République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr.Yahia Farés de MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de la Matière
Filière : Génie Civil

Memoire de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Construction et Matériaux

Thème

Formulation d'un béton compacté au rouleau à base de granulats recyclés bitumineux

Etudié par :

M^elle^. FACI Ihcène

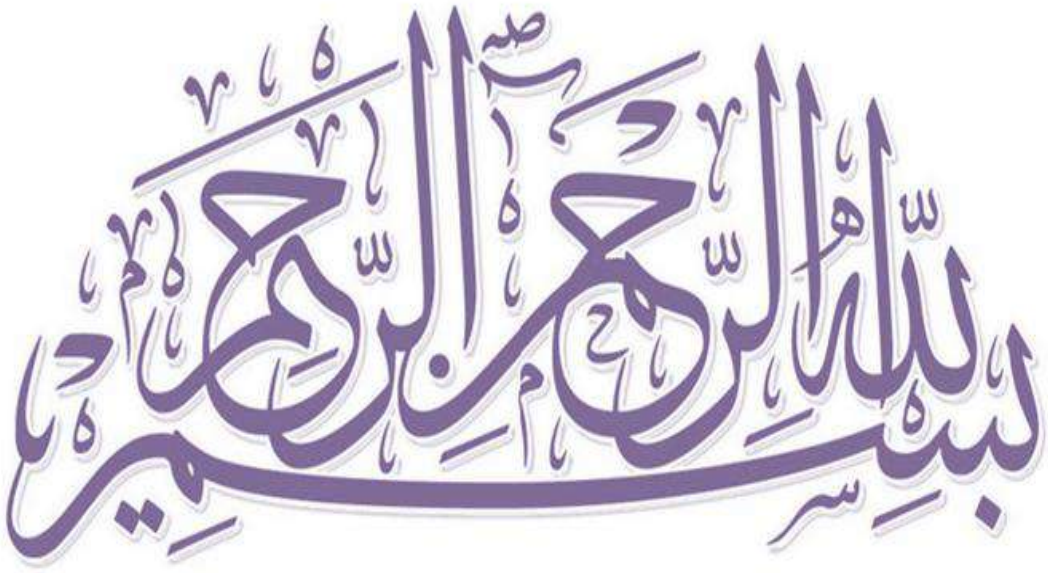
M^elle^ .LAMI Fatma Zohra

Proposé et dirigé par :

Dr. DEBIEB Farid

M^elle^. SETTARI Chafika

Promotion 2013-2014


بسم الله الرحمن الرحيم

آية الكرسي

بسم الله الرحمن الرحيم

الله لا إله إلا هو الحي القيوم

لا تأخذه سنة ولا نوم

له ما في السموات وما في الأرض

من ذا الذي يشفع عنده إلا بإذنه

يعلم ما بين أيديهم وما خلفهم

ولا يحيطون بشيء من علمه إلا بما شاء

وسع كرسيه السموات والأرض

ولا يئوده حفظهما وهو العلي العظيم



لا إكراه في الدين قد تبين الرشد من الغي

فمن يكفر بالطاغوت ويؤمن بالله

فقد استمسك بالعروة الوثقى

لا انفصام لها والله سميع عليم

الله ولي الذين آمنوا يخرجهم

من الظلمات إلى النور

والذين كفروا أولياؤهم الطاغوت

يخرجونهم من النور إلى الظلمات

أولئك أصحاب النار هم فيها خالدون

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces langues années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteurDrDEBIEB Farid et Melle SETTARI Chafikapour leurs disponibilités, leurs aides durant tout le déroulement de ce projet. Grâce à leurs dévouements, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à Melle BOUKELKAL, qui a su comment nous guider toute la durée du travail et nous a fait bénéficier de son orientation tant instructive.

A tous les enseignants de l'Université, et surtout nos professeurs durant toutes les années, pour la connaissance qu'ils ont toujours sus nous transmettre et pour leur disponibilité dans la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont de bien vouloir assister à cette soutenance.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.



Lami / Faci

Juin 2014

Dédicace

A la lumière de ma vie, aux prunelles de mes yeux à ma raison d'être, à vous qui m'avez appris à continuer de marcher vers la lumière nonobstant les aléas de la vie courante, A vous dont le ventre chaleureux a toujours été le seul refuge et sanctuaire, pour votre indulgence, clémence et bienveillance, vous dont

L'inquiétude exagéré ne décelait que l'amour, A vous les personnes les plus dévouées……..que dieu me vous protège. A vous chers parents.

Je dédie ce modeste travail

A ma mère, pour sa bravoure et son amour sans cesse renouvelé. Que ce présent soit le témoignage de mareconnaissance et qu'il fasse l'objet de ma fierté. Puisse dieu te permettre de jouir du produit de toneffort.

