16 cette figure illustre la relation entre le temps de vébé mesuré et l'air occlus dans le béton compacté au rouleau (BCR) car elle est importante pour comprendre la consistance et la durabilité du béton. Le temps Vébé mesure la consistance du béton frais à l'aide de l'appareil de Vébé, où un temps plus court indique une consistance plus fluide et un temps plus long une consistance plus rigide. En général, un béton avec un temps Vébé plus court occlut moins d'air, car la fluidité permet aux bulles d'air de s'échapper plus facilement. Inversement, un béton avec un temps Vébé plus long tend à occlure plus d'air, car la rigidité empêche les bulles d'air de s'échapper.

L'ajout de déchets de BB modifie cette relation en augmentant la quantité des substitutions de ces déchets dans le mélanges BCR l'air occlus diminue aussi le temps Vébé. Par conséquent, un béton avec un temps Vébé court peut encore avoir une teneur en air occlus faible conformément à la référence [80].

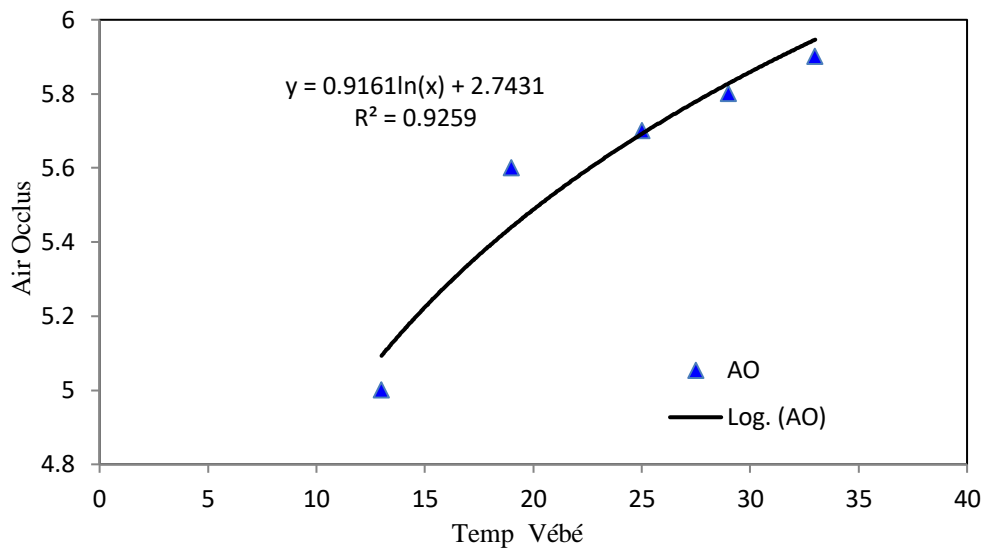


Figure 5.15:Corrélation entre le temps vébé et l'air occlus

c) Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à l'abrasion

Elle est illustrée à la Figure 5.16. Elle montre que la compression inférieure la résistance a entraîné une moindre résistance à l'abrasion. La résistance à l'abrasion du BCR est directement liée à la résistance à la compression car à la fois la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression du béton dépendent de la structure des pores de la pâte de ciment.

Une bonne corrélation linéaire entre la résistance à l'abrasion et résistance à la compression du BCR des mélanges à 28 jours ont été établis (Figure. 5.17), indiquant que la résistance à l'abrasion du BCR incluant le déchets de BB peuvent être augmentées en augmentant la compression des mélanges BCR. L'une des meilleures méthodes pour obtenir une résistance à la compression plus élevée en utilisant un ciment plus élevé quantité pour les mélanges inclusifs DBB[67,70]. Remplacement partiel de granulats grossiers naturels par déchets BB grossier ayant de l'asphalte raidi la texture peut également être suggérée car elle fournit des résistances à l'abrasion du mélange témoin lorsque DBB incluant BCR les mélanges doivent être utilisés comme couche superficielle des trottoirs.

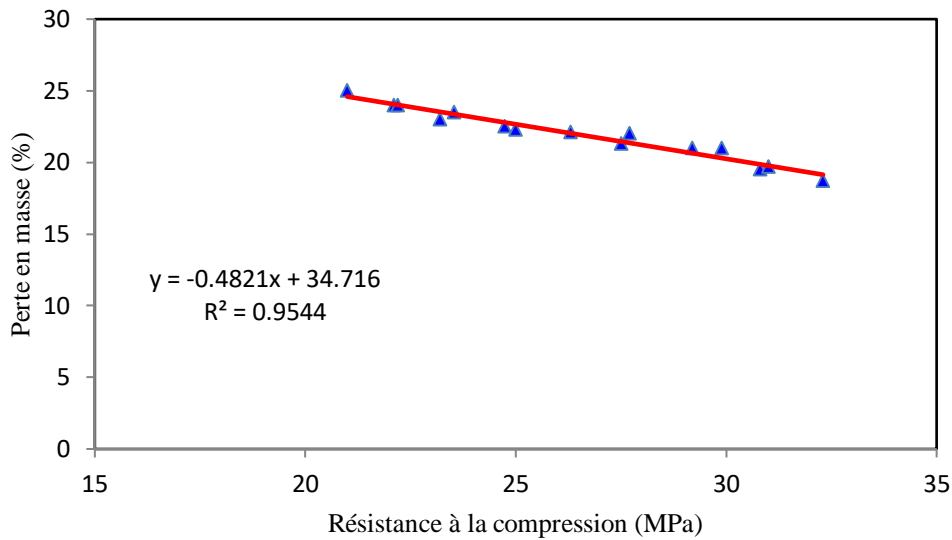


Figure 5.16: Corrélation linéaire entre la résistance à l'abrasion et la résistance à la compression des BCR

c) Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression des BCR

La figure 5.17 illustre l'estimation de la résistance à la compression du béton par la vitesse du son est faible, indépendamment du type de béton. Cette méthode reflète le comportement du béton en fonction de son âge, de sa position et des conditions de conservation des échantillons. La vitesse du son permet de suivre l'évolution de la résistance avec le temps, détecter les variations de compaction selon la position, et évaluer l'impact des conditions de conservation. En parallèle de la référence [81].

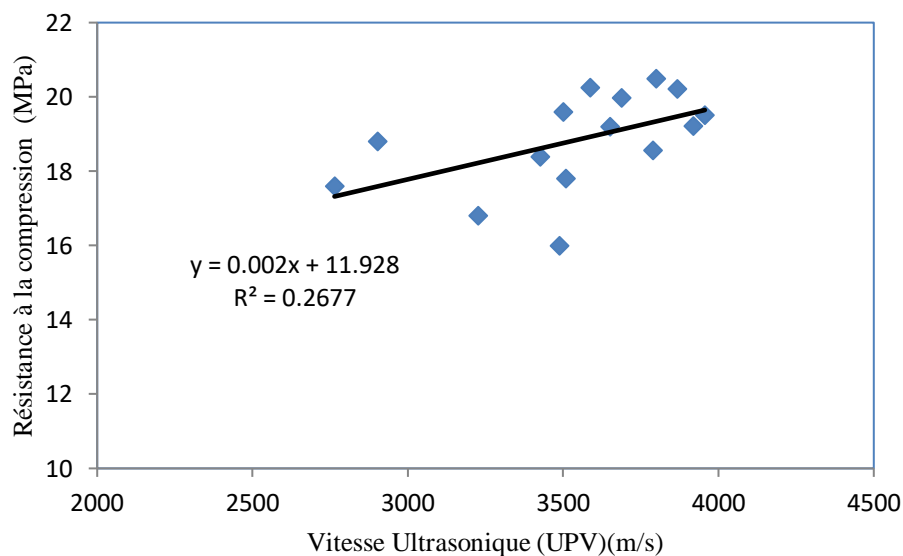


Figure 5.17: Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression du BCR.

d)-La corrélation entre la porosité et l'absorption

La corrélation entre la porosité et l'absorption d'eau dans les bétons fabriqués avec des granulats recyclés, tels que les déchets de béton ou les granulats d'asphalte recyclés (DBB), montre que l'absorption d'eau augmente avec la porosité. Les résultats indiquent que l'ajout de DBB au béton accroît la porosité, car ce matériau peut présenter des zones poreuses et des irrégularités, augmentant ainsi le nombre de vides dans la matrice du béton. Il en résulte une capacité d'absorption d'eau plus importante, notamment pour les mélanges à forte proportion de DBB. Par exemple, les échantillons composés à 100 % de DBB ont présenté des taux d'absorption supérieurs à ceux fabriqués avec des granulats naturels, confirmant ainsi la relation entre la porosité et l'absorption d'eau [40]. L'influence de la durée et de la température de cure a également été observée. À des températures de cure élevées (40 °C et 60 °C), les réactions de durcissement réduisent la porosité et, par conséquent, l'absorption d'eau. Ce phénomène est plus marqué dans les échantillons de béton durcis à haute température, ce qui suggère que la chaleur favorise la réactivité du ciment, réduisant ainsi la porosité et l'absorption d'eau. De ce fait, les échantillons contenant plus de 50 % de granulats d'enrobés recyclés (DBB) ont présenté une réduction de l'absorption d'eau au fil du temps, notamment après 90 et 180 jours de cure, indiquant une diminution de la porosité.

En termes de durabilité, une porosité réduite, qui induit une absorption d'eau moindre, est associée à une meilleure résistance aux agressions chimiques et physiques. Si les mélanges à forte proportion de DBB présentent initialement une absorption d'eau plus élevée du fait de leur porosité accrue, un durcissement prolongé à haute température permet la densification de la matrice, réduisant ainsi l'absorption d'eau et améliorant la durabilité du béton. Ces résultats suggèrent que la maîtrise de la porosité est essentielle à la production d'un béton durable, notamment en milieux humides ou agressifs (Fig. 5.18).

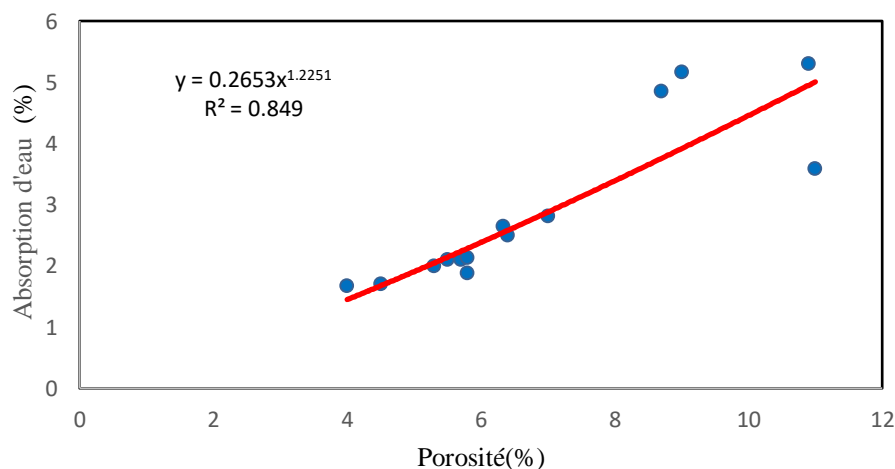


Figure 5.18:Corrélation entre la porosité et l'absorption d'eau.

5.4 Attaques acide et sulfatique**a) Attaques sulfate**

La figure 5.19 présente la variation de masse d'échantillons de béton compacté au rouleau (BCR) immergés dans des solutions à 5 % de Na_2SO_4 et de MgSO_4 . Lorsque le DBB est incorporé à des taux de 25 %, 50 %, 75 % et 100 %, un gain de masse est observé après 220 jours d'immersion dans le MgSO_4 , comparativement au béton de référence (BCR0). À l'inverse, les échantillons immergés dans le Na_2SO_4 présentent une perte de masse d'environ 65 %. Le béton exposé au MgSO_4 subit une expansion plus marquée que celui exposé au Na_2SO_4 . Cette perte de masse est principalement due à la porosité interconnectée de la matrice cimentaire, qui facilite la pénétration des ions sulfate et le lessivage subséquent des composés calciques dans la solution acide environnante. [81,90,94,110]

Les résultats révèlent un gain de masse régulier jusqu'à 15 jours d'immersion, suivi d'une augmentation continue. Ce phénomène est lié à la formation de phases minérales expansives telles que le gypse et l'ettringite secondaire, qui s'accumulent et provoquent un gonflement et des microfissures au sein de la pâte de ciment. Lorsque ces cristaux dépassent la capacité des pores, la pression de cristallisation interne augmente, entraînant des fissures superficielles. L'attaque par les sulfates est due à des réactions chimiques entre les ions sulfate en solution et l'aluminate tricalcique (C_3A) présent dans le ciment, formant des hydrates de sulfate de calcium. Parmi les mélanges testés, le BCR0 (témoin) présente le plus faible gain de masse (0,5 %), tandis que le BCR100 affiche le plus élevé (3 %). De plus, la perte de masse du BCR50 est environ 50 % inférieure à celle du BCR100 dans les conditions d'exposition les plus agressives.

Globalement, les résultats suggèrent que le remplacement de 50 % des granulats grossiers naturels par du DBB dans le BCR offre des performances prometteuses pour les trottoirs dans les environnements contenant des sulfates et des chlorures. Notamment, les BCR25 et BCR50 n'ont subi qu'une perte de masse supplémentaire de 4 % et 2 %, respectivement, par rapport au témoin, en présence de sulfates, ce qui confirme leur aptitude à la construction de chaussées à proximité de zones riches en sulfates.

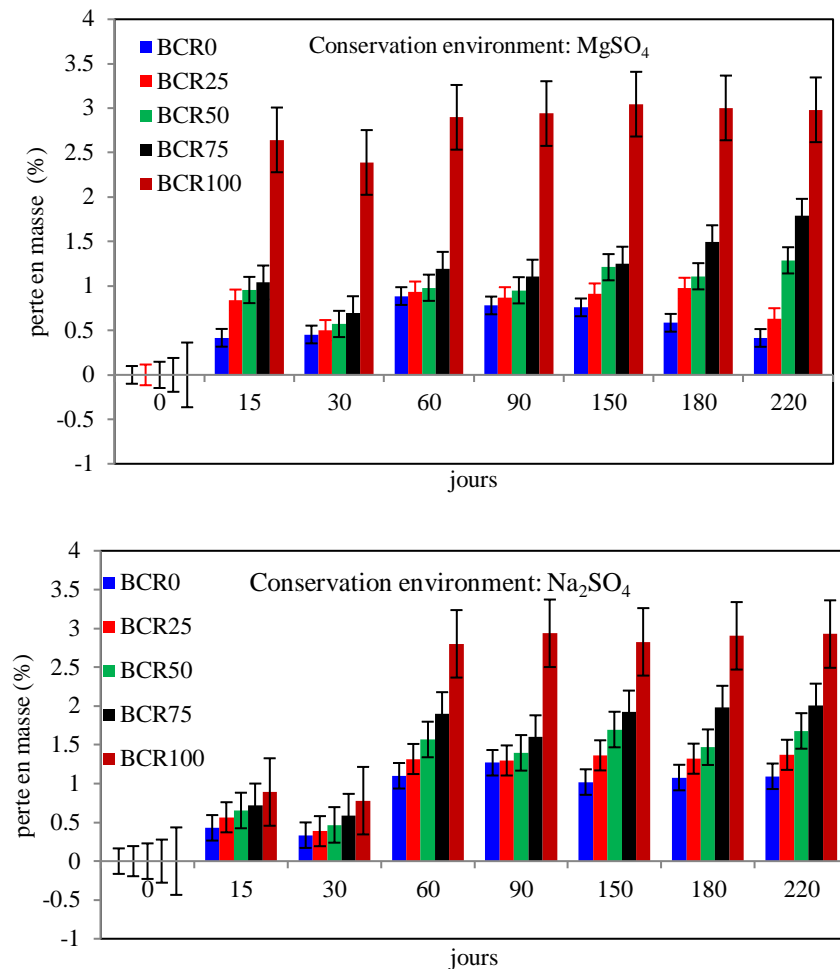


Figure 5.19: Perte de masse des BCR immergés dans les solutions sulfatiques : MgSO₄ et Na₂SO₄

b) Attaque acide

La figure 5.20 illustre la perte de masse subie par le béton compacté au rouleau (BCR) avec différents taux de substitution de granulats recyclés (DBB) (25 %, 50 %, 75 % et 100 %) lorsqu'il est exposé à l'acide chlorhydrique (HCl) et à l'acide sulfurique (H₂SO₄) sur une période de 0 à 220 jours. Ces données sont essentielles pour évaluer la résistance du béton aux acides, car ces milieux sont connus pour accélérer sa dégradation structurelle.

Sous l'effet de l'acide chlorhydrique (HCl), le mélange de référence (0 % DBB) présente une perte de masse progressive, atteignant 1,62 % après 220 jours. Le taux de perte de masse est plus marqué durant les premières phases (entre 15 et 60 jours) avant de se stabiliser. Plus la teneur en DBB augmente, plus la perte de masse est importante. Par exemple, le mélange contenant 100 % de DBB affiche une perte de masse de 2,83 %, soit près du double de celle du témoin. Cette tendance suggère que les bétons à forte teneur en DBB se dégradent plus rapidement en milieu acide, probablement en raison d'une porosité et d'une perméabilité

accrues. Le bitume résiduel présent sur les granulats de DBB pourrait faciliter l'infiltration d'acide et d'eau, accélérant ainsi la dégradation[110].

Le comportement du béton exposé à l'acide sulfurique (H_2SO_4) présente des tendances similaires à celles observées avec l'acide chlorhydrique (HCl). Le mélange de référence (0 % de DBB) montre une augmentation progressive de la perte de masse, atteignant environ 1,49 % après 220 jours. La perte la plus importante survient durant la phase initiale (entre 15 et 60 jours), après quoi les valeurs se stabilisent. Plus le pourcentage de DBB augmente, plus la perte de masse est prononcée. Ainsi, le mélange contenant 100 % de DBB enregistre une perte de masse de 2,63 % à 220 jours. Cette tendance confirme qu'une teneur plus élevée en DBB entraîne une plus grande détérioration, probablement due à l'action agressive de l'acide sulfurique sur la matrice cimentaire. La formation de composés expansifs tels que le gypse et l'ettringite secondaire, sous-produits de la réaction de l'acide avec les phases calciques, peut induire des contraintes internes, provoquant des fissures et une dégradation accrue de la structure du béton[102].

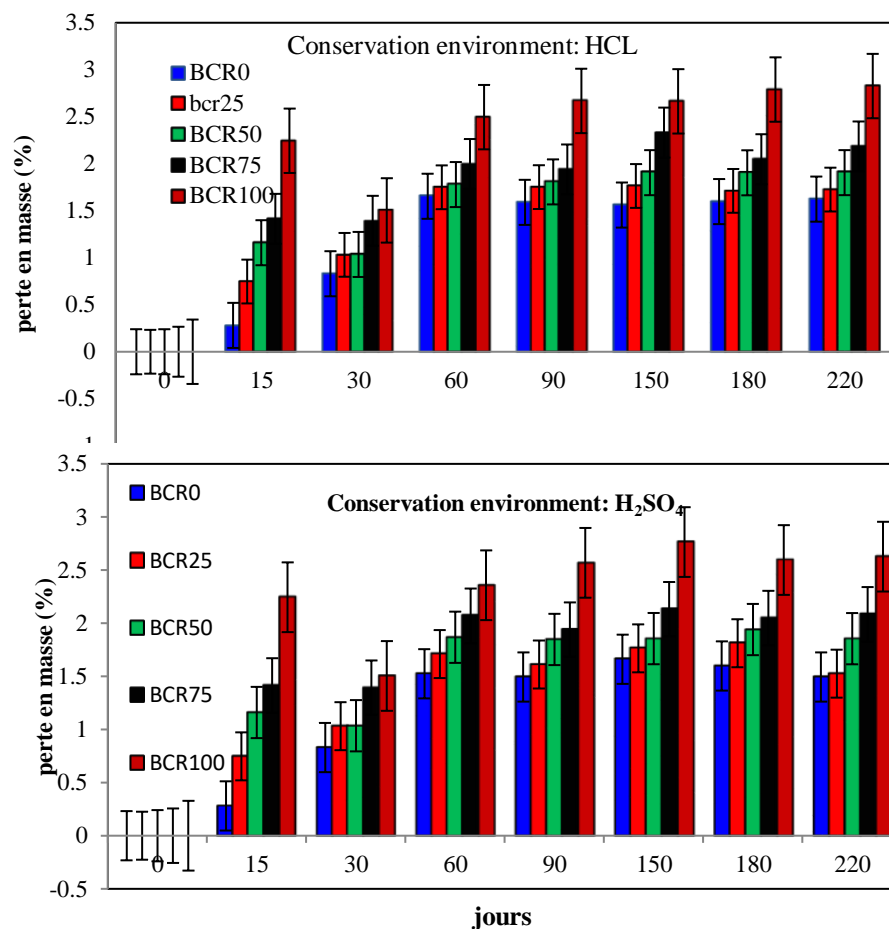


Figure 5.20: Comparaison des pertes de masses mesurées et calculées de mortiers immergés dans les solutions acides: H_2SO_4 et HCl

L'exposition simultanée à l'acide chlorhydrique (HCl) et à l'acide sulfurique (H₂SO₄) soumet le béton à des réactions chimiques intenses qui compromettent progressivement son intégrité. La corrélation entre l'augmentation de la teneur en agrégats recyclés (DBB) et la perte de masse plus importante souligne le rôle crucial de la porosité dans la résistance aux acides. Plus la teneur en DBB augmente, plus la perméabilité du béton s'accroît, le rendant plus vulnérable à la pénétration des acides et aux attaques chimiques subséquentes [92].