A mon père, pour tous les sacrifices consentis pour la réussite de mes études, je ne trouveraijamais les mots justes pour te remercier.

A mes sœurs : Fella et Chérifa et leurs petites familles.

A ma sœur Nadia qui a su comment me guidée.

A toute la famille « LAMI et BENALLEL »sans exception.

A ma chère et douce amie Ihcène au prés de laquelle j'ai passé mes plus belle années et moment de la fac.

A mes amis de promotion génie civil 2014 pour tous les moments vécus à leur cotés.

A tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin en pensées et prière, Merci.

ZOLA

Dédicace

A la lumière de ma vie, aux prunelles de mes yeux à ma raison d'être, à vous qui m'avez appris à continuer de marcher vers la lumière nonobstant les aléas de la vie courante, A vous dont le ventre chaleureux a toujours été le seul refuge et sanctuaire, pour votre indulgence, clémence et bienveillance, vous dont

L'inquiétude exagéré ne décelait que l'amour, A vous les personnes les plus dévouées……..que dieu me vous protège. A vous chers parents.

Je dédie ce modeste travail

A ma mère, pour sa bravoure et son amour sans cesse renouvelé. Que ce présent soit le témoignage de mareconnaissance et qu'il fasse l'objet de ma fierté. Puisse dieu te permettre de jouir du produit de toneffort.

A mon père, pour tous les sacrifices consentis pour la réussite de mes études, je ne trouveraijamais les mots justes pour te remercier.

A mes SOEURS : Imene,Nesrine et Racha .

A mon petit frère :AmhamedAbdEldjalil

A toute la famille « Faci et Kechida »sans exception

A mon binôme et ma chère amie et sa famille (zola) qui est m'aide infiniment.

A mes amis de promotion génie civil 2014 pour tous les moments vécus a leur cotés.

A tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin en pensées et prière, Merci.

Ihcène

ملخص

الطرق الإسفلتية هي هياكل تتطلب صيانة دورية لضمان راحة وسلامة جميع المستخدمين بعد تدهورها, و إعادة استعمال الخرسانة الإسفلتية القديمة يوفر العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية .الهدف من هذا البحث هو إعادة استعمال المواد الإسفلتية التي حصل عليها عن طريق طحن الطبقات الإسفلتية في صناعة خرسانة اسمنتية جديدة (الخرسانة المعدة بالضغط) هي أيضا موجهة للاستخدام في بناء الطرق لطبقة قاعدية. خصائص المواد (الطبيعية و المستعملة) و كذا الحالة الفيزيائية و الميكانيكية و ديمومة الخرسانة قد انجزت.

Résumé

Les chaussées bitumineuses sont des structures qui nécessitent un entretien régulier pour assurer le confort et la sécurité de tous les usagers. Après dégradation, le recyclage de l'ancien béton bitumineux offre de multiples avantages sur le plan environnemental et économique. L'objectif de cette recherche vise à valoriser l'ancien béton bitumineux obtenus par fraisage des couches de chaussées bitumineuses dans la fabrication d'un nouveau béton de ciment (béton compacté au rouleau -BCR) destiné lui aussi à être utilisé dans la construction routière comme couche de base. La caractérisation des granulats (naturels et recyclés) et l'analyse des performances physiques et mécaniques ainsi que la durabilité du béton sont réalisées.

Abstract

Bituminous pavements are structures that require regular maintenance to ensure the comfort and safety for all users after degradation. Recycling of old asphalt concrete offers many environmental benefits and economic. The objective of this research is to develop the mix obtained by milling asphalt concrete layers of asphalt pavements in the manufacture of a new cement concrete (roller compacted concrete -RCC) for it’s also to be used in road construction as a base layer. Characterization of aggregates (natural and recycled) and analysis of physical, mechanical and durability of concrete performance are achieved.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations

Introduction général

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1.Introduction ……01

I.1.1. Notion de déchets ……01

I.1.2.Introduction ……01

I.1.3.Définition ……01

I.1.4. Différents types de déchets……02

I.1.4.1. Déchets ultimes ……02

I.1.4.2. Déchets inertes ……02

I.1.4.3. Déchets assimilés ……03

I.1.4.4. Déchets verts ……03

I.1.4.5. Déchets organiques ……03

I.1.4.6. Déchets industriels banals (DIB) ……03

I.1.4.7. Déchets dangereux ……03

I.1.4.8.Déchets routier ……04

I.1.5.Qualification des déchets liés à la route ……04

I.1.5.1.Les déchets inertes……04

I.1.5.2.Les déchets industriels banals ……04

I.1.5.3.Les déchets industriels spéciaux……04

I.1.6. Recyclage des déchets ……05

I.1.6.1. Définition ……05

I.1.6.2.Les types des déchets recyclés ……05

I.1.6.3.Les matériaux bitumineux recyclés ……06

I.1.6.4. Définition et Réglementation des matériaux hydrocarbonés ……...……10
I.1.6.5. Terminologie et identification des déchets ……...……12
I.1.6.6.L'utilisation des granulats issus de recyclage……14
I.1.6.7. Matériaux de recyclage autorisé ……...……15
I.1.7.Conclusion ……16
I.2. Le Béton Compacté au Rouleau(BCR)……17
I.2.1. Introduction……...……17
I.2.2. Historique ……..…17
I.2.3. Les avantage du BCR……...18
I.2.4. Inconvénients ……..……...19
I.2.5. Mise en place du BCR ……..……20
I.2.5.1. Conditions météorologiques…….……20
I.2.5.2. Préparation de l'infrastructure……20
I.2.5.3. Réglage……..……21
I.2.5.4. Compactage du BCR…….……21
I.2.6. Constituants ……..…23
I.2.6.1. Les liants ……..……..23
I.2.6.2. Les granulats……..……24
I.2.6.3. Eau ……..…...…24
I.2.7. Intérêt du B.C.R. et domaines d'utilisation ……..…25
I.2.7.1. Intérêt économique……25
I.2.7.2. Intérêt du point de vue des délais de réalisation……25
I.2.8. La cure d'un BCR ……..……26
I.2.9. Méthodes de formulation d'un BCR ……27
I.2.9.1. Méthodes empiriques…….……27
1.2.9.2. Méthode semi-empirique……..27
I.2.9.3. Méthode théorique ……28
I.2.10. Rôle et constituants des différentes couches de chaussée…...……33
I.2.10.1.Constituants d'une couche de chaussée……...…… 33
I.2.10.2.Principe de fonctionnement des différentes familles de chaussées …….35
I.2.11. Propriétés du béton compacté au rouleau ……..……..…39
I.2.11.1. Propriétés du BCR à l'état frais ……..……39
I.2.11.2. Propriétés mécaniques du BCR…….……44
I.2.11.3. Durabilité du BCR……...……51

I.2.12.Conclusion……52
I.3. Présentation du logiciel René - LCPC ……53
I.3.1. Domaine d'application du logiciel René-LCPC……54
I.3.2. Données d'entrée nécessaires au logiciel……55
1.3.2.1. Masses volumiques……55
I.3.2.2. Granularités……55
I.3.2.3. Surface spécifique……56
I.3.2.4. Compacité de l'empilement individuel de chaque constituant……56
I.3.2.5. Indice de compaction……56
I.3.2.6. Confinement……57
I.3.3. Données de sortie……57
I.3.4. Fonctions du logiciel……58
I.3.4.1. Fenêtre "Résultats"……58
I.3.4.2. Menu "Constituants"……58
I.3.4.3. Menu "Mélange"……61
I.3.4.4. Menu "Calcul"……62
I.3.4.5. Menu "Edition"……64
I.3.4.6. Menu "Fichier"……64
I.6.Conclusion……65
Chapitre II : Matériaux et essais
II.1. Introduction ……66
II.2. Matériaux utilisés……66
II.2.1. Ciment ……66
II.2.2. Granulats naturels……69
II.2.3. Granulats recyclés……69
II.2.4. L'eau de gâchage……70
II.3. Préparation des matériaux utilisés ……70
II.4. Equipement utilisé……72
II.5. Essais effectués sur granulats……73
II.5.1.Granulométrie……73
II.5.2.Masse volumique……74
II.5.3. Absorption d'eau ……75
II.5.4. Equivalent de sable ……75
II.5.5. Dureté Los Angeles ……76

II.5.6. Compacité / porosité des granulats ……..……77
II.6. Confection et cure des éprouvettes……...…77
II.7. Identification et formulation du BCR…….……78
II.7.1. Identification des mélanges……..……78
II.7.2. Optimisation de la composition du BCR par René – LCPC……..……..…79
II.7.2.1. Compacité des granulats ……..……79
II.7.2.2. Compacité du ciment……..…..…79
II.7.2.3. Optimisation de la quantité d'eau optimale (Proctor modifié) …..…..…80
II.7.2.4. Etapes de compactage……..…..……..……..……81
II.8. Essais effectués sur le béton ……...……83
II.8.1. Béton a l'état frais……83
II.8.1.1. Affaissement ……...……83
II.8.1.2. Densité à l'état frais…….……..84
II.8.2.Béton a l'état durci ……..……..84
II.8.2.1. Densité à l'état durci ……..…….……84
II.8.2.2. Résistance à la compression ……....…85
II.8.2.3. Résistance à la traction par fendage……87
II.8.2.4. Dureté superficiel (indice de rebondissement) ……88
II.8.2.5. Auscultation dynamique ……..…91
II.8.2.6. Module d'élasticité ……..……94
II.8.2.7.Absorption d'eau ……..…95
II.8.2.8. Variations dimensionnelles et massiques……...…….……97
II.9.Variables étudies…….....100
II.10.Conclusion……101
CHAPITRE III : résultats et interprétation
III.1. Introduction…….…..…102
III.2. Granulats ……..……102
III.2.1. Analyse granulométrique …….……102
III.2.2. Masse volumique……..……104
III.2.3. Absorption d'eau…….…..……105
III.2.4. Equivalant de sable …….……105
III.2.5. Dureté (Los – Angeles)……...…..…106
III.3. Compacité des granulats et de ciment selon René LCPC……106
III.3.1. Compacité du ciment……....…106