Ces résultats corroborent des recherches antérieures montrant que, malgré ses avantages environnementaux, l'incorporation de DBB dans le béton peut compromettre sa durabilité en milieu acide. La porosité élevée du DBB et la nature du bitume résiduel peuvent accélérer les processus de dégradation, réduisant ainsi les performances à long terme du béton en conditions chimiquement agressives[96].

Les données présentées dans la figure 5.20 illustrent la perte de masse subie par le béton compacté au rouleau (BCR) contenant différentes proportions de granulats recyclés d'enrobés (DBB) (25 %, 50 %, 75 % et 100 %) après immersion dans des solutions de sulfate de sodium (Na₂SO₄) et de sulfate de magnésium (MgSO₄) pendant une période de 0 à 220 jours. Ces expériences visaient à évaluer la résistance du béton aux sulfates, un facteur essentiel dans les environnements où des concentrations élevées de sulfates peuvent accélérer sa dégradation.

Lors d'une exposition au sulfate de sodium (Na₂SO₄), le mélange de référence sans DBB (granulats d'enrobés recyclés) présente une perte de masse croissante et constante, atteignant environ 1,09 % au 220e jour. La perte de masse la plus importante survient au cours des premières phases (15 à 30 jours), après quoi les valeurs tendent à se stabiliser, probablement en raison de la formation de composés expansifs tels que l'ettringite. Cependant, la perte de masse augmente avec la teneur en DBB dans le béton. Par exemple, le mélange contenant 25 % de DBB enregistre une perte de masse de 1,37 %, tandis que le mélange contenant 100 % de DBB présente une augmentation significative à 2,93 % après 220 jours. Cette tendance suggère qu'une teneur plus élevée en DBB rend le béton plus vulnérable à l'attaque par les sulfates. La structure poreuse du DBB accroît la perméabilité du béton, facilitant la pénétration des ions sulfate et favorisant les réactions chimiques responsables de la formation de produits expansifs [113].

Dans le cas du sulfate de magnésium (MgSO₄), la perte de masse est généralement plus importante qu'avec le sulfate de sodium (Na₂SO₄). Ceci est attribué aux réactions plus agressives entre le MgSO₄ et les aluminates de calcium présents dans la pâte de ciment, entraînant la formation de minéraux expansifs tels que le gypse et l'ettringite secondaire. Ces

réactions génèrent des contraintes internes, provoquant des microfissures et une dégradation accrue. Le mélange témoin (0 % de DBB) présente une perte de masse d'environ 0,42 % après 220 jours, tandis que le mélange contenant 100 % de DBB subit une perte de masse nettement supérieure de 3 %. Ce résultat souligne la sensibilité accrue des bétons contenant du DBB à l'attaque par le sulfate de magnésium. La porosité et l'hétérogénéité plus élevées du DBB permettent une pénétration plus profonde des ions sulfate, amplifiant les dommages causés par ces réactions chimiques [108].

L'augmentation de la perte de masse observée avec des taux de substitution plus élevés par du DBB suggère que le béton devient plus vulnérable à la dégradation induite par les sulfates à mesure que la teneur en DBB augmente. Cette tendance concorde avec des recherches antérieures indiquant que l'incorporation de DBB modifie la porosité et la composition chimique du béton, augmentant sa sensibilité aux attaques chimiques, notamment dans les environnements riches en ions sulfate [93]. La porosité intrinsèque du DBB facilite une pénétration ionique plus profonde, accélérant les réactions des sulfates et favorisant l'expansion et la fissuration au sein de la matrice du béton. Bien que l'utilisation du DBB dans le béton offre des avantages environnementaux indéniables, ces résultats soulignent l'importance d'optimiser soigneusement la teneur en DBB dans les applications exposées aux sulfates. Des stratégies telles que la limitation du dosage de DBB ou l'intégration de matériaux cimentaires supplémentaires (MCS), notamment les cendres volantes, le laitier ou la fumée de silice, peuvent améliorer significativement la résistance aux sulfates. Ces MCS contribuent à une microstructure plus dense, réduisent la porosité globale et atténuent la formation de produits expansifs responsables de la dégradation et de la perte de masse. De plus, une analyse approfondie des caractéristiques chimiques et des propriétés physiques du DBB pourrait contribuer à l'élaboration de formulations sur mesure pour améliorer la durabilité à long terme du béton dans les environnements riches en sulfates.



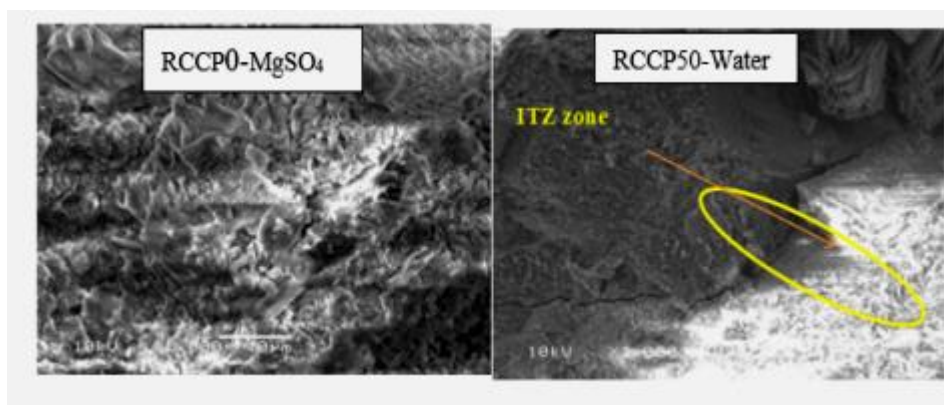
Figure 5.21 : Etats des éprouvettes dans les milieux agrissive après 28j

Les résultats d'attaque à l'acide sulfurique (H_2SO_4) montrent que les mélanges BCR-DBB présentent une résistance chimique comparable à celle du BCR0 pour des taux de substitution inférieurs ou égaux à 50 %. Cette relative résistance s'explique par la présence du film bitumineux hydrophobe recouvrant les granulats DBB, qui constitue une barrière partielle à la pénétration de la solution acide dans la matrice cimentaire. En revanche, pour des taux de 75 % et 100 %, la perte de masse s'accélère, indiquant que la dissolution de la portlandite ($Ca(OH)_2$) et la décalcification des CSH ne sont plus suffisamment contenues. Ces observations sont confirmées par les analyses DRX qui révèlent une réduction des pics caractéristiques du quartz et une intensification des raies associées au gypse secondaire dans les échantillons exposés aux sulfates.

5.5 Microstructure des BCR conservés dans les solutions d'attaque

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) d'échantillons de béton compacté au rouleau (BCR) contenant 50 % de granulats d'enrobés recyclés (DBB) révèle des différences notables de comportement microstructural selon le milieu de cure. En milieu aqueux, le béton présente une matrice bien développée et hydratée, avec une zone de transition interfaciale (ZTI) clairement définie entre les granulats recyclés et la pâte de ciment neuve. La porosité demeure modérée et aucune détérioration significative n'est observée, ce qui témoigne d'une hydratation efficace du ciment et d'une intégrité structurale stable.

Ces résultats concordent avec des études antérieures, telles que celle de Rout et al. [104], qui ont démontré la faisabilité de l'utilisation de granulats d'enrobés recyclés (DBB) dans les chaussées rigides et ont constaté une bonne adhérence entre les granulats recyclés et la matrice cimentaire. De même, Fakhri et al. (2017)[75] ont observé que les mélanges de béton compacté au rouleau (BCR) contenant des DBB, notamment lorsqu'ils sont associés à du caoutchouc broyé, peuvent atteindre des performances mécaniques adéquates, à condition que la formulation du mélange soit rigoureusement contrôlée.



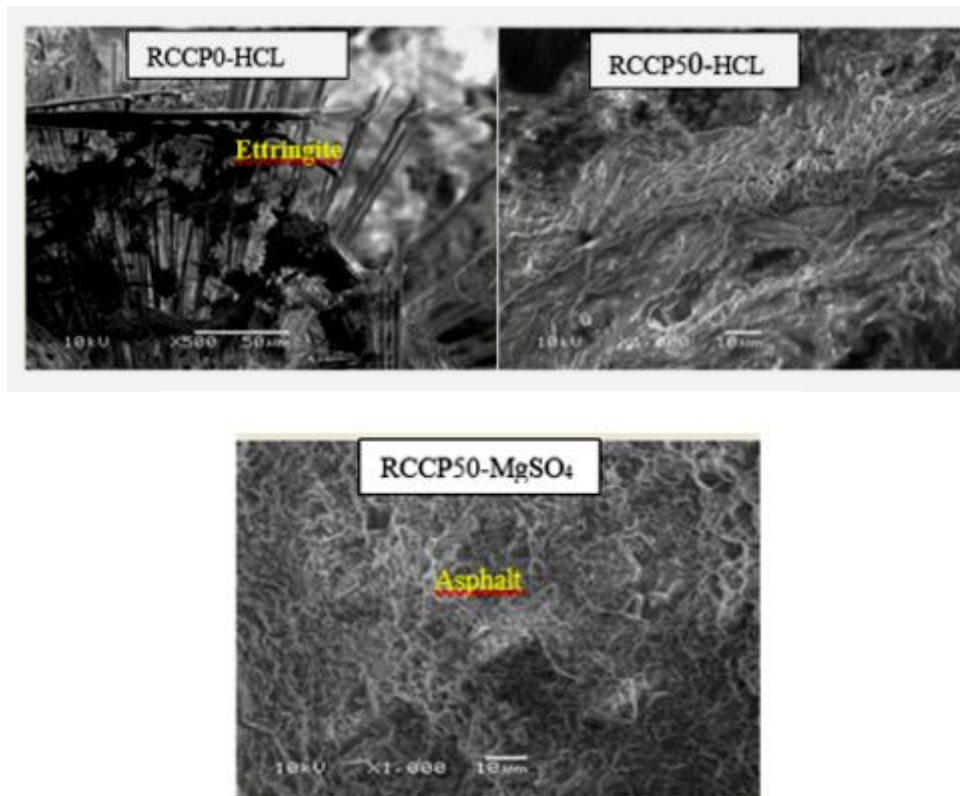


Figure 5.22: Microstructure des BCR conservés dans des solutions acides et sulfatiques

Cependant, soumis à des environnements agressifs, le béton présente une dégradation microstructurale marquée. En présence de sulfate de magnésium, on observe une dissolution manifeste de la portlandite et une détérioration du gel d'hydrate de silicate de calcium (CSH), ainsi que la formation de produits secondaires tels que le gypse et l'hydrate de silicate de magnésium (MSH). Ces modifications s'accompagnent de microfissures et d'une porosité accrue. Des profils de dégradation similaires ont été rapportés par Singh et al. [111], qui ont souligné l'impact de l'exposition chimique sur la durabilité du béton contenant des granulats d'enrobés recyclés (DBB), en particulier en présence d'ajouts minéraux. L'exposition à l'acide chlorhydrique (HCl) compromet davantage la microstructure du béton. Les principaux produits d'hydratation, tels que la portlandite et le gel de CSH, sont considérablement réduits, voire totalement dissous, la zone de transition interfaciale (ZTI) est fortement fragilisée et des dépôts de chlorure de calcium sont observés, compromettant ainsi la durabilité à long terme du matériau [79].

sont parvenus à des conclusions comparables, notant que les performances du béton autoplaçant avec DBB sont fortement influencées par la composition du liant et les conditions d'exposition environnementales.

Globalement, les résultats de cette étude concordent avec les données existantes et confirment que, si le DBB constitue une alternative viable et durable pour la production de béton, ses

performances dépendent fortement des facteurs environnementaux et des paramètres de formulation du mélange. Une évaluation rigoureuse des conditions d'exposition et de la compatibilité des matériaux est essentielle pour garantir la durabilité et la fiabilité du béton recyclé dans les applications pratiques.

5.6 Diffraction des rayons X (DRX)

Il est essentiel d'analyser le spectre de diffraction des rayons X (DRX) d'un échantillon de béton compacté au rouleau (BCR) contenant 50 % de granulats de béton bitumineux recyclés et conservé dans une solution de sulfate de sodium. L'interprétation doit porter sur les phases minérales formées, la disparition éventuelle d'autres phases et l'influence du sulfate de sodium sur la microstructure et la composition du béton. L'identification précise de chaque pic de diffraction et la constatation de la présence ou de l'absence de phases spécifiques sont cruciales. L'analyse DRX d'un échantillon de BCR contenant 50 % de granulats de béton bitumineux recyclés et conservé dans une solution de sulfate de magnésium révèle une dégradation des principales phases cimentaires. Les pics de portlandite sont fortement atténués, voire disparaissent complètement, indiquant sa dissolution sous l'effet de l'attaque chimique. Des pics de gypse apparaissent suite à des réactions chimiques, et le gel C-S-H est altéré, se transformant probablement en une phase d'hydrate de silicate de magnésium (MSH) moins stable. Les phases inertes, telles que le quartz, restent inchangées. Globalement, l'exposition au sulfate de magnésium entraîne une détérioration de la microstructure, compromettant la résistance et la durabilité du béton.

De même, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) d'un béton compacté au rouleau (BCR) contenant 50 % de granulats de béton bitumineux recyclés, conservés dans une solution de sulfate de sodium, révèle d'importantes modifications chimiques. Ce milieu favorise la formation de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et d'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), produits caractéristiques de l'attaque par les sulfates, susceptibles d'entraîner une expansion interne et des fissures. La présence de pics caractéristiques du quartz, de la portlandite, du C-S-H, du gypse, de l'ettringite et, possiblement, de la calcite (due à la carbonatation) est attendue. La diminution de l'intensité du pic de la portlandite confirme sa réaction avec le sulfate de sodium et la formation consécutive de nouvelles phases expansives. La persistance des pics du quartz est attribuée à l'inertie chimique des granulats, qu'ils soient naturels ou recyclés. Ces résultats concordent avec les conclusions de Rahman et Khattak (2021) [102], qui ont observé une dégradation microstructurale similaire dans le béton contenant à la fois

des granulats recyclés (RCA) et des granulats recyclés (DBB). Leur étude a démontré que les attaques de sulfates entraînent la formation d'ettringite et de gypse, ce qui affecte négativement les performances mécaniques et la durabilité à long terme. En cas d'exposition à l'acide chlorhydrique, le spectre de diffraction des rayons X du béton compacté au rouleau (BCR) contenant 50 % de granulats d'enrobés recyclés (GER) révèle d'importants dommages microstructuraux. La portlandite et le C-S-H sont fortement dissous ou altérés, ce qui fragilise considérablement la matrice. Du chlorure de calcium (CaCl_2) peut se former comme produit de réaction, mais sa détection peut s'avérer difficile en raison de sa solubilité. Le quartz reste intact. Globalement, l'exposition à l'acide chlorhydrique entraîne une détérioration de la matrice cimentaire et une diminution de sa durabilité.

De même, l'exposition à l'acide sulfurique provoque une dégradation importante. L'analyse par diffraction des rayons X révèle la dissolution de la portlandite, la formation de gypse et la transformation des phases d'aluminate en ettringite secondaire. Ces réactions génèrent des contraintes internes, entraînant des fissures et une rupture mécanique. Malgré ces transformations, le quartz reste stable et sert de référence. L'exposition à l'acide sulfurique compromet fortement la résistance et la durabilité du béton.