III.3.2. Compacité des granulats……..…106
III.4. Identification des paramètres du logiciel René LCPC…….……107
III.4.1. Constituants …….……107
III.4.2. Mélange ……110
III.4.3. Calcul ……..….111
III.5. Optimisation de la porosité minimale des mélanges……112
III.5.1. Optimisation de la porosité minimale du BCR 0/0…….…..…113
III.5.2. Optimisation de la porosité minimale du BCR 50/50……..……114
III.5.3. Optimisation de la porosité minimale du BCR 100/100……...115
III.5.4. Optimisation de la porosité minimale du BCR 0/100……...116
III.5.5. Optimisation de la porosité minimale du BCR 100/0……...……117
III.6. Formulation du BCR par René LCPC……..…118
III.7. Proctor modifié…….……119
III.8. Béton a l'état frais……..……..…121
III.8.1. Affaissement……..…...…121
III.8.2. Densité …….……121
III.9. Béton a l'état durci……...……122
III.9.1. Densité……..…122
III.9.2. Comportement mécanique……...……123
III.9.2.1. Résistance à la compression…….……...…123
III.9.2.2. Résistance à la traction par fendage……..……124
III.9.2.3. Module d'élasticité ……...……126
III.9.3. Essais non destructif……..…130
III.9.3.1. Dureté superficiel (Indice de rebondissement)……130
III.9.3.2. Auscultation dynamique (Vitesse du son)……131
III.9.4. Variation dimensionnelles et durabilité ……...131
III.9.4.1 Retrait et perte en masse ……...…131
III.9.4.2. Gonflement et gain en masse……133
III.9.4.3. Absorption d'eau……..…135
Conclusions générales
Recommandations
Références bibliographiques
Annexe

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Principales caractéristiques d'un BCR pour barrage et d'un BCR pour chaussée	18
Tableau I.2	Teneur en eau optimal des différents mélanges	39
Tableau I.3	Résultats de l'essai Proctor modifié	39
Tableau I.4	Optimisation de la quantité d'eau pour le rapport S/G optimal	40
Tableau I.5	Compacité des mélanges en fonction de E/C_{eff}	41
Tableau I.6	Densité du BCR donné par Proctor modifié	41
Tableau I.7	Résultats de l'essai Proctor modifié	42
Tableau I.8	Propriétés à l'état frais des BCR	42
Tableau I.9	Différents dosage d'un BCR (kg/m^3)	43
Tableau I.10	Différents mélanges du BCR	44
Tableau I.11	Résistance mécanique des mélanges	45
Tableau I.12	Indice de compaction	57
Tableau II.1	l'analyse chimique du ciment et composition du clincker	67
Tableau II.2	essais physique sur ciment	68
Tableau II.3	Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge	69
Tableau II.4	Classe granulaire en fonction du nombre de boulets	76
Tableau II.5	Procédure de malaxage du BCR	82
Tableau II.6	Vitesse du sonpar essai ultrasonique	93
Tableau II.7	Résumé des résultats obtenus	95
Tableau III.1	Analyse granulométriques des différents sables	102
Tableau III.2	Masses volumiques des granulats utilisés	104
Tableau III.3	Pourcentage d'absorption d'eau des granulats utilisés	105
Tableau III.4	Equivalant de sable	105
Tableau III.5	Dureté des granulats utilisés	106
Tableau III.6	Compacité du ciment	106
Tableau III.7	Compacité des granulats	106
Tableau III.8	Composition pour 1 m^3 des différents BCR	118
Tableau III.9	Teneur en eau optimale	119
Tableau III.10	Le rapport E/C_{eff} pour chaque type BCR	119
Tableau III.11	Vérification nécessaire pour un BCR routier	120

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Stockage de fraisât de provenance unique avant conditionnement	**6**
Figure I. 2	Stock d'agrégats avant conditionnement et reprise par pelle mécanique avant concassage	**8**
Figure I.3	Stock d'agrégats 0 / (10-12,5) mm après concassage – criblage	**9**
Figure I.4	Réutilisation des agrégats d'enrobés	**10**
Figure I.5	representation de déchet de béton avant et aprés concassage	**12**
Figure I.6	representation de dechet de maçonnerie avant et aprés concassage	**13**
Figure I.7	representation de dechet de béton et de maçonnerie avant et aprés concassage	**13**
Figure I.8	representation de dechet d'enrobés hydrocarbonés avant et aprés concassage	**13**
Figure I.9	Synthèse des origines et définition des usages	**14**
Figure I.10	préparation du l'infrastructure	**20**
Figure I.11	Réglage de la couche du BCR à l'aide d'un finisseur	**21**
Figure I.12	compactage du BCR	**22**
Figure I.13	Bâche de protection contre la pluie	**26**
Figure I.14	Cure du béton par arrosages ciblés	**26**
Figure I.15	Représentation de l'effet de desserrement (gauche) et de l'effet de paroi (droite).	**32**
Figure I.16	Les différentes couches d'une chaussée	**33**
Figure I.17	Représentation d'un chaussé souple	**35**
Figure I.18	fonctionnement d'une chaussée souple	**36**
Figure I.19	Représentation d'une chaussée bitumineuse épaisse	**36**
Figure I.20	Représentation d'une chaussée à assise traitée liants hydrauliques	**37**
Figure I.21	fonctionnement d'une chaussée à assise traitée au liant hydraulique	**37**
Figure I.22	Représentation d'une chaussée à structure mixte	**38**
Figure I.23	Résultat de l'essai Proctor modifié	**40**
Figure I.24	Résistance à la compression à 7 jours en fonction de E/C_{eff}	**40**
Figure I.25	Compacité en fonction de E/C_{eff}pour un S/G optimal	**41**
Figure I.26	Compactage du BCR et variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau	**42**
Figure I.27	Relation entre la teneur en eau optimal et la densité du BCR	**43**
Figure I.28	Résistance à la compression à 7 jours en fonction de la compacité	**44**
Figure I.29	Résultats des propriétés mécaniques sur 3 mélanges à l'âge de 88 jours	**44**
Figure I.30	résistance à la compression en fonction de l'âge	**45**
Figure I.31	Résistance à la compression des éprouvettes	**45**
Figure I.32	Résistance à la compression des différents mélanges	**46**
Figure I.33	Résistance à la compression à 7 jours sur des BCR à partir de granulats recyclés et naturels	**47**

Figure I.34	Résistance à la compression à 28 jours sur des BCR à partir de granulats recyclés et naturels	**47**
Figure I.35	Résistance à la compression à 7 jours lors de la variation de la teneur en ciment	**47**
Figure I.36	Evolution de la résistance à la compression des BCR dosé à 250 kg/m^3 avec l'âge	**48**
Figure I.37	Evolution de la résistance à la traction par fendage des BCR dosé à 250 kg/m^3 avec l'âge	**48**
Figure I.38	Module d'élasticité de différents mélanges de BCR	**49**
Figure I.39	Corrélation entre résistance en compression et module d'élasticité béton durci	**49**
Figure I.40	Essai de chargement et relation contrainte – déformation du BCR	**50**
Figure I.41	Variation du module d'élasticité en fonction de la résistance du BCR	**50**
Figure I.42	Absorption d'eau par capillarité des bétons recyclés	**51**
Figure I.43	Gonflement dans l'eau des BRCR	**51**
Figure I.44	Retrait des BCR en fonction de l'âge	**52**
Figure I.45	Gonflement des BCR en fonction de l'âge	**52**
Figure I.46	Analyse granulométrique des ultrafines	**56**
Figure II.1	Le ciment utilisé.	**66**
Figure II.2	Les graviers utilisés	**69**
Figure II.3	Les sables utilisés	**69**
Figure II.4	Sable et gravier recyclés	**70**
Figure II.5	Procédure de lavage du gravier	**70**
Figure II.6	Etape de préparation du sable concassé	**71**
Figure II.7	Etape de préparation du sable roulé	**71**
Figure II.8	Etapes de préparation des granulats recyclés bitumineux	**72**
Figure II.9	Equipement utilisé pour la fabrication du BCR	**73**
Figure II.10	Tamiseuse électrique	**73**
Figure II.11	Cône pour la mesure de la masse volumique apparente	**74**
Figure II.12	Eprouvette pour la mesure de la masse volumique absolue	**74**
Figure II.13	Absorption d'eau des granulats	**75**
Figure II.14	Eprouvettes pour la réalisation de l'équivalent de sable	**75**
Figure II.15	Appareil Los Angeles	**76**
Figure II.16	Conservation des éprouvettes	**78**
Figure II.17	Optimisation de la composition du BCR selon René - LCPC	**78**
Figure II.18	Calcul de la compacité des granulats selon RENE	**79**
Figure II.19	Calcul de la compacité du ciment selon RENE	**79**
Figure II.20	Equipement de l'essai Proctor modifié	**81**
Figure II.21	Vibration sous Pression des différents moules	**81**
Figure II.22	Eprouvettes cylindriques et prismatique après coulage	**82**
Figure II.23	Avant et après malaxage du BCR	**82**
Figure II.24	Essai d'affaissement au cône d'Abrams	**83**
Figure II.25	Mesure de la densité du BCR à l'état frais	**84**
Figure II.26	Mesure de la densité du BCR à l'état durci	**85**
Figure II.27	Eprouvette cylindrique avant et après essai de compression simple	**86**
Figure II.28	Eprouvette cylindrique avant et après essai de traction par fendage	**87**
Figure II.29	Mesure de l'indice de rebondissement	**89**