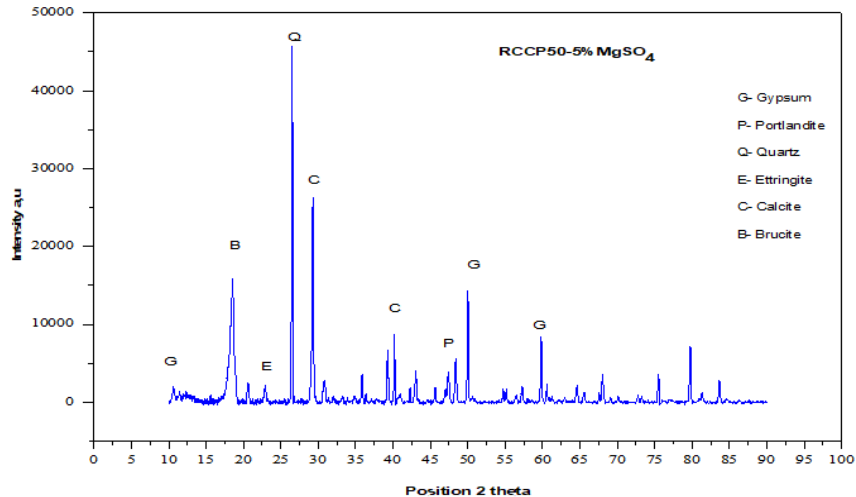


Figure 5.23: BCR50-MgSO₄

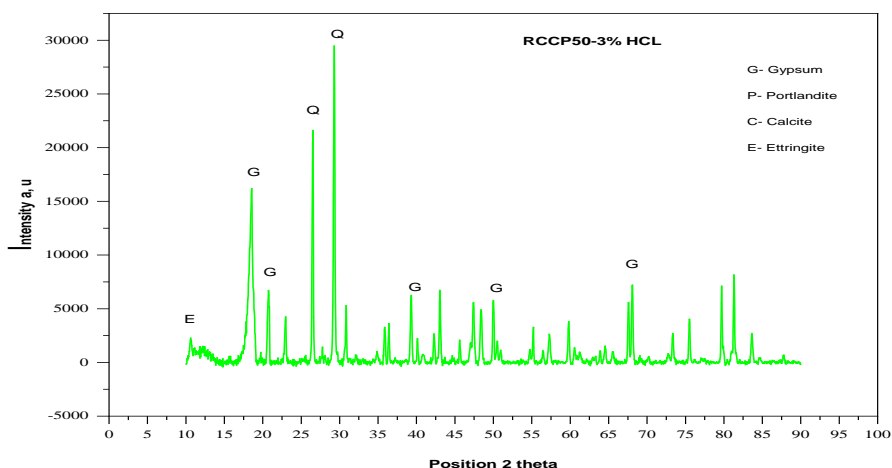


Figure 5.24:BCR50-HCL

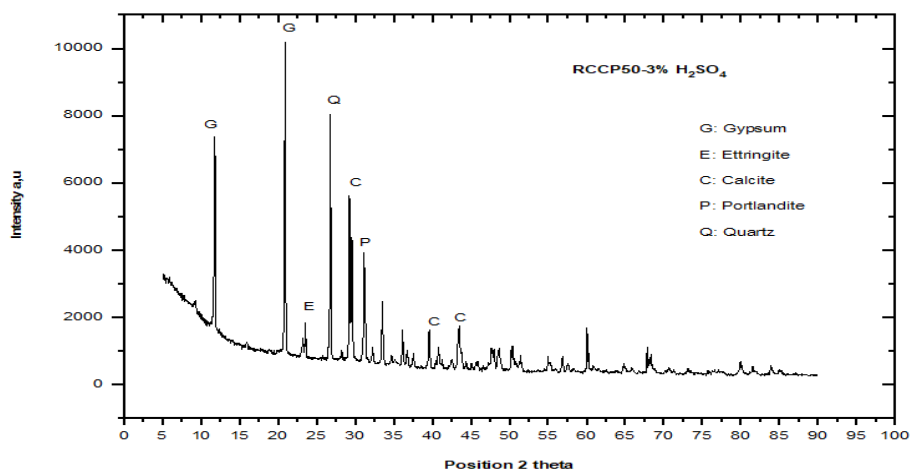


Figure 5.25:BCR50-H₂SO₄

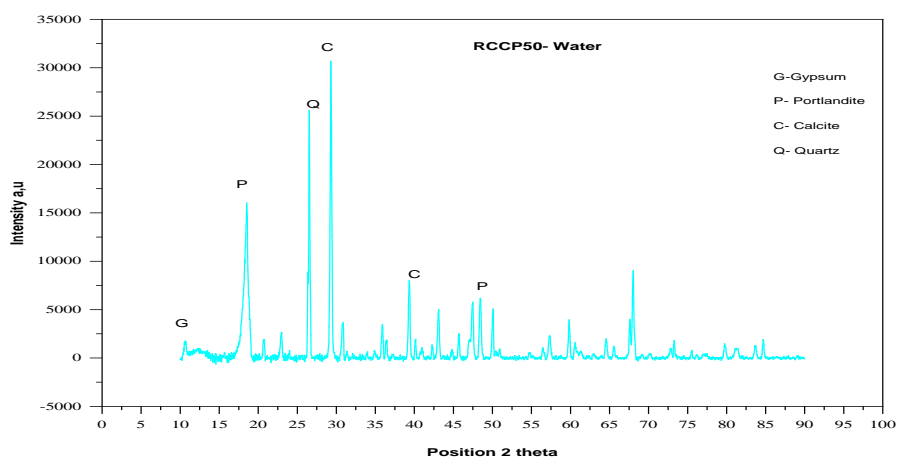


Figure 5.26:BCR50-Eau

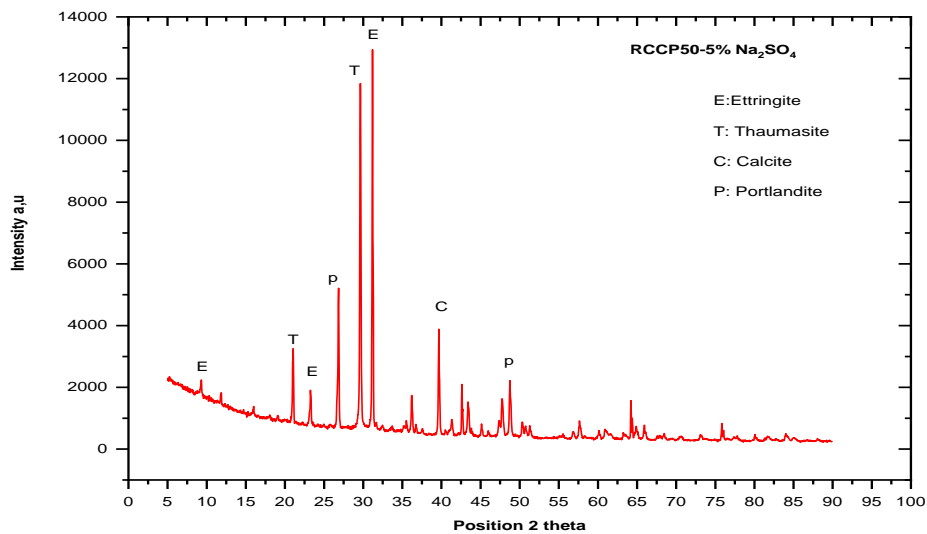


Figure 5.27 :BCR50-Na₂SO₄

À l'inverse, le spectre de diffraction des rayons X (DRX) du béton compacté au rouleau (BCR) contenant 50 % de granulats d'enrobés recyclés (GER) conservés dans l'eau indique une hydratation optimale. Les pics bien définis du C-S-H et de la portlandite suggèrent une hydratation complète, tandis que le quartz reste stable. La cure à l'eau améliore la cristallinité des produits d'hydratation et renforce la matrice. La présence de granulats recyclés ne perturbe pas significativement l'hydratation, bien qu'elle puisse légèrement élargir les pics en raison de la variabilité microstructurale. Ces résultats confirment que la cure à l'eau favorise le développement d'une microstructure robuste, même avec l'intégration de 50 % de GER, ce qui concorde avec les résultats de Morales et al. (2020)[98], qui ont souligné les avantages de la conservation de l'eau pour améliorer l'hydratation du béton de granulats recyclés.

5.7 Prédiction de la résistance à la compression basée sur la perte de masse des BCR

Plusieurs chercheurs [92, 104] ont indiqué l'existence d'une relation entre la résistance mécanique et la durabilité du ciment. Ces chercheurs ont constaté une corrélation importante entre la perte de masse et la résistance à la compression dans les mélanges de béton compacté au rouleau (BCR) à forte teneur en agrégats recyclés (DBB), qui présentent une perte de masse significativement plus élevée après une exposition prolongée à des solutions acides.

Cette perte est étroitement liée à la diminution de la RC, atteignant parfois une réduction de 40 à 50 % après 180 à 360 jours d'immersion dans l'acide sulfurique.

La prédiction de la résistance à la corrosion sous contrainte (CSC) du béton compacté au rouleau (BCR) en milieux agressifs est un enjeu majeur pour les ingénieurs civils, car elle permet de comprendre le comportement du béton sous l'effet des attaques sulfatées et acides. C'est pourquoi le développement d'une méthode d'estimation de la BCR immergée dans des solutions sulfatées et acides à différents âges est essentiel.

Dans le cadre de ce travail, une analyse approfondie des résultats expérimentaux a été menée afin d'identifier une loi de comportement reliant deux grandeurs (Résistance à la compression et la perte en poids). Après plusieurs phases d'ajustement et de calibration du modèle, une relation de type exponentiel a été retenue comme étant la plus représentative des données expérimentales. Cette relation permet de prédire la résistance à la compression S_c en fonction de la perte en poids des BCR formulés avec du DBB. Le modèle prend également en compte l'influence du type le pourcentage des granulats recyclés telles que le DBB, la solution chimiques, ainsi que l'âge du BCR, paramètres reconnus pour leur rôle déterminant dans les mécanismes de durabilité et le développement des performances mécaniques.

Le modèle proposé repose sur l'analyse de l'écart d'erreur, défini par l'équation (5.5). Cet écart est calculé pour l'ensemble des points expérimentaux et correspond à la différence entre la résistance à la compression prédite du modèle et celle mesuré par essais expérimentaux. L'étude de la distribution de ces écarts permet d'évaluer la précision du modèle, d'identifier d'éventuelles tendances systématiques et d'apprécier sa capacité à reproduire fidèlement le comportement mécanique des BCR étudiés.

$$Erreur = \sqrt{\frac{\sum(R_c \text{ Prédite} - R_{C\text{mesuré}})^2}{n}} \quad (5.5)$$

Les relations entre la résistance à la compression R_c et la perte en poids W proposées dans cette étude peuvent s'écrire comme suit :

$$R_c(t, \% \text{ RAP}) = a \cdot e^{-0.3 \times W(t, \% \text{ RAP})} + b \quad (5.6)$$

Où W (%) représente l'indice de perte de poids et R_c la résistance à la compression au temps t (jours). Les coefficients a et b sont obtenus par ajustement des résultats expérimentaux du béton étudié.

Les valeurs des paramètres de l'équation (5.6) sont présentées dans le tableau 5.3.

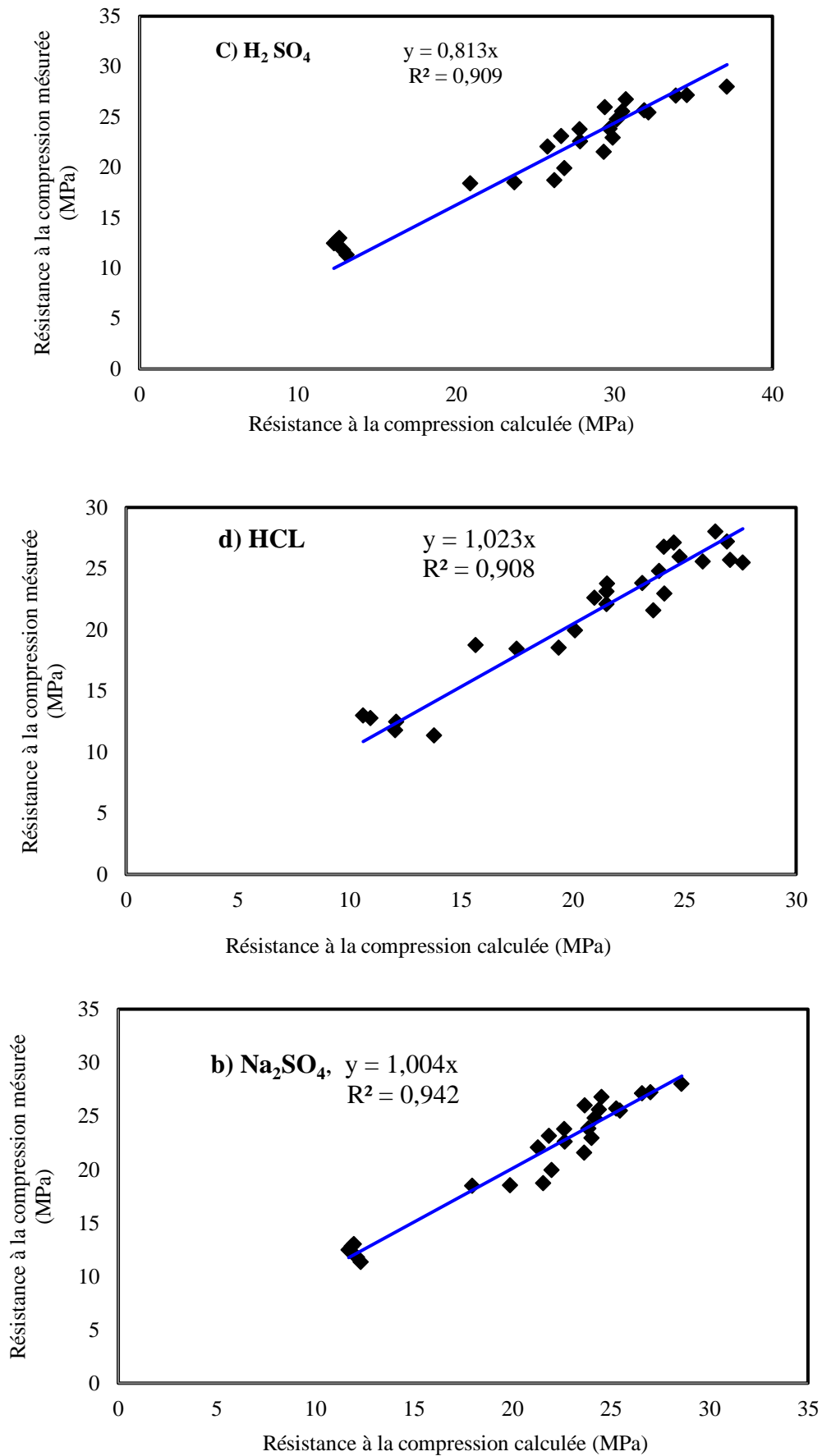
Tableau 5.3 : Valeurs des paramètres de l'équation (5.6) pour différentes solutions.

	a	b	R ²	Écart d'erreur (%)
sulfate de sodium	43.4	0,6	0,94	3
sulfate de magnésium	32,8	0,54	0,94	4
Acide sulfurique	81.1	2,58	0,897	6
Acide chlorhydrique	78.2	2,40	0,913	5

5.8 Comparaison et validation de l'équation proposée

La figure 5.28 compare les valeurs expérimentales de résistance à la compression avec les prédictions issues de l'équation proposée (5.6) pour l'ensemble des mélanges étudiés. Une concordance très satisfaisante est observée, confirmée statistiquement par un coefficient de corrélation élevé (proche de l'unité) et un écart-type relatif inférieur à 6 % (voir tableau 5.4). Ces résultats indiquent que l'équation (5.6) permet de prédire avec précision la résistance à la compression à partir de la perte de masse pour différents bétons soumis à une immersion en solutions sulfatiques et acides.

Pour évaluer l'efficacité et la généralité du modèle, une validation externe a été réalisée en confrontant ses prédictions à trois résultats de données expérimentales indépendants, publiés dans la littérature [85-108]. Le tableau 5.5 présente la comparaison entre les valeurs mesurées et calculées de la résistance à la compression (R_c) pour ces mélanges de référence. L'excellente adéquation observée est une nouvelle fois quantifiée par un coefficient de corrélation proche de l'unité et un faible écart-type (inférieur à 6 %). Cette validation externe démontre que l'équation (5.6) est également capable de prédire avec fiabilité le comportement mécanique de bétons compactés au rouleau (BCR) immergés dans divers environnements agressifs à base de sulfates et d'acides.



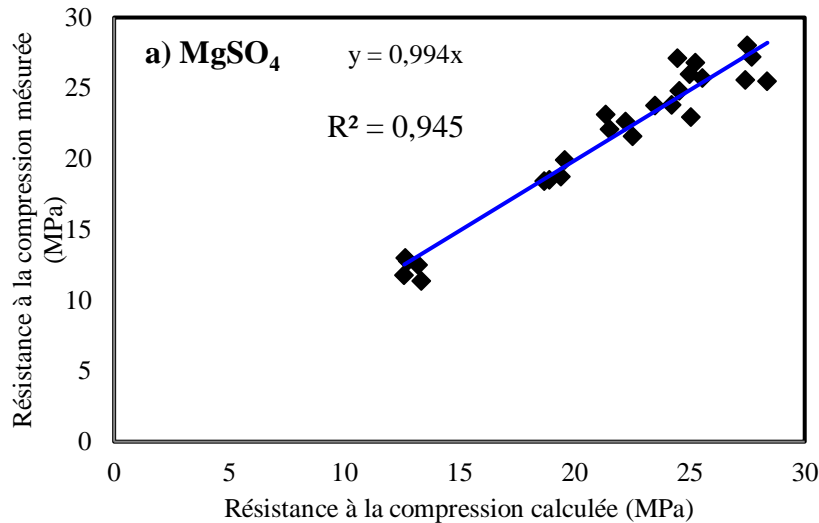


Figure 5.28 : Comparaison de la résistance à la compression mesurée et calculée pour le béton immergé dans différents types de solutions

Tableau 5.4 : Comparaison de Sc mesuré et calculé par l'équation (5.6) pour trois ensembles de données.

Recherches	Solution	Équation de corrélation	R ²	Écart d'erreur (%)
[85]	H ₂ SO ₄	Sc(m) = 0,795× Sc(cal)	0,91	4
[85]	HCL	Sc(m) = 0,85× Sc(cal)	0,93	3
[108]	H ₂ SO ₄	Sc(m) = 0,90× Sc(cal)	0,94	2
[110]	HCL	Sc(m) = 0,71× Sc(cal)	0,88	5
[110]	H ₂ SO ₄	Sc(m) = 0,79× Sc(cal)	0,85	6

Conclusions

L'incorporation de granulats d'enrobés recyclés dans le béton compacté au rouleau influence considérablement ses propriétés physico-mécaniques et sa durabilité. Les résultats de cette étude révèlent que :

- l'ajout de ces matériaux recyclés augmente la porosité du béton en raison des vides inhérents à leur structure, entraînant par conséquent une absorption d'eau plus importante. Plus la teneur en granulats recyclés est élevée, plus la porosité tend à augmenter, créant ainsi une structure plus poreuse qui facilite la pénétration de l'eau. Parallèlement, la résistance à la compression diminue généralement avec l'augmentation de cette teneur,

particulièrement lorsque les proportions sont élevées. Cette réduction est directement attribuable à la porosité accrue et à l'absorption d'eau liées à l'utilisation des granulats recyclés, qui engendrent une matrice plus poreuse fragilisant le béton.

- En ce qui concerne la durabilité face aux agressions chimiques, les bétons incorporant des granulats recyclés présentent une résistance inférieure aux attaques par sulfates (Na_2SO_4) et acides (HCl et H_2SO_4) comparativement aux bétons conventionnels. Cette vulnérabilité s'explique principalement par la porosité accrue qui facilite la pénétration des ions agressifs au sein du matériau. Toutefois, les mélanges à faible teneur en granulats recyclés, notamment ceux contenant environ 25%, démontrent des performances nettement supérieures à ceux à teneur plus élevée. Les formulations comportant moins de 50% de granulats recyclés permettent d'obtenir une résistance chimique acceptable, ce qui indique qu'un certain degré de substitution demeure viable.
- Il convient néanmoins de souligner que l'application de conditions de cure appropriées, particulièrement à des températures élevées de 40°C et 60°C, atténue significativement les effets négatifs observés. L'hydratation accrue durant le durcissement réduit la porosité et l'absorption d'eau au fil du temps, démontrant qu'avec une cure optimale, l'impact des granulats recyclés sur ces propriétés peut être maîtrisé. Les bétons à faible teneur en granulats recyclés, par exemple 25%, peuvent ainsi conserver une résistance à la compression relativement plus élevée que les mélanges à plus forte teneur. Ces observations suggèrent qu'une formulation soignée, associée à des stratégies de cure appropriées et à une optimisation du mélange, permet de maintenir des performances satisfaisantes tant sur le plan mécanique qu'en milieux agressifs.
- En définitive, l'effet net de l'utilisation de granulats d'enrobés recyclés dans le béton compacté au rouleau résulte d'un compromis entre les avantages environnementaux liés à l'emploi de matériaux recyclés et la réduction potentielle des propriétés du matériau, telles que la résistance mécanique et la résistance aux agressions chimiques. Grâce à des techniques de durcissement appropriées, notamment à haute température, les impacts négatifs sur les propriétés mécaniques et la durabilité peuvent être atténués. De plus, cette approche constitue une solution durable en réduisant le besoin en granulats vierges, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement.

Chapitre 6



Modélisation des chaussées en BCR

Avec (logiciel ANSYS 16.0)

Introduction

L'ingénierie des chaussées rigides constitue un domaine où convergent les exigences de performance mécanique, de durabilité et d'optimisation économique. Face à la complexité des sollicitations routières et aux contraintes environnementales, l'analyse de ces infrastructures nécessite une approche combinant théorie, expérimentation et modélisation numérique.

Les chaussées en béton compacté au rouleau (BCR) représentent une solution technique pour les infrastructures soumises à des trafics lourds. Leur fonction principale consiste à répartir efficacement les charges vers les couches sous-jacentes tout en limitant les déformations irréversibles [7]. La configuration moderne privilégie des dalles courtes sans armatures ni goudons, avec un maillage de joints espacés permettant de maîtriser la fissuration spontanée [4, 115, 116]. Toutefois, le phénomène de pompage et l'érosion progressive aux joints nécessitent le choix de matériaux de fondation résistants, tels que les graves traitées au ciment [4, 117]. Parallèlement, les impératifs de développement durable ont conduit à explorer l'incorporation de matériaux recyclés (DBB) dans le BCR, soulevant des interrogations sur leurs effets mécaniques.

Le présent travail poursuit un double objectif : examiner les méthodologies d'analyse structurale des chaussées rigides, depuis les formulations analytiques classiques de Westergaard [116], Hogg [118], Burmister [120] et Peltier et Jeuffroy [121] jusqu'aux approches numériques tridimensionnelles par éléments finis [127, 128], et caractériser expérimentalement l'influence de la température de cure et du taux de DBB sur les propriétés du BCR.

Notre démarche combine plusieurs approches complémentaires. Nous développons une modélisation tridimensionnelle par éléments finis sous ANSYS [128] pour différentes configurations de chargement. La validation s'appuie sur une campagne expérimentale portant sur cinq formulations de BCR (0 à 100% de DBB) curées à trois températures (20°C, 40°C, 60°C) et testées à différentes échéances. Cette approche intégrée s'inspire des travaux récents sur la modélisation numérique des chaussées en BCR [129, 130, 131].

La confrontation des résultats analytiques, numériques et expérimentaux permet d'identifier les zones critiques des dalles et de quantifier l'influence des paramètres de formulation sur le comportement structural. Ce travail fournit aux ingénieurs un cadre

méthodologique pour concevoir des infrastructures routières durables intégrant des matériaux recyclés.

6.1. Conception structurale des chaussées en béton compacté au rouleau

L'architecture des structures de chaussées rigides repose généralement sur un système de dalles relativement courtes, non renforcées par armatures, dépourvues de dispositifs de transfert de charge aux joints et segmentées par des discontinuités contrôlées destinées à prévenir la fissuration aléatoire [4]. Cette stratégie constructive vise principalement à minimiser les tensions internes résultant des phénomènes de retrait, qu'ils soient d'origine thermique ou hydrique.

La gestion dimensionnelle des dalles nécessite l'implantation de joints longitudinaux en rive ainsi que de joints transversaux de retrait-flexion, positionnés selon un espacement variant entre 6 et 15 mètres avec une inclinaison de 1/6 par rapport à l'axe [4]. Cette disposition crée un réseau permettant un contrôle efficace des mouvements de la structure.

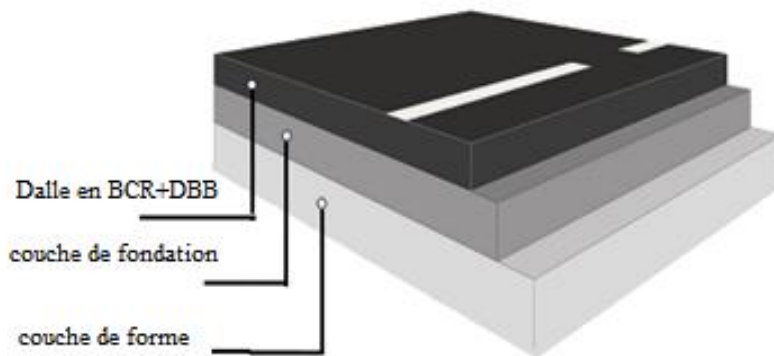


Figure6.1: Principe de composition d'une chaussée rigide en BCR

Les travaux récents de Zdiri et collaborateurs [3] décrivent la construction de chaussées en BCR sous forme de dalles courtes sans armatures ni goudons, avec un maillage de joints espacés de 4 mètres dans les deux directions principales [140]. Cette configuration vise à maîtriser la fissuration spontanée tout en limitant les dimensions excessives des dalles.

L'évolution des conditions d'appui au niveau des joints, la présence potentielle d'eau à l'interface entre la dalle et sa fondation, ainsi que les sollicitations répétées du trafic à proximité des discontinuités peuvent altérer progressivement les mécanismes de transfert de charge et engendrer le phénomène d'érosion connu sous le terme de "pompage" [4]. Ce processus se caractérise par l'expulsion d'eau et de particules fines par les joints,

conduisant à terme à la rupture structurale. Pour cette raison, le choix d'un matériau de fondation résistant à l'érosion, tel que les graves traitées au ciment, doit être effectué dès la phase initiale de conception [4,133].

6.2. Approches bidimensionnelles pour l'analyse des contraintes

L'analyse théorique des chaussées rigides vise à résoudre le problème mécanique d'une dalle de dimensions infinies reposant sur une fondation homogène et soumise à des charges verticales distribuées [137]. Deux approches principales sont envisageables : le traitement en tant que plaque mince ou en tant que solide élastique tridimensionnel.

6.2.1. Approche de Westergaard (1926)

La première formulation théorique a été proposée par Westergaard [116], qui a traité le cas d'une dalle mince respectant l'hypothèse de conservation des sections planes (hypothèse de Navier). Dans ce modèle, la couche support présente un comportement s'écartant des lois classiques de l'élasticité [115].

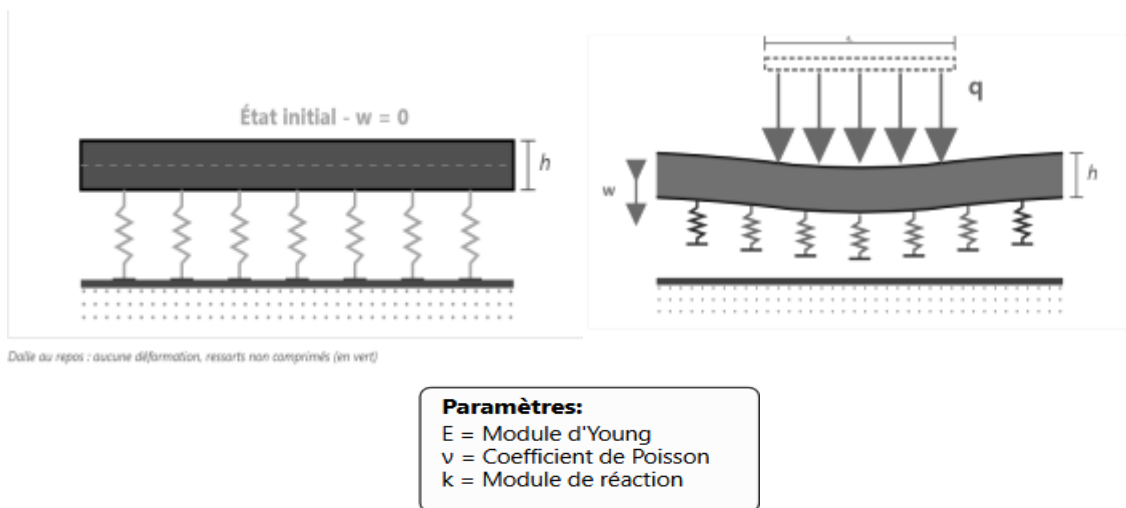


Figure 6.2: Modèle de Westergaard

L'originalité de cette approche réside dans la modélisation du sol comme un ensemble de ressorts indépendants réagissant localement aux sollicitations [117]. Cette simplification introduit un paramètre k , désigné comme "module de réaction", ayant les dimensions d'un poids volumique. Cette hypothèse implique que le sol ne peut développer ni résistance au cisaillement ni rigidité en flexion.

La formulation développée par Westergaard pour quantifier la contrainte de traction à la base de la dalle intègre plusieurs paramètres : la charge appliquée P , l'épaisseur h de la dalle, le rayon de chargement a , le module d'Young E , le module de réaction k , le

coefficient de Poisson ν , ainsi qu'un coefficient C dépendant du rayon de rigidité relative ℓ [116].

Le rayon de rigidité relative ℓ constitue un paramètre clé caractérisant l'interaction mécanique entre la dalle et son support. Sa valeur découle des propriétés élastiques (E, ν) et géométriques (h) de la dalle, ainsi que du module de réaction k de la fondation.

La contrainte s'exprime selon :

$$\sigma = \frac{3p}{h^2} \times C \quad (6.1)$$

Avec

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Cette méthodologie présente néanmoins plusieurs restrictions significatives :

- Limitation à une structure bicouche
- Application de la théorie des plaques sur sol semi-infini
- Hypothèse simplificatrice d'absence de transmission de cisaillement par le sol
- Impossibilité de traiter simultanément plusieurs charges
- Proportionnalité locale entre déformation et charge (pas d'effet à distance)
- Représentation strictement bidimensionnelle

6.2.2. Méthode de Hogg

L'approche de Hogg repose également sur la théorie des plaques minces, mais intègre un sol présentant un comportement élastique [117]. Dans cette formulation, le support est considéré comme un milieu continu élastique semi-infini, dont les déformations de surface sont régies par les équations classiques de l'élasticité.

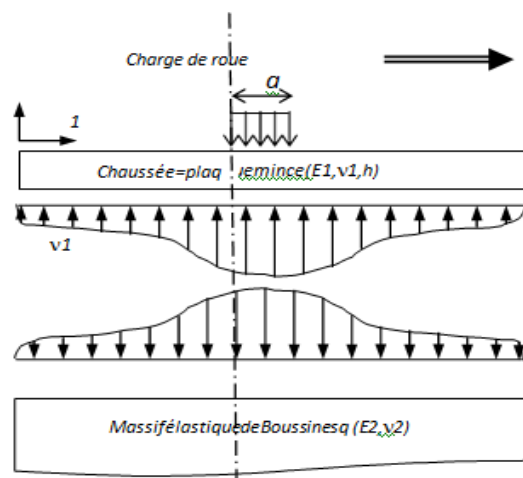


Figure 6. 3 : Modèle de Hogg[118]

L'expression proposée par Hogg [118] pour la contrainte de traction basale s'écrit :

$$\sigma = \frac{3p}{2\pi h^2} \times f \frac{a}{l}$$

Et puisque (6.2)

$$\sigma = \frac{3q_0 a^2}{2h^2} \times f \frac{a}{l}$$

Cette méthode présente les limitations suivantes :

- Hypothèse de milieu élastique semi-infini pour le sol
- Incapacité à traiter les effets de bord et de coin
- Restriction à un chargement unique
- Formulation bidimensionnelle uniquement
- Complexité calculatoire élevée

6.2.3. Formulation multicouche de Burmister

Burmister [120] a développé une solution générale pour n couches élastiques superposées. Dans cette approche, la couche supérieure n'est plus assimilée à une plaque et l'hypothèse de Navier est abandonnée. La résolution s'effectue en analysant l'équilibre de n solides élastiques empilés, contournant ainsi les limitations de la théorie des plaques. Les interfaces peuvent être modélisées comme parfaitement adhérentes ou totalement glissantes.

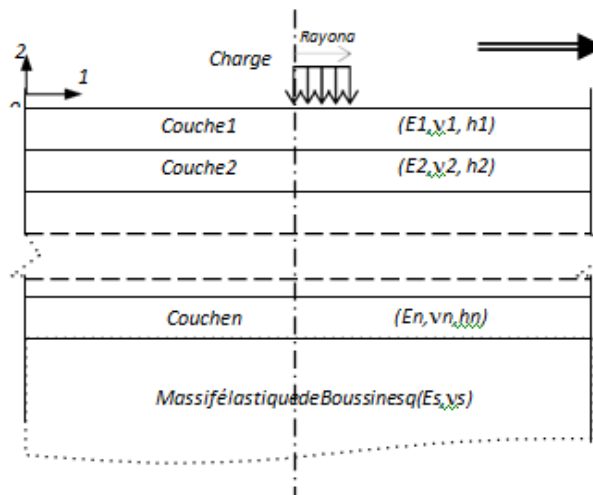


Figure 6.4 : Modèle multicouche de Burmister][120]

Contraintes de cette méthode :

- Comportement strictement élastique linéaire des couches
- Conditions d'interface idéalisées (adhérence parfaite ou glissement total)
- Impossibilité de considérer les effets de bord et de coin
- Représentation bidimensionnelle
- Lourdeur des calculs

6.2.4. Solution de Peltier et Jeuffroy

Les recherches menées par Peltier et Jeuffroy [121] ont démontré, moyennant certaines approximations contrôlées, qu'une convergence satisfaisante des résultats peut être obtenue que la structure soit traitée comme une plaque mince ou comme un solide élastique tridimensionnel. Leur approche permet de résoudre la configuration d'une dalle supportée par deux couches de caractéristiques élastiques différentes.

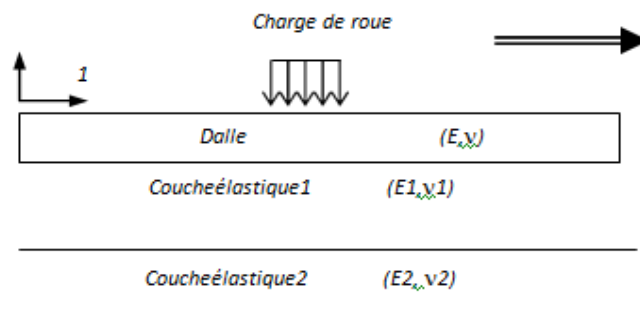


Figure 6.5 : Modèle de Peltier et Jeuffroy][121]

Des abaques ont été élaborés permettant de déterminer la contrainte de traction dans la couche supérieure, la pression sur le sol de fondation ainsi que la flèche centrale [117]. L'intérêt majeur de ces outils graphiques réside dans leur capacité à quantifier l'effet de dalle et à estimer les déflexions admissibles.

Toutefois, l'applicabilité pratique demeure limitée en raison des dimensions finies réelles des chaussées et de la non-proportionnalité exacte entre déformation et effort, particulièrement pour les matériaux granulaires dont les modules varient significativement avec la température, l'humidité et le vieillissement de la structure.

6.3. Modélisation de l'interface pneumatique-chaussée

6.3.1. Représentation de la zone de contact

L'application des méthodes de résolution mécanique requiert la connaissance précise de la géométrie de contact entre le pneumatique et la surface de la chaussée [115]. L'hypothèse d'uniformité de la pression sur toute l'empreinte est généralement adoptée. Les caractéristiques géométriques de cette zone dépendent de la catégorie du véhicule. Pour le dimensionnement des chaussées rigides, on assimile conventionnellement la pression de contact à la pression interne du pneumatique. Les recommandations des organismes de référence ont fait évoluer la représentation géométrique de cette surface.

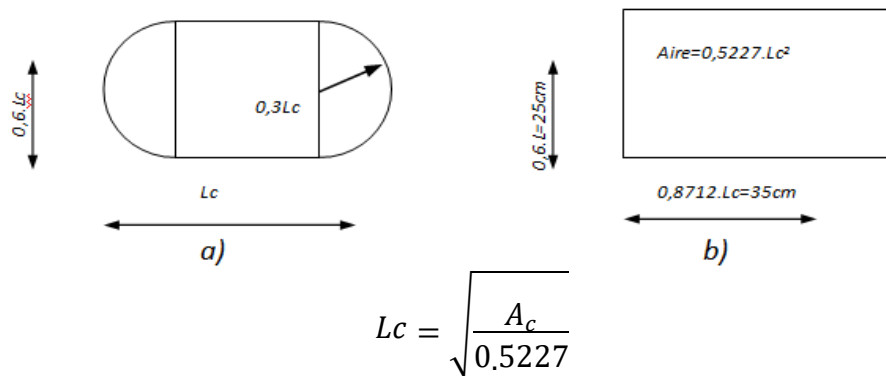


Figure 6.6 : Surface de contact d'après Portland Cement Association PCA [125].
 (a) Surface de contact réelle d'après PCA (1966) , (b) Surface équivalente d'après PCA (1984)

La Portland Cement Association a initialement adopté en 1966 une forme semi-circulaire reflétant fidèlement l'empreinte réelle des pneumatiques [125].

Par la suite, en 1984, la PCA a retenu une géométrie rectangulaire équivalente facilitant l'implémentation des méthodes numériques par éléments finis [127]. Cette simplification préserve l'aire de contact (Surface = $0,5227 \cdot Lc^2$) tout en réduisant considérablement la complexité du maillage et du calcul.

La dimension caractéristique Lc est déterminée par :

$$\text{Avec : } Lc = \sqrt{\frac{P}{p}} \quad (6.3)$$

où P est la charge et p est la pression de contact.

Pour tenir compte de l'agressivité du trafic sur les routes, on admet généralement un coefficient de majoration dynamique de 1,2. Ce facteur représente l'amplification des

efforts due aux irrégularités de surface, aux oscillations des suspensions et aux effets d'impact.

6.4. Application des formules de solutions exactes

6.4.1. Chargement d'un coin

6.4.1.1. Formule de Goldbeck et Older

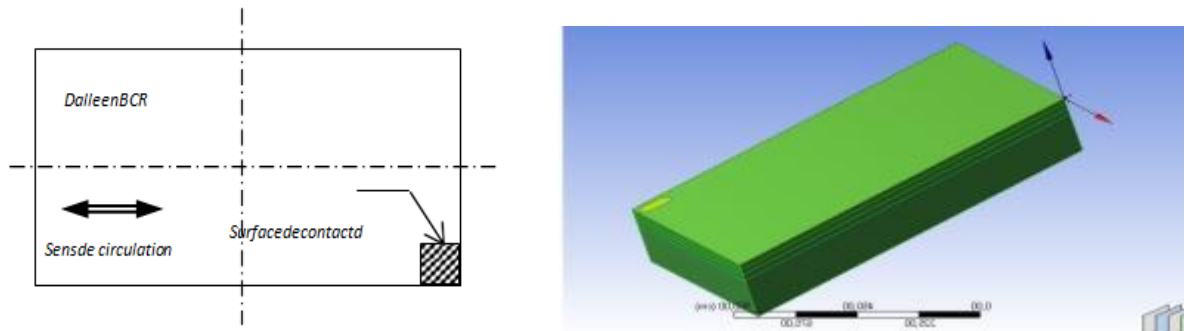


Figure 6.7 : Dalle supportant le chargement en coin

Pour le chargement au coin, la formule utilisée pour la conception des dalles rigides consiste à traiter la dalle comme une poutre en porte-à-faux avec une charge concentrée P appliquée sur le coin. Dans le cas simple où la réaction de la fondation est négligée, la contrainte de traction à la surface supérieure de la dalle dépend uniquement de la charge et de l'épaisseur. La contrainte de traction à la surface supérieure de la dalle est donnée par la

formule :

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \quad (6.4)$$

6.4.1.2. Principe de Westergaard pour chargement en coin

Lorsque la réaction de la fondation ne peut pas être négligée et si la charge est appliquée près du coin de la dalle, on utilise le principe de Westergaard qui propose une méthode par approximation successive. Cette approche donne la contrainte et la déflexion sous les formes :

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \left(1 - \frac{a^{1.2}}{l} \right) \quad (6.5)$$

$$\Delta = \frac{P}{kl^2} \left(1 - \frac{a}{l} \right)$$

Tableau 6. 1 : Contraintes et déflexions au coin selon module de fondation (Westergaard)

E fondation (MPa)	CBR	k (MPa/m)	ℓ (m)	σ (MPa)	Δ _i (mm)
30	5	30	1,37	3,14	1,086
150	30	90	1,04	2,81	0,595
500	90	260	0,797	2,46	0,325

Note : Pour BCR avec E=30000 MPa, h=0,20m, ν=0,22, charge=65 kN, rayon a=0,175m

6.4.1.3. Formule d'Ioannides et al. (1985)

Ioannides et collaborateurs ont appliqué la méthode des éléments finis pour évaluer et améliorer la solution de Westergaard. Leurs équations corrigées donnent des résultats légèrement différents :

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \left(1 - \frac{c^{0.6}}{l} \right)$$

$$\Delta = \frac{P}{8kc^2} \quad (6.6)$$

Avec c = 1,772 × a

Tableau 6.2 : Contraintes et déflexions au coin (Ioannides et al.)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	ℓ (m)	c (m)	σ (MPa)	Δ _i (mm)
30	30	1,37	0,3101	3,22	1,211
150	90	1,04	0,3101	2,83	0,667
500	260	0,797	0,3101	2,404	0,368

Note : c = 1,772 × a

6.4.2. Chargement intérieur

6.4.2.1. Formule de Westergaard pour chargement central

Pour le chargement au centre d'une dalle, la méthode de Westergaard détermine la contrainte et la déflexion à l'intérieur d'une dalle rigide sous une charge circulaire de rayon a. Le paramètre b dépend du rayon de chargement et de l'épaisseur de dalle selon des critères géométriques précis :

$$\sigma = \frac{3P}{\pi h^2} \ln \frac{l}{b} + 0.6159 \quad (6.7)$$

$$\Delta = \frac{P}{8kl^2} \left(1 + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a}{2l} \right)$$

Avec :

- b = a si a ≥ 1,724h

- $b = \sqrt{(1,6a^2 + h^2)} - 0,675h$ si $a < 1,724h$

Tableau 6.3 : Contraintes et déflexions au centre (Westergaard)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	ℓ (m)	a (m)	b (m)	σ (MPa)	Δ _i (mm)
30	30	1,37	0,175	0,163	2,61	1,434
150	90	1,04	0,175	0,163	2,34	0,823
500	260	0,797	0,175	0,163	2,08	0,481

6.4.2.2. Procédure Portland Cement Association (PCA)

La procédure établie par la PCA permet de déterminer, en fonction de l'épaisseur d'un revêtement, la contrainte de traction à la fibre inférieure du revêtement au centre de la dalle, causée par la charge d'un essieu donné.

La contrainte est calculée par la relation :

$$\sigma = k \times \frac{p}{h^2} \quad (6.8)$$

Tableau 6.4 : Contraintes au centre (Méthode PCA)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	ℓ (m)	σ (MPa)
30	30	1,37	2,46
150	90	1,04	2,20
500	260	0,797	1,96

6.4.3. Chargement au bord de dalle

6.4.3.1. Formule de Westergaard corrigée

Les équations utilisées pour les chargements de bords sont proposées par Westergaard et corrigées par Ioannides et al. Ces équations représentent des solutions pour les contraintes et les déflexions maximales produites par des charges appliquées aux bords d'une dalle rigide.

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \times f \frac{a}{l} \quad (6.9)$$

$$\Delta = \frac{P}{kl} \times g \frac{a}{l}$$

Tableau 6.5 : Contraintes et déflexions au bord (Westergaard-Ioannides)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	ℓ (m)	σ (MPa)	Δ _i (mm)
30	30	1,37	3,9	1,377
150	90	1,04	3,27	0,764
500	260	0,797	2,70	0,427

6.4.3.2. Formule du logiciel ALIZE

La contrainte maximale de traction à la fibre inférieure du revêtement au bord de la dalle, causée par la charge d'un essieu donné, est calculée par le modèle ALIZE selon une formulation spécifique :

$$\sigma = k_{bord} \times \frac{p}{h^2} \quad (6.8)$$

Tableau 6.6 : Contraintes au bord (Méthode ALIZE)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	ℓ (m)	σ (MPa)
30	30	1,37	3,77
150	90	1,04	3,32
500	260	0,797	2,89

Interprétation :

Les résultats montrent que les contraintes sont maximales sur les bords (3,32 MPa) par rapport aux coins (2,83 MPa) et au centre (2,34 MPa), alors que les déflexions au centre (0,823 mm) sont supérieures à celles du coin (0,667 mm) et du bord (0,764 mm).

6.5 Application de la méthode des courbes d'influence

La méthode des courbes d'influence, basée sur la fondation solide et développée par Pickett et Badaruddin, permet la détermination des contraintes pour le cas de la charge de bord. Cette méthode graphique utilise le rayon de rigidité ℓ comme échelle pour la configuration des surfaces de contact et la localisation des roues.