Figure II.30	Essai scléromètrique	**90**
Figure II.31	Courbe traduisant l'indice de rebondissement en résistance mécanique	**91**
Figure II.32	Essai ultrasonique	**92**
Figure II.33	Mesure de la vitesse du son	**92**
Figure II.34	Mesure des déformations en fonction des charges appliquées	**94**
Figure II.35	Préparation des tranches pour l'essai d'absorption d'eau	**95**
Figure II.36	Principe de l'essai	**96**
Figure II.37	Essai d'absorption d'eau	**96**
Figure II.38	Rétractomètre pour la mesure des déformations	**97**
Figure II.39	Pesé des éprouvettes destinées au retrait et gonflement	**98**
Figure II.40	Principe de mesure du retrait	**98**
Figure III.1	Courbe granulométriques des sables naturels et recyclés utilisés	**103**
Figure III.2	Courbe granulométriques des graviers naturels et recyclés utilisés	**104**
Figure III.3	Fenêtre principale du logiciel RENE - LCPC	**107**
Figure III.4	Fenêtre bibliothèque des constituants	**107**
Figure III.5	Fenêtres propriété et compacité du ciment	**108**
Figure III.6	Fenêtres propriété et compacité du sable naturel corrigé	**108**
Figure III.7	Fenêtres propriété et compacité du sable recyclé corrigé	**108**
Figure III.8	Fenêtres propriété et compacité du gravier naturel 3/8	**109**
Figure III.9	Fenêtres propriété et compacité du gravier naturel 8/15	**109**
Figure III.10	Fenêtres propriété et compacité du gravier recyclé 4/10	**109**
Figure III.11	Fenêtres propriété et compacité du gravier recyclé 10/14	**110**
Figure III.12	Fenêtre choix des matériaux pour le mélange	**110**
Figure III.13	Activation du calcul dans la fenêtre principale	**110**
Figure III.14	Fenêtre de choix du milieu confiné	**111**
Figure III.15	Fenêtre calcule l'optimum d'un mélange binaire	**112**
Figure III .16	Optimisation de la porosité minimale du BCR0/0 par René - LCPC	**113**
Figure III.17	Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR0/0	**113**
Figure III.18	Optimisation de la porosité minimale du BCR50/50 par René - LCPC	**114**
Figure III.19	Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR50/50	**114**
Figure III.20	Optimisation de la porosité minimale du BCR100/100 par René - LCPC	**115**
Figure III.21	Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR100/100	**115**
Figure III.22	Optimisation de la porosité minimale du BCR0/100 par René - LCPC	**116**
Figure III.23	Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR0/100	**116**
Figure III.24	Optimisation de la porosité minimale du BCR100/0 par René - LCPC	**117**
Figure III.25	Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR100/0	**117**
Figure III.26	Résultats de l'essai Proctor modifié	**119**
Figure III.27	Affaissement nul d'un BCR	**122**
Figure III.28	Densité du BCR à l'état frais	**122**
Figure III.29	Densité du béton a l'état durci	**122**
Figure III.30	Résistance à la compression	**123**

Figure III.31	Variation de la résistance a la compression en fonction du pourcentage en substitution	**124**
Figure III.32	Résistance à la traction par fendage	**125**
Figure III.33	Variation de la résistance à la traction en fonction du pourcentage en substitution	**125**
Figure III.34	Module d'élasticité pour le BCR 0/0	**126**
Figure III.35	Module d'élasticité pour le BCR 50/50	**127**
Figure III.36	Module d'élasticité pour le BCR 100/100	**127**
Figure III.37	Module d'élasticité pour le BCR 0/100	**128**
Figure III.38	Module d'élasticité pour le BCR 100/0	**128**
Figure III.39	Histogramme de comparaison entre le module d'élasticité théorique et expérimental	**129**
Figure III.40	Histogramme de comparaison entre la résistance à la compression donné Par scléromètre et par écrasement	**130**
Figure III.41	La vitesse du son des différents bétons réalisés	**131**
Figure III.42	Evolution du retrait à l'air libre pendant les 28 premiers jours	**131**
Figure III.43	Evolution du retrait à l'air libre pendant les 90 jours	**132**
Figure III.44	Perte en masse en fonction de l'âge	**132**
Figure III.45	Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 28 premiers jours	**133**
Figure III.46	Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 90 jours	**134**
Figure III.47	Gain en masse en fonction de l'âge	**134**
Figure III.48	Absorption d'eau des bétons réalisés	**135**