Le moment sera déterminé par la formule :

$$M=q_0 \times l^2 \times N_c(6.10)$$

Avec q_0 : la pression de contact, N_c : le nombre de carreau sur le graphique

La contrainte est déterminée en divisant le moment par le module de section :

$$\sigma = \frac{M}{\frac{h^2}{6}} = \frac{6M}{h^2} \quad (6.11)$$

La déflexion est déterminée par la formule :

$$\Delta = \frac{p}{kl^2} \times F \quad (6.12)$$

Avec :

$$F = f(E_{fondation}, k, l)$$

Tableau 6.7 : Résultats par méthode des courbes d'influence

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	ℓ (m)	Nc	M (N.m)	σ (MPa)	Δ _i (mm)
30	30	1,37	205	26760,28	3,95	1,17
150	90	1,04	280	20314,16	3,05	0,903
500	260	0,797	680	15567,68	2,34	0,145

Note : N_c = nombre de carreaux sur le graphique

6.6. Application de la méthode de Dantu

La méthode de Dantu s'applique à l'étude des contraintes maximales dans une dalle de dimensions limitées dont la charge n'occupe pas nécessairement le centre. Cette méthode est basée sur l'étude optique des déformations d'un modèle réduit en matériau élastique (liège). L'analyse de l'image déformée permet de trouver les déformations et leurs dérivées, et d'en déduire les moments.

6.6.1. Dalle chargée au centre

Pour une dalle carrée de grande dimension chargée au centre :

$$M = p \times z \times f \frac{l}{L} \quad (6.13)$$

Avec la contrainte $\sigma = \frac{6M}{h^2}$

Tableau 6.8 : Contraintes au centre (Méthode Dantu)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	Z	M (N.m)	σ (MPa)
30	30	0,16	14261,98	2,14
150	90	0,28	11406,85	1,71
500	260	0,42	9213,26	1,38

6.6.2. Charge placée sur le bord libre

Pour une charge placée sur le bord libre d'une dalle :

$$M=p \times z_{bord} \times f \frac{l}{L} \tag{6.14}$$

Tableau 6.9 : Contraintes au bord (Méthode Dantu)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	Z	M (N.m)	σ (MPa)
30	30	0,16	30270,87	4,54
150	90	0,28	21693,22	3,254
500	260	0,42	15136,71	2,27

6.6.3. Dalle chargée en coin

Pour une dalle chargée en coin là où le moment est négatif et maximum :

$$M=p \times z_{coin} \times f \frac{l}{L} \tag{6.14}$$

Tableau 6.10 : Contraintes au coin (Méthode Dantu)

E fondation (MPa)	k (MPa/m)	Z	M (N.m)	σ (MPa)
30	30	0,16	12044,35	1,81
150	90	0,28	7823,6	1,174
500	260	0,42	4294,38	0,644

Interprétation : On trouve des valeurs de moments et de contraintes plus fortes dans le cas du chargement au bord par rapport à ceux dans le cas du chargement au centre et au coin, car les fatigues sont nettement plus fortes au bord qu'au centre et au coin.

6.7. Modélisation numérique tridimensionnelle

6.7.1. Fondements de l'approche numérique

L'approche numérique repose sur un concept de division géométrique. Au lieu de traiter un domaine complexe dans sa globalité, la stratégie consiste à le fragmenter en portions plus

petites et géométriquement simples. Chaque fragment peut alors être analysé individuellement avant d'être recombinaé avec ses voisins pour reconstituer le comportement global du système.

Cette décomposition spatiale s'accompagne d'une transformation mathématique fondamentale : les équations continues sont converties en systèmes discrets solvables par des méthodes algébriques classiques.

6.7.2. Architecture du modèle discret

Le modèle discret s'organise autour de deux entités fondamentales. Les points nodaux constituent les emplacements où les grandeurs physiques sont calculées. Ces points servent d'interface entre les différentes portions du domaine et garantissent la continuité des solutions.

Les **éléments géométriques** représentent les subdivisions du domaine. Leur forme simple (triangles, quadrilatères, tétraèdres, hexaèdres) facilite les calculs tout en permettant une approximation fidèle des géométries complexes par assemblage.

6.7.3. Formulation mathématique

Pour chaque subdivision géométrique, on établit une relation matricielle locale entre les inconnues nodales et les sollicitations. Cette relation, de forme :

$$[K]. [U] = [F] \quad (6.15)$$

exprime l'équilibre ou la conservation à l'échelle de la subdivision.

L'assemblage de toutes ces relations locales produit un système global de grande dimension :

$$[K_{global}]. [U_{global}] = [F_{global}]$$

dont la résolution fournit les valeurs des inconnues en tous les points nodaux.

6.7.4. Description du modèle tridimensionnel

6.7.4.1. Géométrie et matériaux

La modélisation développée représente une structure de chaussée rigide composée de deux dalles séparées par un joint, reposant sur une couche de fondation en grave concassée compactée, l'ensemble étant supporté par un sol. Tous les éléments sont finis en trois dimensions. Les dalles en béton compacté au rouleau sont homogènes et de formes

parallélépipédiques avec dimensions finies dans les trois directions. La couche de fondation, sur laquelle repose la dalle, présente un comportement élastique linéaire de dimensions finies. Le sol support est supposé homogène à comportement élastique linéaire.

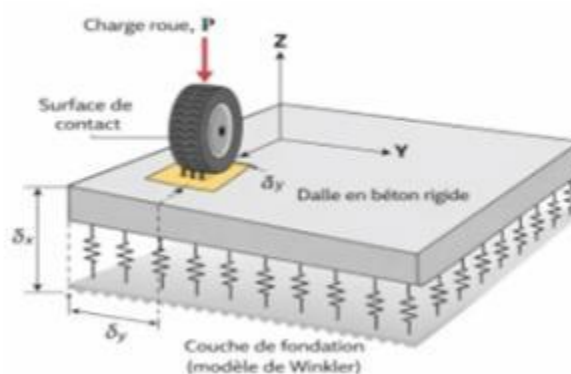


Figure 6.8 : Modèle adopté - vue en plan (une dalle 5m × 7m)

6.7.4.2. Données du modèle

Les paramètres géométriques et mécaniques adoptés sont:

- **Deux dalles en BCR** (4,00 m × 4,00 m) : $h = 20$ cm, $E = 30000$ MPa, $\nu = 0,22$
- **Couche de fondation en grave** (4,00 m × 4,00 m) : $h_f = 30$ cm, $E_f = 150$ MPa, $\nu_f = 0,35$
 - **Couche de sol** (4,00 m × 4,00 m) : $h_s = 120$ cm, $E_s = 50$ MPa, $\nu_s = 0,45$

La longueur de 4 mètres a été choisie comme moyenne car les bibliographies indiquent que la longueur des joints varie entre 4,5 et 9,2 mètres, et pour permettre la disposition d'un camion de convoi complet sur une seule dalle.

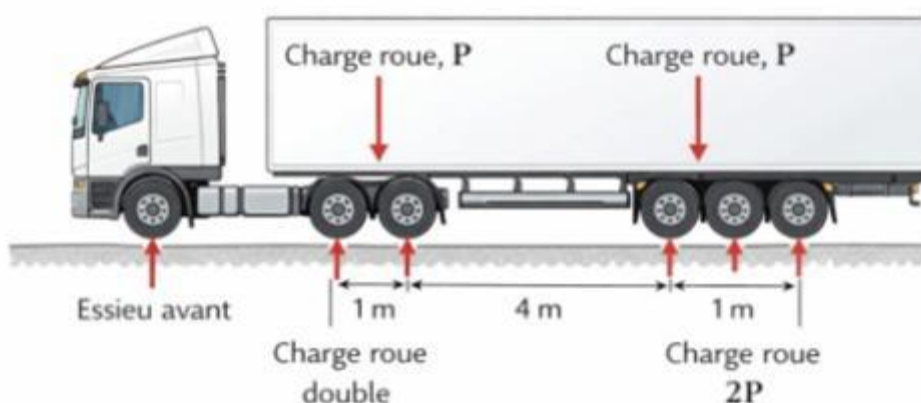


Figure 6.9: Modèle d'un camion


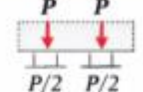

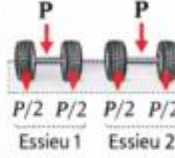
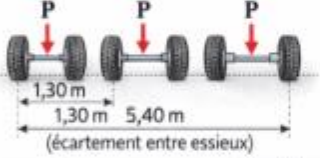
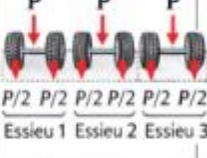


6.7.4.3. Conditions d'interface


Deux hypothèses peuvent être appliquées dans cette modélisation. La première consiste à considérer que les couches sont totalement collées sans frottement. La deuxième, plus réaliste, considère que les couches sont partiellement collées avec un coefficient de frottement entre la dalle et la fondation ainsi qu'entre la fondation et le sol support.

6.7.5. Les différents cas de chargements

• Type des essieux

Tableau 6.11 : Différents types d'essieu

Type d'essieu	Schéma (vue de dessus)	Description	Nombre de roues	Répartition des charges	Charge totale
Essieu simple		<ul style="list-style-type: none"> 1 essieu 2 roues 	2		P
Double essieu (essieux successifs)		<ul style="list-style-type: none"> 2 essieux 4 roues Essieux successifs 	4		2P
Triple essieu (3 essieux successifs)		<ul style="list-style-type: none"> 3 essieux 6 roues Essieux successifs 	6		3P
Camion à 3 essieux (exemple)		<ul style="list-style-type: none"> 3 essieux successifs 2 + 4 + 4 roues 	Charges par essieu : 		5P

Notation : ↓ Charge appliquée  Roue ↔ Distance (m)

6.7.5.2. Une seule roue :

Le chargement de référence considéré est un essieu de 13 tonnes appliqué sur deux roues dont le contact est représenté par une surface carrée. La charge maximum par essieu est de 13 tonnes selon le code de la route. La charge considérée est de 6,5 tonnes par roue.

Quatre cas correspondant à l'emplacement de la roue sur la dalle ont été étudiés : charge au centre, charge au coin, charge au bord et charge au bord central de la dalle.

- (a) Charge au centre d'une dalle
- (b) Charge au bord central d'une dalle
- (c) Charge au bord d'une dalle

- (d) Charge au coin d'une dalle.

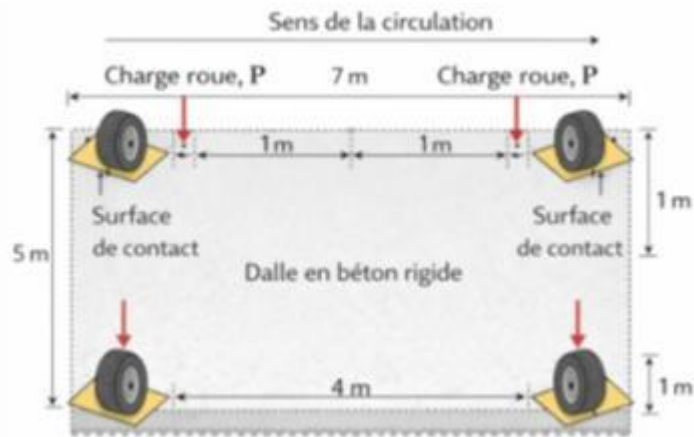
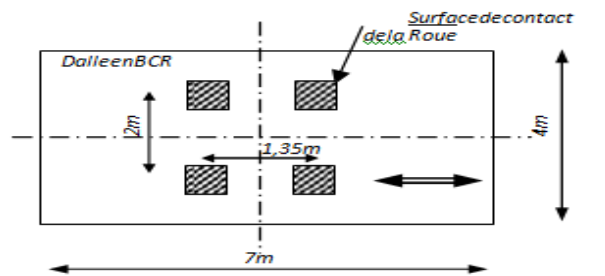


Figure 6.10 : Schémas des quatre cas de chargement étudiés.

6.7.5.3. Deux essieux : Le chargement au centre de la dalle pour deux essieux est considéré comme l'un des cas les plus défavorables. Pour ce cas, la charge est de 8 tonnes par roue.



a) Deux essieux au centre d'une dalle

Figure 6.11 : Deux essieux au centre d'une dalle - vue en plan

6.7.5.4. Trois essieux : Pour ce cas de chargement, seule la configuration où les trois essieux sont complètement sur une seule dalle est traitée.

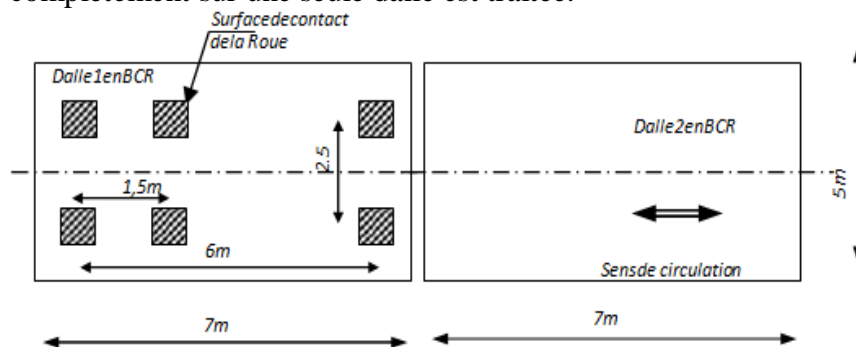


Figure 6.12: Trois essieux sur une dalle - vue en plan] (Espacement 1,5m et 6m entre essieux, dalles 7m × 5m)

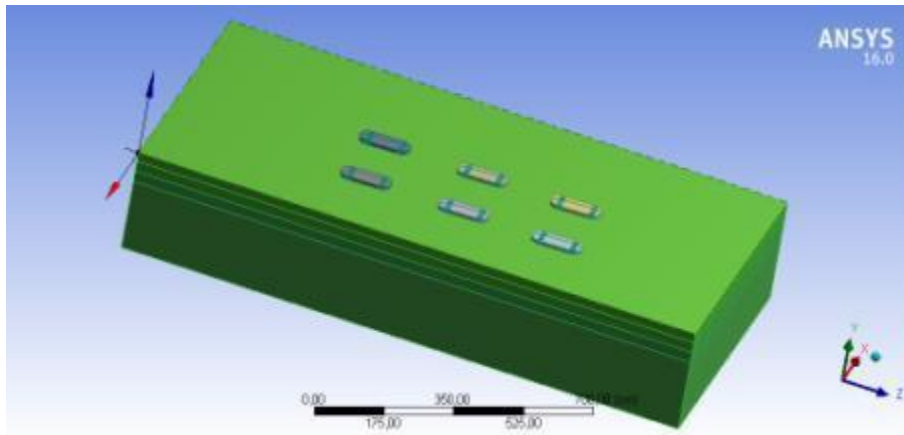


Figure 6.13 : Trois essieux sur une dalle - géométrie en ANSYS (Espacement 1,5m et 6m entre essieux, dalles 7m × 5m).

6.8. Outils logiciels de simulation

6.8.1. Introduction

L'analyse du comportement mécanique des chaussées rigides en béton compacté au rouleau (BCR) requiert des outils numériques capables de représenter fidèlement la complexité géométrique, matérielle et mécanique du système multicouche étudié. Les méthodes analytiques classiques, bien qu'utiles pour le dimensionnement préliminaire, présentent des limitations notables lorsqu'il s'agit de modéliser des géométries tridimensionnelles finies, des interactions de contact ou des configurations de chargement multiples.

Dans ce contexte, la méthode des éléments finis (MEF) constitue une approche particulièrement adaptée. Elle permet de résoudre des problèmes aux limites complexes en discrétisant le domaine continu en sous-domaines élémentaires interconnectés. Le logiciel ANSYS 16.0 a été retenu dans cette étude pour la modélisation numérique tridimensionnelle en raison de sa robustesse, de ses capacités multiphysiques et de sa large validation industrielle et scientifique.

6.8.2. Principe général de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis repose sur la transformation d'un problème mécanique continu en un système algébrique discret. Le domaine d'étude est subdivisé en un ensemble d'éléments géométriques (tétraèdres, hexaèdres, etc.) reliés par des nœuds, au niveau desquels sont définies les inconnues du problème, généralement les déplacements. Pour chaque élément, la formulation variationnelle conduit à l'établissement d'une relation matricielle locale de la forme,

$$[k_e]\{u_e\} = \{F_e\} \quad (6.15)$$

où

- K_e est la matrice de rigidité élémentaire,
- u_e le vecteur des déplacements nodaux élémentaires,
- F_e le vecteur des forces nodales équivalentes.

L'assemblage de l'ensemble des matrices élémentaires permet d'obtenir le système global,

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

La résolution de ce système fournit les déplacements nodaux globaux, à partir desquels sont déduites les contraintes et les déformations dans chaque élément.

Cette approche est particulièrement pertinente pour les chaussées rigides, où la distribution des contraintes dépend fortement de la position du chargement et des conditions d'interface entre les couches.

6.8.3. Présentation du logiciel ANSYS

ANSYS est une plateforme de simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis. Elle permet l'analyse de problèmes structuraux, thermiques, dynamiques et couplés. Son environnement Workbench facilite l'intégration des différentes étapes de la simulation dans un cadre unifié, allant de la conception géométrique au post-traitement des résultats.

Dans le cadre de cette étude, ANSYS est utilisé pour,

- ✓ Modéliser la structure multicouche de la chaussée,
- ✓ Définir les propriétés mécaniques des matériaux,
- ✓ Introduire les conditions aux limites et les interactions de contact,
- ✓ Simuler différents cas de chargement,
- ✓ Analyser les distributions de contraintes et de déplacements.

6.8.4. Processus de modélisation adopté

6.8.4.1. Définition géométrique

La géométrie tridimensionnelle représente une structure de chaussée composée de,

- Unedalleen BCR,
- Une couche de fondation en grave traitée,
- Un sol support.

Les dimensions adoptées correspondent à une dalle de longueur et largeur finies, reposant sur des couches de fondation et de sol de dimensions suffisantes pour limiter les effets de bord artificiels. La représentation tridimensionnelle permet de modéliser explicitement les joints ainsi que les positions variables des charges.

6.8.4.2. Discrétisation et maillage

Le domaine géométrique est discrétisé à l'aide d'éléments solides tridimensionnels. Un raffinement local du maillage est appliqué dans la zone de contact pneu-chaussée afin d'améliorer la précision des résultats dans les régions soumises à de fortes concentrations de contraintes (Voir figure 6.13).

Le compromis entre précision numérique et temps de calcul a été recherché en contrôlant la taille des éléments et la qualité du maillage (distorsion, rapport d'aspect, continuité inter-éléments).

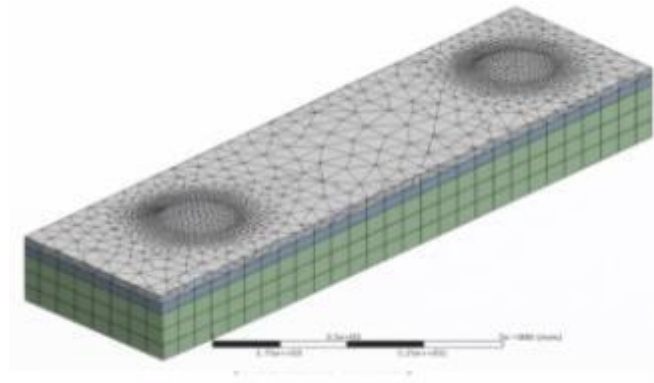


Figure 6.13 : Modèle numérique tridimensionnel intégrant les configurations d'essieux et le raffinement local du maillage sous les empreintes des pneumatiques

6.8.4.3. Propriétés matérielles

Les matériaux sont considérés homogènes, isotropes et à comportement élastique linéaire. Les paramètres mécaniques introduits sont.

- ✓ Module d'élasticité E ,
- ✓ Coefficient de Poisson ν .

Ces valeurs sont issues de la caractérisation expérimentale présentée précédemment. Cette hypothèse est cohérente avec l'objectif de comparaison entre approches analytiques et numériques, toutes deux fondées sur l'élasticité linéaire.

6.8.4.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites adoptées visent à reproduire un comportement réaliste du système tout en évitant les mouvements rigides parasites,

- ✓ Blocage vertical en base du sol,
- ✓ Restrictions latérales pour empêcher les translations globales,
- ✓ Continuité mécanique entre les couches.

Les interfaces dalle–fondation et fondation–sol sont modélisées soit comme parfaitement collées, soit avec un comportement de contact incluant un coefficient de frottement.

6.8.4.5 Modélisation du chargement

Le chargement est introduit sous forme d'une pression uniformément répartie sur une surface représentant l'empreinte du pneumatique. Plusieurs configurations ont été étudiées (voir la figure 6.14),

- Charge au centre de la dalle,
- Charge au bord,
- Charge au coin,
- Charges multiples (deux et trois essieux).

Un coefficient de majoration dynamique a également été appliqué afin de prendre en compte les effets dynamiques simplifiés du trafic.

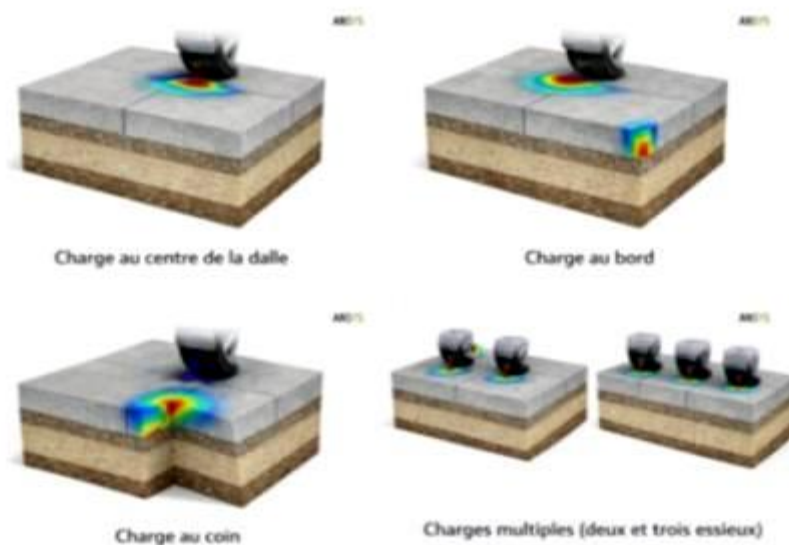


Figure 6.14 : Configurations d'une pression uniformément répartie sur une surface représentant l'empreinte du pneumatique.

6.8.5 Résolution numérique

La résolution du système global est effectuée à l'aide des solveurs intégrés d'ANSYS. Les équations d'équilibre sont résolues sous hypothèse statique linéaire. Les principales grandeurs extraites sont :

- Les déplacements verticaux,
- Les contraintes normales $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$,
- La contrainte équivalente de Von Mises.

La contrainte de Von Mises permet d'évaluer l'intensité globale de l'état de contrainte et d'identifier les zones critiques.

6.8.6 Post-traitement et analyse des résultats

Le post-traitement permet la visualisation des champs de contraintes et de déplacements sous forme de cartes colorées et de coupes internes. Les zones critiques identifiées correspondent généralement,

- Aux bords de dalle,
- Aux coins,
- Aux fibres inférieures en traction.

L'extraction des valeurs maximales a permis de comparer les résultats numériques aux solutions analytiques et de valider la cohérence du modèle.

L'ensemble des étapes méthodologiques précédemment décrites depuis la définition du problème et la caractérisation expérimentale jusqu'à la résolution numérique, au post-traitement et à la validation des résultats peut être synthétisé de manière structurée dans l'organigramme présenté sous la Figure 6.14. L'organigramme présenté synthétise de manière structurée la démarche méthodologique adoptée pour la modélisation numérique tridimensionnelle des chaussées rigides en béton compacté au rouleau (BCR) sous ANSYS. Il met en évidence l'enchaînement logique des étapes, depuis la formulation du problème jusqu'à la validation finale des résultats, traduisant ainsi une approche scientifique rigoureuse et cohérente. La première phase consiste en la définition précise du problème mécanique, incluant la nature de la structure multicouche étudiée, les configurations de chargement routier considérées et les objectifs analytiques visés, notamment l'évaluation des contraintes et des déformations au sein de la dalle. Cette étape initiale permet d'établir les hypothèses fondamentales et le cadre théorique de l'étude.

La modélisation s'appuie ensuite sur une caractérisation expérimentale préalable des matériaux. Les propriétés mécaniques introduites dans le modèle — module d'élasticité, coefficient de Poisson et paramètres associés — proviennent des essais réalisés sur le BCR, en tenant compte de l'influence de la température de cure et du taux de DBB. Cette intégration garantit la cohérence entre approche expérimentale et simulation numérique, renforçant ainsi la fiabilité des résultats.

La définition géométrique tridimensionnelle constitue l'étape suivante. Contrairement aux approches analytiques bidimensionnelles, la représentation 3D permet de considérer les dimensions finies de la dalle, d'intégrer explicitement les effets de bord et de coin, et de simuler des configurations complexes d'essieux. La structure multicouche (dalle, fondation et sol support) est modélisée conformément aux dimensions adoptées dans l'étude. Le domaine géométrique est ensuite discrétisé par la méthode des éléments finis. Une attention particulière est portée au maillage, notamment par un raffinement local sous les empreintes des pneumatiques, où les gradients de contraintes sont les plus élevés. La qualité du maillage conditionne directement la précision et la stabilité numérique de la simulation.

Les propriétés matérielles sont introduites en considérant un comportement élastique linéaire isotrope pour chacune des couches. Cette hypothèse permet une comparaison directe avec les solutions analytiques classiques tout en assurant une interprétation mécanique claire des résultats obtenus. Les conditions aux limites et les interactions de contact sont ensuite définies afin de reproduire le comportement réel de la structure. Le blocage vertical à la base du sol, les restrictions latérales et la modélisation des interfaces (collage parfait ou contact avec frottement) assurent la stabilité du modèle et un transfert réaliste des charges entre les différentes couches. La définition des chargements constitue une étape essentielle du processus. L'organigramme met en évidence la diversité des configurations étudiées : charge au centre de la dalle, charge au bord, charge au coin, charges multiples correspondant à deux ou trois essieux, ainsi que l'application d'un coefficient de majoration dynamique. Cette organisation arborescente traduit la dimension paramétrique de l'étude et permet une analyse comparative approfondie.

La résolution numérique du système global $KU = F$ représente le cœur computationnel de la simulation. Les déplacements nodaux obtenus sont ensuite exploités lors de la phase de post-traitement pour déterminer les déformations et les contraintes, notamment la

contrainte équivalente de Von Mises. La visualisation des champs mécaniques permet d'identifier les zones critiques et d'analyser la distribution tridimensionnelle des efforts. L'analyse et l'interprétation des résultats consistent à comparer les différentes configurations de chargement, à identifier les positions les plus défavorables généralement au bord ou au coin et à évaluer l'influence des paramètres mécaniques du BCR et du sol support. Enfin, la validation des résultats est réalisée par confrontation avec les solutions analytiques et les observations expérimentales, assurant ainsi la crédibilité scientifique du modèle développé.

Ainsi, l'organigramme traduit une démarche méthodologique complète, intégrant expérimentation, modélisation numérique et validation, et témoigne d'une approche structurée et cohérente dans l'étude du comportement structural des chaussées en BCR.

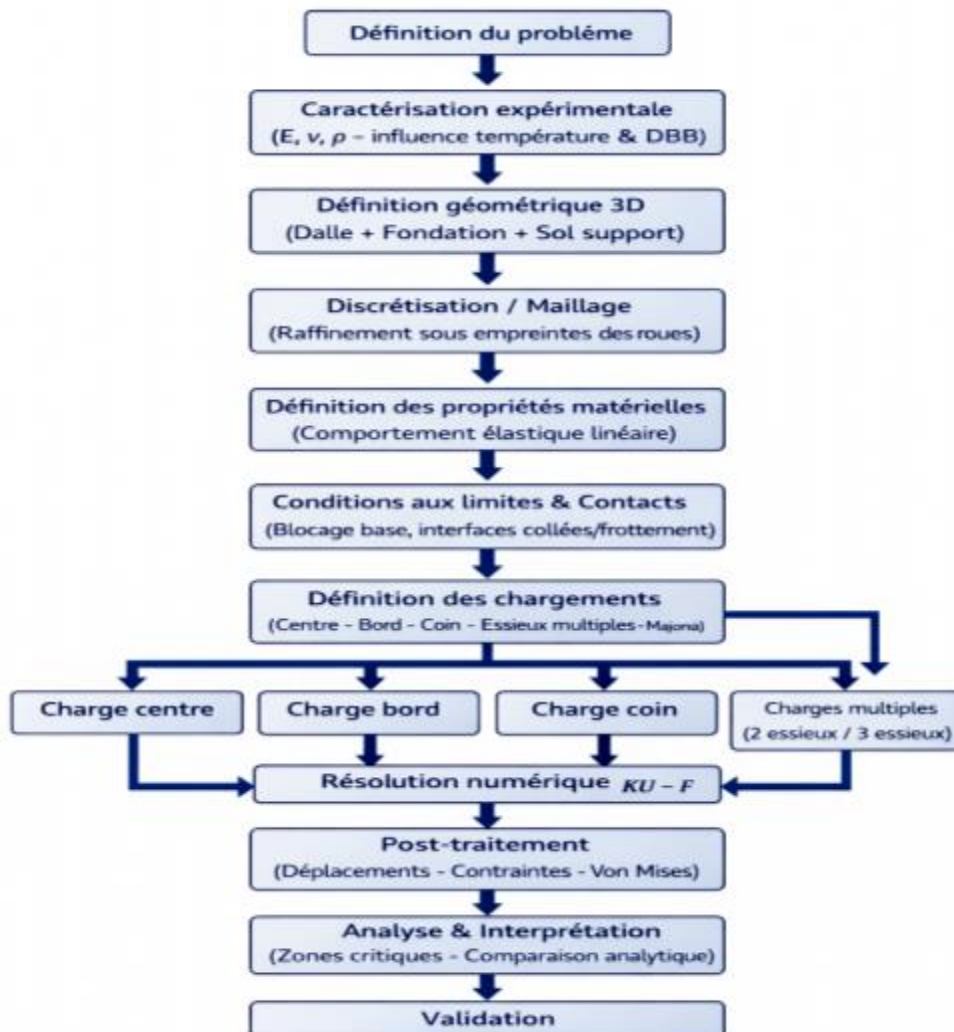


Figure 6.15 : Organigramme du processus de modélisation numérique tridimensionnelle des chaussées en BCR sous ANSYS.

6.9. MODÉLISATION NUMÉRIQUE PAR ÉLÉMENTS FINIS (ANSYS)

Cette section démontre l'applicabilité de la méthode des éléments finis ANSYS. Ce modèle permet de modéliser les chaussées rigides. L'obtention du comportement mécanique de la structure par simulation bénéficie également de la création de conditions réelles.

Cette modélisation 3D vise principalement à comprendre la distribution et l'évolution des contraintes et des déplacements à travers la dalle en béton compacté au rouleau (BCR)

(figure6.16), notamment au niveau des zones de chargement et sur les fibres supérieures et inférieures. Selon Zdiri et al. (2020)[140], les chaussées en béton compacté au rouleau sont construites sous forme de dalles courtes non armées, sans goudjons ni joints, afin de minimiser la fissuration spontanée. Pour éviter une largeur de dalle excessive, ces routes comportent des joints en bordure de voie.

Afin d'éviter une largeur excessive des dalles, ces routes comportent des joints en bordure de voie et des joints de retrait-flexion espacés de $4 \times 4 \text{ m}^2$ [142] Par conséquent, le béton de soutènement (figure6.16) est un matériau de fondation qui doit être choisi dès la phase de conception afin de prévenir l'érosion [106].

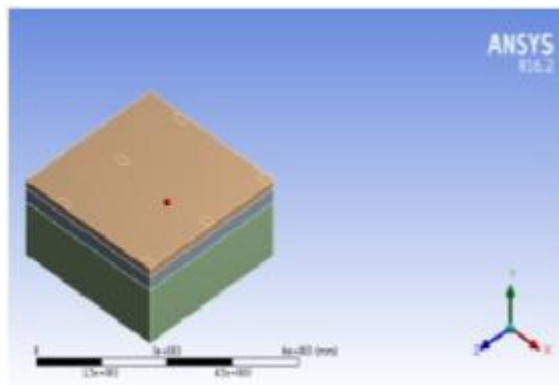


Figure 6.16 :Dalle en béton compacté au rouleau (BCR)

Une dalle en BCR a été modélisée à l'aide de son étude numérique. Une couche de gravier compacté repose dessus. De plus, le plancher supporte l'ensemble. Le système mécanique ainsi que les propriétés et les géométries des matériaux ont été présentés.

6.9.1 Paramètres du modèle Les valeurs admissibles des contraintes de compression et de traction, le coefficient de Poisson (ν), la densité (ρ) et le module d'élasticité E (GPa)

étaient les paramètres rapportés [142] Voici les données du modèle choisi :

- Dalle en BCR mesurant 4,0 m × 4,0 m, épaisseur = 0,20 m, ET et ν (section expérimentale basée sur les proportions de ciment ; voir les tableaux 3 à 5, représentant plusieurs mélanges à différentes températures) ;
- Couche de gravier pour les fondations (4,0 m × 4,0 m), h = 0,30 m, ET = 155 MPa, $\nu = 0,35$;
- Couche de sol (4,0 m × 4,0 m), h = 1,30 m, ET = 50 MPa, $\nu = 0,45$.

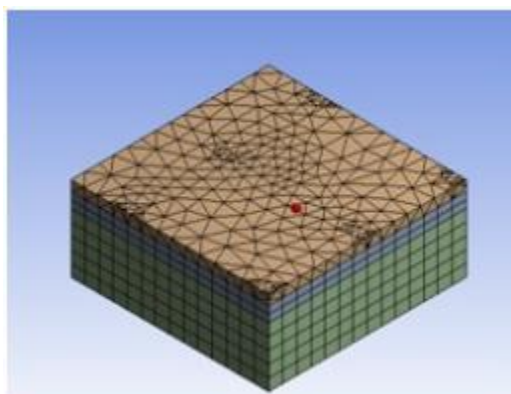


Figure 6.17 :Maillage d'une dalle en béton compacté au rouleau (BCR)

Tableau 6.12 : Propriétés mécaniques et physiques du BCR-20°C

BCR%	2 jours			7 jours			28 jours		
	ET	ν	ρ	ET	ν	ρ	ET	ν	ρ
BCR0	29,5	0,22	2051,04	30,5	0,21	2051,04	32	0,21	2051,04
BCR25	26,0	0,22	1898,61	28	0,22	1898,61	29	0,21	1898,61
BCR50	25,0	0,22	1860,20	27	0,22	1860,20	28	0,22	1860,20
BCR75	16,0	0,23	1784,42	24	0,22	1784,42	25	0,22	1784,42
BCR100	15,5	0,23	1777,50	23	0,23	1777,50	25,5	0,22	1777,50

ET : Module de rigidité (MPa) | ν : Coefficient de Poisson | ρ : Masse volumique (kg/m³)

Tableau 6.13 : Propriétés mécaniques et physiques du BCR-40°C

BCR%	2 jours			7 jours			28 jours		
	ET	v	ρ	ET	v	ρ	ET	v	ρ
BCR0	30,5	0,21	2051,04	31	0,21	2051,04	34,5	0,21	2051,04
BCR25	29	0,22	1898,61	31	0,22	1898,61	34	0,21	1898,61
BCR50	28	0,22	1860,20	31,5	0,22	1860,20	33	0,21	1860,20
BCR75	24	0,22	1784,42	29,5	0,22	1784,42	31	0,22	1784,42
BCR100	15	0,22	1777,50	29	0,22	1777,50	29	0,22	1777,50

Tableau 6.14: Propriétés mécaniques et physiques du BCR-60°C

BCR%	2 jours			7 jours			28 jours		
	ET	v	ρ	ET	v	ρ	ET	v	ρ
BCR0	33,5	0,21	2051,04	30,5	0,21	2051,04	30	0,20	2051,04
BCR25	31	0,22	1898,61	27,5	0,22	1898,61	26,5	0,20	1898,61
BCR50	29,5	0,22	1860,20	27	0,22	1860,20	26	0,20	1860,20
BCR75	26,5	0,23	1784,42	24,5	0,22	1784,42	17	0,21	1784,42
BCR100	24,5	0,23	1777,50	21	0,22	1777,50	15	0,22	1777,50

6.10 Validation de la modélisation numérique

6.10.1 Résultats analytiques et numériques des contraintes du BCR%

La première étape de la modélisation numérique consiste à valider les résultats par rapport à une modélisation analytique 2D, qui prend en compte les contraintes et les déformations principalement en fonction de la position de la charge dans la structure en béton compacté au rouleau (BCR) et utilise plusieurs formules pour les évaluer. Dans le cas des chaussées rigides, ces formules analytiques et la technique d'analyse en composantes principales (ACP) ont été appliquées [141].

Le tableau 6.15 présente les résultats des deux approches en utilisant la charge (6 500 N) et les paramètres mécaniques du BCR à 20°C pendant 28 jours, tels que documentés dans

la littérature. Les résultats du modèle analytique décrit dans la littérature et du modèle numérique concordent étroitement. L'écart entre les propriétés mécaniques et physiques des deux modèles est relativement faible ; ainsi, la variation relative maximale des valeurs de contrainte était d'environ 12,73 %, ce qui est une différence tout à fait acceptable.

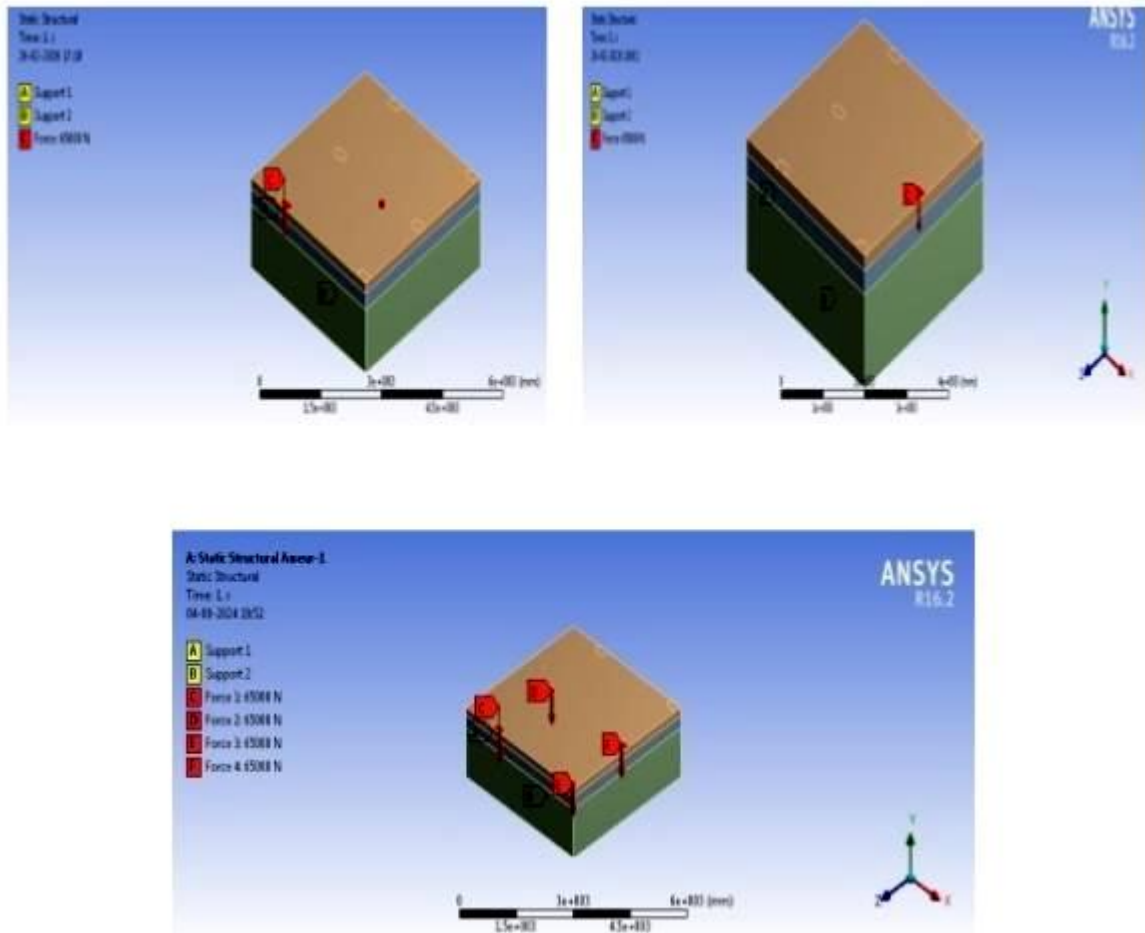


Figure 6.18 :Conditions au limites et chargement (BCR)

Tableau 6.15 :Résultats des contraintes pour BCR0 (65 kN)à 28 jours

Approches	Chargement en coin		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
Zdiri et al., 2020	2,31	3,88	1,72	1,67	2,57	2,08	2,19	2,01
ANSYS 20°C	1,60	3,16	1,18	1,42	2,86	2,99	3,10	3,02
ANSYS 40°C	1,56	3,10	1,15	1,40	2,81	2,94	3,03	2,96
ANSYS 60°C	1,52	3,04	1,12	1,37	2,76	2,89	2,98	2,91

Tableau 6.16 : Résultats des contraintes de BCR0 – 65 kN – 07 jours

Approches	Chargement en angle		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
ANSYS 20°C	1,55	3,08	1,11	1,33	2,80	2,89	3,02	2,97
ANSYS 40°C	1,51	3,04	1,10	1,30	2,76	2,84	2,96	2,92
ANSYS 60°C	1,46	2,97	1,08	1,28	2,70	2,80	2,91	2,78

Les tableaux 6.15 à 6.23 présentent l'influence de la pression des pneumatiques sur la résistance à la traction en quatre points différents de la route, où plusieurs mélanges de proportions variables ont été testés, préparés respectivement en 28 et 7 jours. Les résultats montrent que les mélanges préparés en 28 jours offrent une meilleure résistance à la traction que ceux préparés en 7 jours. Ils indiquent également que les températures élevées ont un impact négatif sur les valeurs de résistance à la traction et que les mélanges contenant un pourcentage plus élevé de liants sont moins performants.