Notations

ε : Déplacement
ρ : Masse volumique
ρ_{abs} :masse volumiqueabsolu
ρ_{app}:masse volumique apparente
ρ_d : masse volumique à l'état sec
γ_d : poids volumique sec
ρ_h :masse volumique à l'état humide
γ_h : poids volumique humide
ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine
ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage
2CaO SiO_2 (C_2S) : Le silicate bi-calcique impur (Bélite)
3CaO Al_2O_3, (C_3A) : L'aluminate tricalcique (Célite)
3CaO SiO_2 (C_3S) : Le silicate tricalcique impur (Alite)
4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3 (C4AF) : L'alumino-ferrite tétra-calcique
ACI : l'American Concrete Institute
Al_2O_3 : L'alumine
ASTM : norme américaine
BAP : Béton Auto Plaçant
BCR 0/0 : Béton compacté au rouleau à base de 100% gravier et sable naturel
BCR 0/100 : Béton compacté au rouleau à base de gravier naturel et 100% sable recyclé
BCR 100/0 : Béton compacté au rouleau à base de 100% gravier recyclé et sable naturel
BCR 100/100 : Béton compacté au rouleau à base de 100% gravier et sable recyclé
BCR 50/50 : Béton compacté au rouleau à base de 50% gravier et sable recyclé
BCR : Béton Compacte au Rouleau
BCRHR : Béton Compacté au Rouleau à Haute Résistance
BHP : Béton à Haute Performance
BTP : bâtiment et travaux publique
C : Dosage du ciment
c : la compacité
CaCO3 : Teneur en calcaire
CaO : La chaux
CHF : Ciment de haut fourneau
CPA : Le ciment portland artificiel
CPJ : Le ciment portland composé
CRIB : Centre de recherche interuniversitaire sur le béton
D : La dimension du plus gros granulat
d : La dimension du plus petit granulat

D : Les fumées de silice
DIB : Déchets industriels banals
DIS : Déchets industriels spéciaux
DMS :Déchets ménagers spéciaux
DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé
E : Dosage en eau
E/C : Rapport eau /ciment
E_{eff} : Quantité d'eau efficace
ES : Equivalent de sable à piston
ES_V : Equivalent de sable à vue
F : Les fillers
f_c : Résistance souhaitée du béton a 28 jours
Fe_2O_3 : L'oxyde de fer
FFOM : fraction fermentescible des ordures ménagères
f_{mc} : Résistance nominale du ciment
GN : gravier naturel
GR : gravier recyclé
GTR : guide technique des remblais et couche de forme
I : Moment d'inertie de la section transversale
K_b : Coefficient relatif au squelette granulaire
L_0 : Longueur de base, prise égale à 160mm
LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge
M_0: Masse de l'éprouvette au moment du démoulage
M_f : Module de finesse
MgO : Oxyde de magnésium
$n^*_{r,j}$:viscosité relative
N : La distance de la fibre la plus éloignée
NA : Norme Algérienne
NB : Norme Belge
NE : Norme Européenne
p : la porosité
P : Pouzzolanes naturelles
p(x): Pourcentage de passant au diamètre x exprimé enμm
R.C.C: Rolled Compacted Concrete
R.C.D: Rolled Concrete in Dam
R_C : La résistance a compression
R_t : La résistance à la traction
S : Le sable
$S_{roulé}$: sable roulé
SiO_2 : La silice
SN_{corr} : sable naturel corrigé
SN : sable naturel concassé
SR_{corr} : sable recyclé corrigé

SR: sable recyclé
TOC: Teneur en matières organiques
V : volume de l'échantillon
v : volume non perturbé
W : Teneur en eau
W : teneur en eau
y_i **:** proportion massique
α_i **:**compacité propre
β_i **:**compacité virtuelle

Introduction générale

Cette recherche présente un travail de fin d'étude Master, ayant pour but la formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulats recyclés bitumineux et l'étude de leur comportement dans le temps.

Le béton compacté au rouleau, peu utilisé en Algérie, se définit comme un matériau composé de granulats, d'eau et liant hydraulique, mis en place comme un remblai et compacté au moyen de rouleaux vibrants. C'est un béton très sec, d'affaissement nul, utilisé pour des ouvrages massifs (barrages) et présentant de grandes surfaces horizontales (fondation de routes).