Tableau 6.17 : Résultats des contraintes du BCR25 – 65 kN – 28 jours

Approches	Chargement en coin		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
ANSYS 20°C	1,57	3,12	1,14	1,38	2,82	2,91	3,07	2,98
ANSYS 40°C	1,52	3,08	1,11	1,36	2,77	2,91	3,00	2,92
ANSYS 60°C	1,49	3,00	1,08	1,33	2,72	2,86	2,95	2,88

Tableau 6.18 : Résultats des contraintes du BCR25 – 65 kN – 07 jours

Approches	Chargement en angle		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
ANSYS 20°C	1,51	3,02	1,06	1,26	2,69	2,73	2,97	2,82
ANSYS 40°C	1,46	2,99	0,99	1,21	2,66	2,70	2,90	2,77
ANSYS 60°C	1,41	2,93	0,94	1,19	2,59	2,67	2,84	2,71

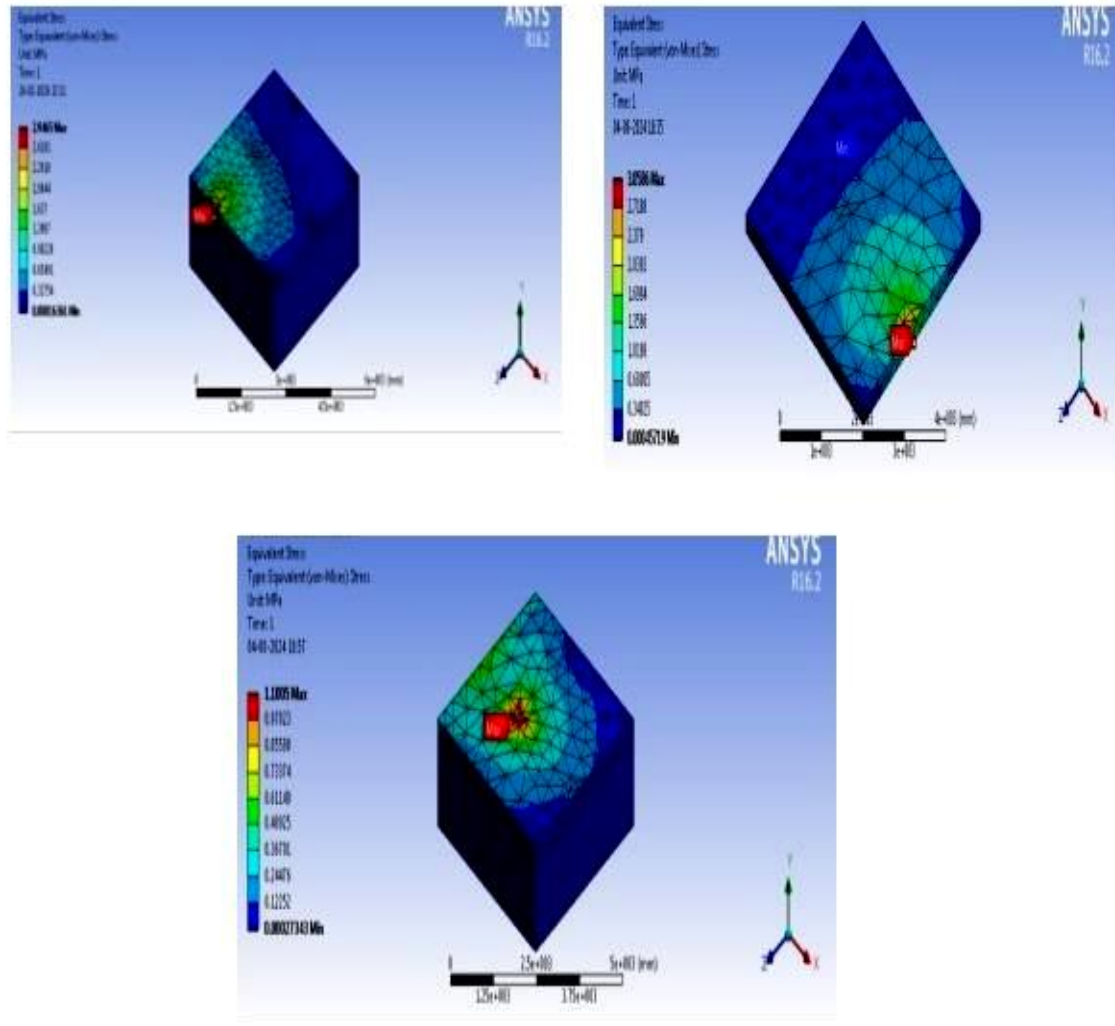


Figure 6.19 :Contrainte von-mises (Mpa)

Tableau 6.19 :Résultats des contraintes du BCR50 – 65 kN – 28 jours

Approches	Chargement en coin		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
ANSYS 20°C	1,52	3,07	1,10	1,33	2,77	2,88	3,01	2,92
ANSYS 40°C	1,47	3,02	1,07	1,32	2,72	2,85	2,95	2,86
ANSYS 60°C	1,42	2,96	1,04	1,28	2,67	2,81	2,88	2,82

Tableau 6.20 : Résultats des contraintes du BCR50 – 65 kN – 07 jours

Approches	Chargement en coin		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
	ANSYS 20°C	1,47	2,97	1,01	1,21	2,59	2,66	2,91
ANSYS 40°C	1,41	2,92	0,98	1,18	2,56	2,60	2,86	2,71
ANSYS 60°C	1,37	2,88	0,93	1,13	2,49	2,56	2,79	2,66

Tableau 6.21 : Résultats des contraintes du BCR75 – 65 kN – 28 jours

Approches	Chargement en coin		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
	ANSYS 20°C	1,44	2,97	1,01	1,22	2,67	2,77	2,91
ANSYS 40°C	1,40	2,94	0,97	1,18	2,62	2,73	2,85	2,75
ANSYS 60°C	1,34	2,86	0,94	1,15	2,57	2,69	2,78	2,71

Tableau 6.22: Résultats des contraintes du BCR75 – 65 kN – 07 jours

Approches	Chargement en coin		Chargement intérieur		Bord central		Bord avant	
	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)	Normale (MPa)	Von-Mises (MPa)
	ANSYS 20°C	1,37	2,87	0,94	1,16	2,52	2,60	2,87
ANSYS 40°C	1,31	2,80	0,88	1,10	2,47	2,57	2,80	2,65
ANSYS 60°C	1,27	2,79	0,81	1,07	2,41	2,51	2,75	2,60

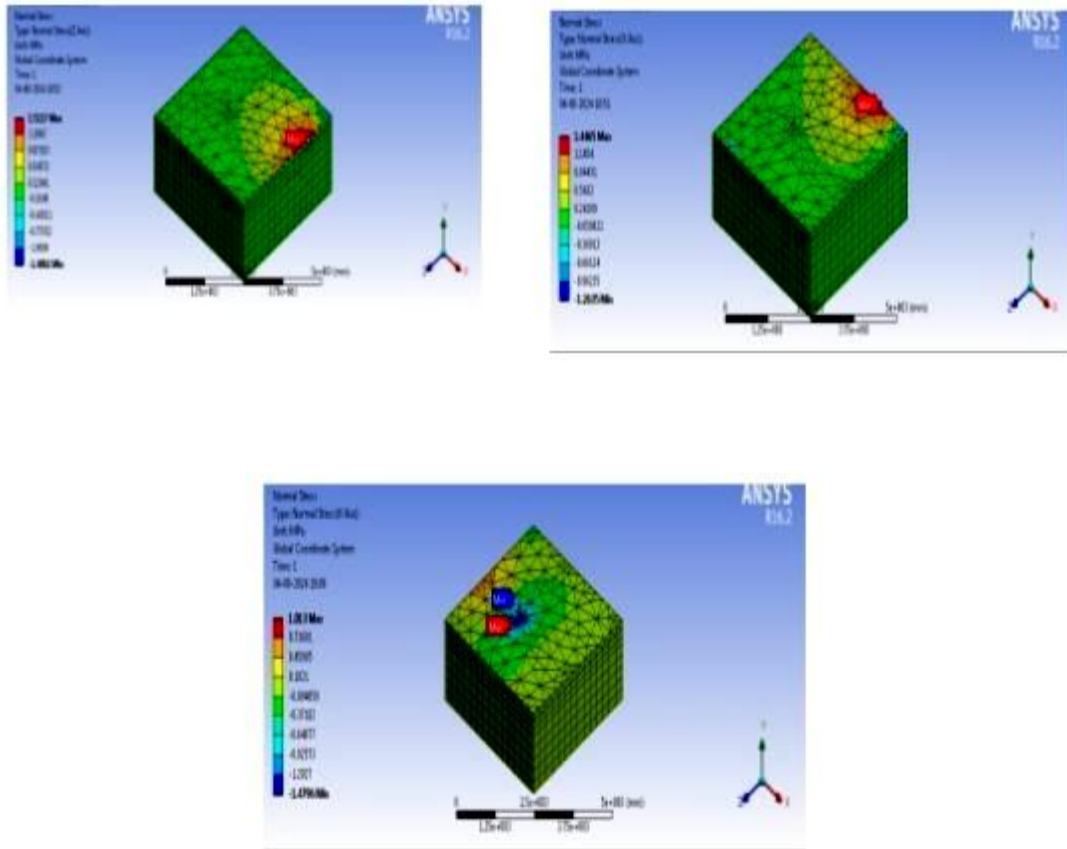
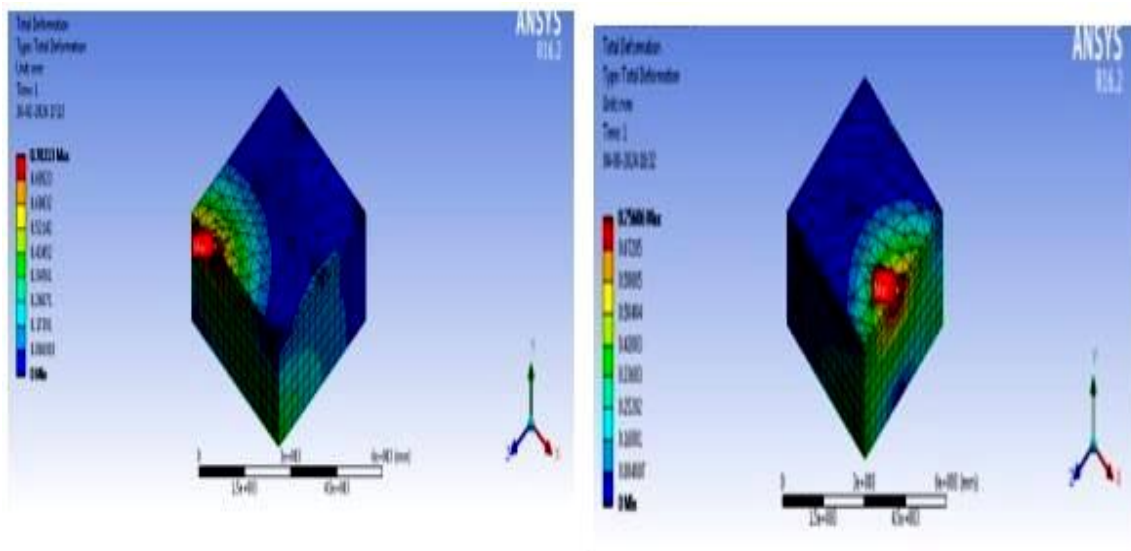


Figure 6.20 :Contrainte normale (Mpa)



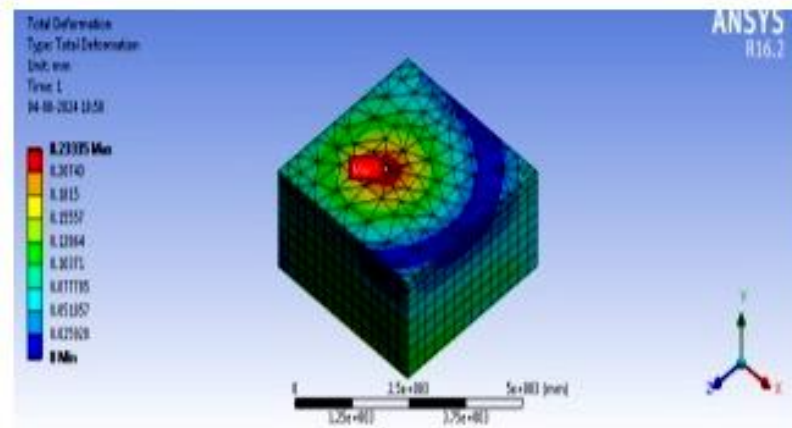



Figure 6.21 :Déplacement totale

CONCLUSION

Cette étude a examiné expérimentalement les effets des matériaux d'enrobage recyclé (DBB) sur les propriétés du béton compacté au rouleau (BCR). D'après les résultats et les analyses, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La masse volumique apparente des mélanges de BCR diminue avec l'augmentation de la proportion de DBB, car les granulats enrobés d'asphalte ont une masse volumique plus faible. Cette observation est cohérente avec les études précédentes, qui ont rapporté une réduction de masse volumique de 5 à 6 % avec environ 50 % de DBB.
- À jeune âge, le béton durci à des températures plus élevées (40°C et 60°C) présente une résistance à la compression supérieure à celle du béton durci à 20°C. La chaleur accélère le processus d'hydratation, entraînant une formation accrue d'hydrates.
- Cependant, à 28 jours, la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la température, et les échantillons durcis à 60°C présentent des résistances inférieures à celles des échantillons durcis à 40°C et 20°C. Les températures initialement élevées entraînent la formation de pores plus larges, ce qui augmente le volume poreux et affecte négativement les propriétés mécaniques finales.
- Le module d'élasticité dynamique (ME) augmente initialement avec la température de cure, mais diminue avec l'augmentation de la teneur en DBB. À 28 jours, le module d'élasticité diminue à la fois avec la température et la teneur en DBB, ce qui indique une détérioration des propriétés mécaniques au fil du temps et sous l'effet des hautes températures.



*conclusion
générale*

Conclusion Générale

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse 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 (250 kg/m^3) et la valorisation des déchets de béton bitumineux DBB dans les BCR. En se basant sur les différents travaux et résultats sur le BCR (formulations, caractérisation et durabilité) décrits dans la partie bibliographique, nous avons pu recueillir un certain nombre d'informations et tirer des conclusions et des synthèses sur ce matériau. Elles concernent particulièrement la méthode de formulations du BCR, les paramètres influant sur la composition, les caractéristiques obtenues à l'état frais et durci ainsi que la durabilité des BCR. Notre étude de la formulation du BCR est basée principalement sur l'application d'une méthode empirique (DREUX ET GORISSE).

Des matériaux ordinaires siliceux et calcaires ont été utilisés ainsi que d'autres matériaux à caractéristiques spécifiques tels que les déchets de béton bitumineux (des anciennes chaussées). Ces granulats ont été utilisés sous forme d'une substitution partielle de la quantité de granulats ordinaires grossiers les résultats d'études ont montré le grand intérêt et les améliorations apportées sur les résistances mécaniques et la densité de ces granulats ainsi que sur la durabilité en plus que les avantages économiques. Les résultats de cette étude montrent que ces mélanges de BCR développent des résistances proches aux résistances des mélanges ne contenant uniquement que des granulats naturels.

L'étude du BCR à l'état frais a comporté une recherche sur l'influence des divers teneurs de substitution du déchet de DBB sur la densité sèche et la teneur en eau optimal. En outre nous avons utilisé la méthode de VibroCompactage qui est recommandée par plusieurs chercheurs. D'autre part, pour compacter le BCR, la recherche du dosage optimal en eau est un élément principal. Ce dosage a été étudié, dans notre travail, par la méthode de Proctor modifié. Cette méthode est considérée comme une véritable méthode d'estimation de la rhéologie du BCR permettant ainsi de déterminer les teneurs en eaux optimales de ce matériau. Cette étude a été faite sur divers mélanges secs et humides, séparés en deux classes ou en un seul mélange. En conséquence, la méthode de mesure de l'indice exprimant la Compactibilité résout donc le problème rhéologique des mélanges secs comme c'est le cas du BCR et nous permet de déterminer la teneur en eau optimale. En parallèle à cette étude théorique, nous avons confectionné des moules spéciales pour la préparation de divers types d'éprouvettes sur lesquelles nous avons réalisé des essais

Conclusion Générale

expérimentaux pour la détermination des résistances du BCR. En outre, l'estimation de la résistance à la flexion a été faite sur éprouvette prismatique 7*7*28cm. Dans ce travail, nous avons réalisé des essais mécaniques et des mesures ultrasoniques pour la détermination expérimentale du module d'élasticité du BCR.

Les mesures ultrasoniques du module d'élasticité dynamique représentent une autre alternative pour la détermination du module d'élasticité statique du BCR. Dans cette étude, nous avons exploité les évaluations de résistances mécaniques, de modules élastiques statiques et dynamiques. Dans ce travail, nous avons montré aussi que le BCR est sensible aux milieux sulfatique et acide, les actions chimiques des acide et sulfate dont nous avons pu montrer que le BCR est un matériau qui résiste bien aux attaques acide et sulfatique jusqu'à une teneur de 50% de substitution par les déchets de DBB.

Sur le plan numérique, le modèle tridimensionnel développé sous ANSYS 16.0, validé avec un écart maximal de 12,73 %, a été observé entre les résultats numériques et les solutions analytiques de référence [140,116] Cet écart peut être considéré comme acceptable au regard des limites des solutions analytiques classiques, qui reposent sur des hypothèses de dalle infinie ou semi-infinie, de comportement élastique linéaire et d'appui de Winkler. Ces hypothèses simplificatrices ne rendent pas compte des effets de bord, des dimensions finies de la dalle et de la variabilité locale des propriétés du sol support, ce qui explique l'essentiel de l'écart constaté. Cette valeur est cohérente avec les écarts rapportés dans des études comparables [142], où des écarts de 10 à 15 % sont généralement considérés comme admissibles pour des modèles élastiques linéaires de chaussées .

Perspectives

Les avantages précités, tel que les bonnes résistances du BCR appuyés par des études de formulation, de résistance et d'une évaluation économique montrent que le BCR est un matériau très convenable et rentable pour la construction et l'entretien des chaussées en milieux urbains et rurales. L'étude économique explique aussi la rentabilité de l'utilisation de la technique de BCR dans les travaux routiers. En outre ces études peuvent être élargies et poussées pour couvrir d'autres sujets relatifs au BCR. Dans ce contexte, nous donnons les recommandations suivantes:

- Etudier le comportement au fluage et retrait du BCR
- Etudier le comportement avec des ajouts cimentaires du BCR
- Etudier le comportement à la fatigue du BCR
- Etudier l'effet de la température sur la déformation des dalles en BCR en introduisant le coefficient de dilatation de BCR.
- Etudier l'effet de pompage sur la résistance des dalles en BCR
- Compléter l'analyse du comportement du BCR frais et durci sous l'effet des actions des hydrocarbures et des autres produits chimiques
- Analyser par une modélisation numérique le comportement du BCR à très jeunes âges.
- Etudier l'influence des paramètres comme la compacité et la densité sur l'évolution des attaques des hydrocarbures et des produits chimiques.
- Campagne d'essais de fatigue en flexion 4 points sur éprouvettes BCR à différents taux de DBB(fin et grossier)
- Validation sur données de trafic réel (comptages sur routes nationales algériennes)

References

- [1] Abdelghafour, S. (2010). Formulation et étude d'un béton de route à base de matériaux locaux [Thèse de doctorat, Université de Blida].
- [2] Çalış, G., & Yıldız, S. A. (2019). Investigation of roller compacted concrete: Literature review.
- [3] Zdiri, M. (2008). Étude de formulation et de comportement mécanique des bétons compactés au rouleau (BCR) : Applications routières – Cas des matériaux de gisements locaux [Thèse de doctorat, Université d'Artois].
- [4] Jeuffroy, G., & Sauterey, R. (1989). Cours de routes : Chaussée en béton de ciment (pp. 29–47 et 112–133). Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [5] Anderson, R. (1986). Roller compacted pavements – Physical properties (CBI Report No. Ra 3:86). Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- [6] Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design (2nd ed., pp. 5–8). Pearson Prentice Hall.
- [7] Gauthier, P., & Marchand, J. (2004). Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association Béton de Québec.
- [8] Diawoye, N., & Sall, A. (2007). Conception, formulation et mise en œuvre d'un béton compacté au rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées : Application au tronçon Diamniadio–Mbour [Projet de fin d'études, École Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar].
- [9] Gagné, R. (2004). Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR. CRIB.
- [10] Cheng, C., Wei, S., & Honggen, Q. (2000). The analysis on strength and fly ash effect of roller compacted concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30, 71–75.
- [11] Gagné, R. (2000, November 20–21). High-performance roller-compacted concrete for pavement: Mixture design, application and durability. In *International Symposium on Engineering Materials for Sustainable Development* (pp. 74–88). Okayama, Japan.
- [12] Tremblay, S. (1997). Méthodes de formulation des bétons compactés au rouleau et effet des agents entraîneur d'air sur la maniabilité [Mémoire de maîtrise, Université Laval].
- [13] American Concrete Institute. (2001). Guide to curing concrete (ACI 308R-01). ACI.
- [14] Portland Cement Association. (n.d.). Website. <http://www.cement.ca>

References

- [15] ERES Consultants. (1998). Review of life-cycle costing analysis procedures. Ontario Ministry of Transportation.
- [16] Saucier, F., Cormier, B., & Duchesne, C. (1995). Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment. Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB), Université Laval.
- [17] US Army Corps of Engineers. (1992). Roller-compacted concrete (Engineer Manual No. 1110-2-2006). US Army Corps of Engineers.
- [18] Reeves, G. N., & Yates, L. B. (1985). Simplified design and construction control for roller compacted concrete. In *Roller Compacted Concrete* (pp. 48–61). ASCE.
- [19] Neville, A. M. (2000). Properties of concrete. Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) / Eyrolles.
- [20] Canadian Association of Cement. (2005). Comparison of the permeability to water of roller compacted concrete (RCC) and a mixture of conventional concrete. Canadian Association of Cement.
- [21] Delatte, N. A., & Storey, C. (2003). Improved management of RCC pavement technology. The University of Alabama at Birmingham.
- [22] Madhkhan, M., Azizkhani, R., & Toriki Harchegani, M. E. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials*, 26(1), 102–112.
- [23] Agal, T., Charvet, B., Assaf, G. J., & Marleau, F. (2005). Catalogue des chaussées en béton compacté au rouleau.
- [24] American Concrete Institute. (1995). State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements (ACI 325.10R-95). ACI.
- [25] Cao, R., Jia, Z., Zhang, Z., Zhang, Y., & Banthia, N. (2020). Leaching kinetics and reactivity evaluation of ferronickel slag in alkaline conditions. *Cement and Concrete Research*, 137, 106202.
- [26] Portland Cement Association. (n.d.). Website. <http://www.cement.ca>
- [27] Pittman, D. W. (1989). The effects of the construction process on selected fresh and hardened properties of roller-compacted concrete (RCC) pavements.
- [28] Association Béton Québec. (2004). Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association Béton Québec.

References

- [29] Canadian Portland Cement Association. (n.d.). Thickness design for concrete highway and streets pavements (Canadian edition/metric, Engineering Bulletin). Canadian Portland Cement Association.
- [30] Merbouh, M. H. (2010). Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux : Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue [Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1].
- [31] Luu, H. T. (2011). Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d'un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort: un compromis entre économie et écologie. Ph. D. dissertation.
- [32] Lesieur, P. (2022). La route, « produit de son entretien » : Analyse du traitement de la question routière au XIXe siècle par les Ponts et Chaussées. *Flux*, (3), 76–89.
- [33] Diaz, N. K. S., Gagné, R., Morin, R., & Mesbah, H. (2018). Valorisation des granulats recyclés dans le béton pour les pavages et trottoirs.
- [34] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). (1998). Catalogue des dégradations de surface des chaussées. LCPC.
- [35] Ali Bou Kari. (1990). Étude des défauts de surface des chaussées souples revêtues [Thèse, École Polytechnique de Thiès].
- [36] Cresus.Dz. Quotidien national, édité par SARL CELIGNE Éd.
- [37] Agence Nationale des Déchets. (2020). Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie 2020.
- [38] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. (n.d.). Le centre d'enfouissement technique des déchets Hamici – Corso, Alger.
- [39] Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2018). Sustainability assessment for Portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 192, 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.004>
- [40] Huang, B., Shu, X., & Li, G. (2005). Laboratory investigation on skid resistance of Portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2008–2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.002>
- [41] Singh, S., Monu, K., & Ransinchung, G. D. (2020). Laboratory investigation on RAP for various layers of flexible and concrete pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1780–1793. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567920>

References

- [42] Piao, Z., Mikhailenko, P., Kakar, M. R., Bueno, M., Hellweg, S., & Poulikakos, L. D. (2021). Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124916>
- [43] Fakhri, M., Amosoltani, E., Farhani, M., & Ahmadi, A. (2017). Optimal determination of a roller compacted concrete pavement mixture containing recycled asphalt pavement and crumb rubber using a hybrid artificial neural network genetic algorithm. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(11), 945–955. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0124>
- [44] Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Liu, K. W. (2017). Mix design formulation and evaluation of Portland cement concrete pavement mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 152, 756–768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.174>
- [45] Debbarma, S., Selvam, M., & Singh, S. (2020). Can flexible pavement waste (RAP) be used in concrete pavements? – A critical review. *Construction and Building Materials*, 259, 120417. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120417>
- [46] Singh, M., Adhikari, A., Maurya, M. K., Srivastava, A., & Chhabra, R. S. (2020). Feasibility study on use of washed reclaimed asphalt as partial replacement of natural aggregate in dry lean concrete as base layer for rigid pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020266. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003339](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003339)
- [47] American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM D1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ [2,700 kN-m/m³]). ASTM International.
- [48] Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., & Hazaree, C. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements. Iowa State University, Institute for Transportation.
- [49] Boussetta, S., El Euch Khay, J., & Neji, J. (2020). Experimental tests and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(11), 1729–1743. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1482792>
- [50] Settari, C., Debieb, F., Kadri, E. H., & Boukendakdji, O. (2015). Evaluation of the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 617–621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.039>
- [51] Debbarma, S., Singh, S., & Ransinchung, G. D. (2019). Laboratory investigation on fresh, mechanical and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Transportation Research Record*, 2673(10), 652–662. <https://doi.org/10.1177/0361198119849585>

References

- [52] Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>
- [53] Marchand, J., Gagné, R., Ouellet, E., & Lepage, S. (1997). Roller-compacted concrete mix dosage: A review. *ACI Special Publication*, 171, 457–487.
- [54] Mohammed, B. S., & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 159, 234–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098>
- [55] Lopez-Uceda, A., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Galvín, A. P., & Del Rey, I. (2020). Feasibility study of roller compacted concrete with recycled aggregates as base layer for low-traffic roads. *Road Materials and Pavement Design*, 21(1), 276–288. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1483257>
- [56] Abut, Y., & Yildirim, S. T. (2017). Structural design and economic evaluation of roller compacted concrete pavement with recycled aggregates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 022064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022064>
- [57] Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390–395.
- [58] Hobbs, D. W. (1988). *Alkali-silica reaction in concrete*. Thomas Telford Publishing.
- [59] Sáez del Bosque, I. F., Zhu, W., Howind, T., Matías, A., Sánchez de Rojas, M. I., & Medina, C. (2017). Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing mixed recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 81, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.011>
- [60] Association Française de Normalisation (AFNOR). (1990). NF P 18-303 : Eau de gâchage pour béton. AFNOR.
- [61] Association Française de Normalisation (AFNOR). (2007). NF EN 12697-32+A1 : Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 32 : Compactage en laboratoire de mélanges bitumineux par compacteur vibratoire. AFNOR.
- [62] Beck, K., Al-Mukhtar, M., & Rozenbaum, O. (2003). Pierres des monuments historiques : Caractérisations et mécanismes d'altération du tuffeau. *AFGC*, 26(27), 1–16.

References

- [63] American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C1585-13: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. ASTM International.
- [64] Association Française pour la Construction et l'AFREM. (1997). Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. In Journées Techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse.
- [65] American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM C39/C39M-11a: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- [66] American Society for Testing and Materials. (1996). ASTM C496-96: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International.
- [67] American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM C293: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading). ASTM International.
- [68] Bureau of Indian Standards. (1980). IS: 1237-1980 – Method for testing abrasion resistance of concrete. Bureau of Indian Standards.
- [69] Schmidt, E. (1948). The design of counter-current heat exchangers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 159(1), 351–362.
- [70] Akashi, T., & Amasaki, S. (1984). Study of the stress waves in the plunger of a rebound hammer at the time of impact. *ACI Special Publication*, 82, 17–34.
- [71] Bassuoni, M. T., & Nehdi, M. L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, 37, 1070–1084.
- [72] American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM D1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. ASTM International.
- [73] Debieb, F. (1999). Valorisation des déchets de briques et béton de démolition comme agrégats de béton [Mémoire de magister, Université de Blida].
- [74] Agoe-Centsil, K. K., Brown, T., & Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31, 707–712.
- [75] Fumoto, M., et al. (2012). Water absorption characteristics of recycled aggregate. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(10), 258–267.

References

- [76] Menou, A., Mounajed, G., Boussa, H., Pineaud, A., & Carré, H. (2006). Residual fracture energy of cement paste, mortar and concrete subject to high temperature. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 45(1), 64–71.
- [77] American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C267-12: Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacing and polymer concretes. ASTM International.
- [78] Lepage, S. (1998). Étude d'un nouveau procédé de production de béton compacté au rouleau par addition de coulis de ciment dans un mélange granulaire. Université de Sherbrooke.
- [79] Abdel-Mohti, A., Shen, H., & Khodair, Y. (2016). Characteristics of self-consolidating concrete with RAP and SCM. *Construction and Building Materials*, 102, 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.007>
- [80] Abut, Y., Yildirim, S. T., Ozturk, O., & Ozyurt, N. (2022). A comparative study on the performance of RCC for pavements casted in laboratory and field. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1777–1790. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1823391>
- [81] Aghaeipour, A., & Madhkhan, M. (2020). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP) – A review. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1775–1798. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1579754>
- [82] Algerian Institute of Standardization (IANOR). (n.d.). NA 17092. IANOR.
- [83] American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM C267-20: Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. ASTM International.
- [84] American Society for Testing and Materials. (2004). ASTM C1012-04: Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. ASTM International.
- [85] Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., & Yang, R. (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 77–86.
- [86] Bashkoul, Y., & Divandari, H. (2018). Evaluate the use of recycled asphalt pavement (RAP) in the construction of roller compacted concrete pavement (RCCP). *Civil Engineering Journal*, 4(5), 1157–1164. <https://doi.org/10.28991/cej-0309164>

References

- [87] Bilodeau, J. P., & Doré, G. (2012). Estimation of tensile strains at the bottom of asphalt concrete layers under wheel loading using deflection basins from falling weight deflectometer tests. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(7), 771–778. <https://doi.org/10.1139/l2012-063>
- [88] Bílý, P., Fládr, J., & Haase, M. (2015). Experimental verification of the properties of roller compacted concrete for pavements. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1124, pp. 307–312). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1124.307>
- [89] Boubekour, T., Salhi, M., Benyahia, A., & Benaddi, H. (2024). Experimental investigation on the effects of recycled pavement materials on the performance of self-compacting concrete. *Journal of Scientific & Industrial Research (JSIR)*, 83(4), 445–452. <https://doi.org/10.56042/jsir.v83i4.2679>
- [90] Chaikaew, C., Nokkaew, N., Sua-iam, G., & Songkhla, W. N. (2024). Utilizing reclaimed asphalt pavement (RAP) as a replacement for coarse aggregate in roller compacted concrete. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 31(1). <https://doi.org/10.55766/sujst-2024-01-e02653>
- [91] European Committee for Standardization (CEN). (2011). EN 197-5: Cement – Part 5: Composition, specifications, and conformity criteria for composite cements. CEN.
- [92] Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2010). Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004>
- [93] Debbarma, S., Ransinchung, G. D., & Singh, S. (2019). Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 199, 508–525. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.047>
- [94] Debbarma, S., & Ransinchung, G. D. (2021). Achieving sustainability in roller compacted concrete pavement mixes using reclaimed asphalt pavement aggregates – State of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125078>
- [95] Fakhri, M., & Amoosoltani, E. (2017). The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 137, 470–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.150>
- [96] Masi, G., Michelacci, A., Manzi, S., & Bignozzi, M. C. (2022). Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete. *Construction and Building Materials*, 341, 127745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127745>

References

- [97] Mohamed, S., Amar, B., Li, A., Boubekeur, T., Ashour, A., & Said, C. (2024). Evaluation of the performance of fiber-reinforced mortars based on dredged sludge. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 71, 31–44. <https://doi.org/10.4028/p-KiAW2W>
- [98] Morales Fournier, J., Acosta Álvarez, D., Alonso Aenlle, A., Tenza-Abril, A. J., & Ivorra, S. (2020). Combining reclaimed asphalt pavement (RAP) and recycled concrete aggregate (RCA) from Cuba to obtain a coarse aggregate fraction. *Sustainability*, 12(13), 5356. <https://doi.org/10.3390/su12135356>
- [99] Association Française de Normalisation (AFNOR). (2007). NF EN 12697-32+A1 : Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 32 : Compactage en laboratoire de mélanges bitumineux par compacteur vibratoire. AFNOR.
- [100] Oss-Emer, A. L., & dos Santos, A. G. (2024). Predicting the performance of semi-rigid pavement with partial replacement of RAP in RCC and designed using a mechanistic–empirical method. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0217-7>
- [101] Paglia, C., Paderi, M., Mosca, C., & Antonietti, S. (2022). The recycling of a concrete with known properties to reproduce a durable material for the civil engineering infrastructure. In *Proceedings of the International Meet on Civil, Structural and Environmental Engineering* (pp. 23–26). <https://www.researchgate.net/profile/C-Paglia>
- [102] Rahman, S. S., & Khattak, M. J. (2021). Study of tensile properties of roller compacted geopolymer concrete and Portland cement concrete using 100% recycled concrete aggregates (RCA) and reclaimed asphalt pavement (RAP). In *Proceedings of the ASCE Tran-SET 2021* (pp. 212–222). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784483787.022>
- [103] Rebai, B., Benaddi, H., Messas, T., & Salhi, M. (2025). Evaluation of self-compacting concrete for concrete repair applications. *Research on Engineering Structures and Materials*, 11(2), 495–513. <https://jresm.org/archive/resm2024.255st0423rs.html>
- [104] Rout, M. K. D., Sahdeo, S. K., Biswas, S., Roy, K., & Sinha, A. K. (2023). Feasibility study of reclaimed asphalt pavements (RAP) as recycled aggregates used in rigid pavement construction. *Materials*, 16(4), 1504. <https://doi.org/10.3390/ma16041504>
- [105] Salhi, M., Addi, H. B., & Boubekeur, T. (2025). Investigating the performance of self-compacting concrete exposed to hot weather. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 69(1), 251–262. <https://pp.bme.hu/ci/article/view/24092>

References

- [106] Salhi, M., Ghrici, M., Bilir, T., & Uysal, M. (2020). Combined effect of temperature and time on the flow properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 240, 117914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117914>
- [107] Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- [108] Shi, X., Mukhopadhyay, A., & Zollinger, D. (2018). Sustainability assessment for Portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 192, 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.004>
- [109] Shi, Y., Shen, X., Liu, J., Wang, W., Han, X., Zhang, J., & Li, G. (2021). A physical model demonstrating critical zone structure and flow processes in headwaters. *Authorea Preprints*.
- [110] Singh, S., Ransinchung, G. D., & Kumar, P. (2017). Effect of mineral admixtures on fresh, mechanical and durability properties of RAP inclusive concrete. *Construction and Building Materials*, 156, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.144>
- [111] Singh, S., Ransinchung, G. D., & Kumar, P. (2018). Performance evaluation of RAP concrete in aggressive environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018231. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002316)
- [112] Uygunoğlu, T., Topçu, İ. B., & Çınar Resuloğulları, E. (2024). Durability effect of reclaimed asphalt aggregate on concrete road pavement. *Materiales de Construcción*, 74(353). <https://doi.org/10.3989/mc.2024.353>
- [113] White, P., Golden, J. S., Biligiri, K. P., & Kaloush, K. (2010). Modeling climate change impacts of pavement production and construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 776–782. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.007>
- [114] Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed., pp. 147–166). Pearson Prentice Hall.
- [115] Westergaard, H. M. (1926). Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. *Public Roads*, 7, 25–35.
- [116] Coquand, R. (1985). *Routes*. Eyrolles.
- [117] Hogg, A. H. A. (1938). Equilibrium of a thin plate, symmetrically loaded, resting on an elastic foundation of infinite depth. *Philosophical Magazine, Series 7*, 25(169), 576–582.

References

- [118] Association Française de Normalisation (AFNOR). (2020). XF P 98-135 : Enrobés hydrocarbonés – Caractérisation des agrégats d'enrobés pour recyclage à chaud en centrale. AFNOR.
- [119] Burmister, D. M. (1943). The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. *Highway Research Board Proceedings*, 23, 126–148.
- [120] Jeuffroy, G. (1965). Considérations théoriques sur le calcul des chaussées en béton. *Revue Générale des Routes et Aérodrômes*, 276.
- [121] Goldbeck, A. T. (1919). Thickness of concrete slabs. *Public Roads*, pp. 34–38.
- [122] Older, C. (1924). Highway research in Illinois. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 87, 1180–1222.
- [123] Ioannides, A. M., Thompson, M. R., & Barenberg, E. J. (1985). Westergaard solutions reconsidered. *Transportation Research Record*, 1043, 13–23.
- [124] Association Canadienne de Ciment. (1984). Thickness design for concrete highway and street pavements (Canadian edition/metric, Engineering Bulletin EB209.03P). Association Canadienne de Ciment.
- [125] Westergaard, H. M. (1948). New formulas for stresses in concrete pavement of airfields. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113, 425–444.
- [126] Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes & Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (SETRA-LCPC). (2003). Logiciel ALIZE-Mécanique. SETRA-LCPC.
- [127] Pickett, G., & Ray, G. K. (1951). Influence chart for concrete pavement. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 49–73.
- [128] Pickett, G., & Badaruddin, S. (1956). Influence chart for bending of a semi-infinite pavement slab. In *Proceedings of the Ninth International Congress on Applied Mechanics* (Vol. 6, pp. 396–402).
- [129] Benzerzour, M. (2004). Étude expérimentale et numérique du renforcement des tabliers de ponts en béton armé par des rechargements adhérents [Thèse de doctorat, Université d'Artois].
- [130] ANSYS Inc. (2016). ANSYS 16.0 documentation. ANSYS Inc.
- [131] Dahmane, M., Benadouda, M., Bennai, R., Saimi, A., & Aitatmane, H. (2024). Effect of a crack on the dynamic response of bidirectional porous functionally graded beams on an elastic foundation based on the finite element method. *Acta Mechanica*, 235(6), 3849–3860. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-03906-1>

References

- [132] Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 204–212.
- [133] Isola, M., Betti, G., Marradi, A., & Tebaldi, G. (2013). Evaluation of cement treated mixtures with a high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 238–247.
- [134] Kamal, I., & Bas, Y. (2021). Materials and technologies in road pavements – An overview. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2660–2667. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.643>
- [135] Litao, G., et al. (2016). Thermal stress of asphalt pavements based on dynamic characteristics of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9, 363–367.
- [136] Dutkiewicz, M., Yildirim, A., Stałowski, P., & Yücel, H. E. (2024). Roller compacted concrete technology for vehicle parking area solutions. *MATEC Web of Conferences*, 396, 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439601001>
- [137] Okafor, F. O. (2010). Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 17(9), 47–58.
- [138] Alkaissi, Z. A. (2018). Effect of high temperatures and traffic load on rutting performance of flexible pavement. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.005>
- [139] Zdiri, M., Abriak, N. E., & Ouezdou, M. B. (2020). Simulation de la formulation et du dosage du béton compacté au rouleau, cas des carrières de matériaux locaux. *Revue Internationale des Technologies Émergentes et de l'Ingénierie Avancée*, 10(5), 44–49. <https://hal.science/hal-03224980>
- [140] Zdiri, M., Abriak, N. E., Neji, J., & Ben Ouezdou, M. (2009). Modélisation de la distribution des contraintes et des déformations dans une chaussée en béton armé à l'aide du code informatique « Abaqus ». *Revue Électronique de Génie des Structures*, 9, 37–44.
- [141] Messafah, A. A., Safer, O., Laoufi, I., Dahmane, M., Salhi, M., Ait Mohamed Amer, A., Chaib, O., Badache, A., & Kameche, Z. E.-A. (2024). Effect of the incorporation of dam sediment on the mechanical properties of roller compacted concrete: A numerical study of stresses and deformations under different loads. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), 01–41. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-192>