Les granulats recyclés proviennent des déchets de construction et de démolition, pour raison économiques et environnementales, il est intéressant d'examiner la possibilité de les utiliser pour la fabrication d'un béton compacté au rouleau.

Notre travail commence par une introduction générale suivi de trois chapitres, le premier chapitre est une revue bibliographique elle-même divisée en trois parties, la première est une notion de déchets, leurs définitions, leurs types et leurs recyclage. Ladeuxième partie est la définition d'un béton compacté au rouleau et son domaine d'utilisation. Et comme troisième partie on a détaillé le mode de fonctionnement du logiciel René – LCPC.

Le deuxième chapitre, présente les matériaux et les essais d’identification qu’on a effectués sur les granulats et le béton à l’état frais et à l’état durci.

Le dernier chapitre est une interprétation et une analyse des différents résultats trouvés par les essais du laboratoire.

On termine ce travail par une conclusiongénérale, et des recommandationspour des futurs travaux.

Chapitre I

Synthèse bibliographique



I.1. Introduction

Ce chapitre est une revue bibliographique divisée en trois parties, la première est une notion de déchets, leurs définitions, leurs types et leur recyclage. La deuxième partie est la définition d'un béton compacté au rouleau et son domaine d'utilisation. Et comme troisième partie on a détaillé le mode de fonctionnement du logiciel René – LCPC.

I.1.1. Notion de déchets

I.1.2.Introduction

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer son traitement. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».

L'approche globale du déchet permettra de définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir. Dans cette partie, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchets et les principales techniques de traitement ou d'élimination à travers le monde ; ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans les différents domaines.

I.1.3.Définition

La notion de déchets peut être définie de différentes manières selon le domaine et l'intérêt d'étude et parfois l'origine et l'état du déchet.

Parmi les nombreuses définitions existantes, nous pouvons mentionner celles qui nous paraissent les plus intéressantes **[1]** :

- Le déchet est un résidu abandonné par son propriétaire, car inutilisable, sale ou encombrant ;
- Considéré comme déchet, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destiné à l'abandon ;

- Les déchets sont des résidus de l'emploi de matières solides qui peuvent être putrescibles ou non putrescibles ;
- Les déchets sont des matières normalement solides ou semi-solides résultant des activités humaines et animales qui sont indésirables ou dangereuses.

La Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit :

« **Déchets :** tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ».

I.1.4. Différents types de déchets

I.1.4.1. Déchets ultimes

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

I.1.4.2. Déchets inertes

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux.

I.1.4.3. Déchets assimilés

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants).

I.1.4.4. Déchets verts

Déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages…).

I.1.4.5. Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : bio déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères).

Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts) ;
- déchets organiques de la cuisine, boues (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.… ;

I.1.4.6. Déchets industriels banals (DIB)

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

I.1.4.7. Déchets dangereux

A. Déchets industriels spéciaux (DIS)

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.…

B. Déchets ménagers spéciaux (DMS)

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage.

- Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé **[2].**

I.1.4.8.Déchets routier

Les déchets routiers sont les déchets produits par les activités d'entretien et d'exploitation des chaussées et de leurs dépendances. La typologie et nature au sens des lois et normes existantes sont donc très variables selon l'activité considérée **[3].**

En matière de classification des déchets, le décret n° 2002-540 du 18 avril 2002**[4]** reprend la liste communautaire des déchets et en établit, dans son annexe II **[4],** une liste unique. L'annexe I **[4]** de ce décret fixe les propriétés qui rendent les déchets dangereux. Cependant, bien que le droit communautaire ne connaisse que la distinction entre déchets dangereux et non dangereux, la notion de Déchets Industriels Spéciaux (DIS) demeure dans l'actuel code de l'environnement.

I.1.5.Qualification des déchets liés à la route

La qualification générale des déchets routiers est identique à celle des déchets de chantiers de BTP **[5]** :

I.1.5.1.Les déchets inertes : sols, matériaux meubles, intervenant dans la constitution des corps de chaussée et des couches de forme (matériaux naturels, reconstitués ou stabilisés aux liants hydrauliques) ou supports de ces derniers ; sols de terrassements, résidus de béton (démolition d'ouvrages ou de parties d'ouvrages, ou rebuts de production).

I.1.5.2.Les déchets industriels banals : provenant des couches de roulement ou de liaison ou du corps de chaussée, traitées aux liants hydrocarbonés (bitumes purs ou fluidifiés, émulsions de bitume).

I.1.5.3.Les déchets industriels spéciaux : ils proviennent essentiellement de matériaux enrobés de goudron. On note que parfois (cas des travaux neufs), quelques déchets non classiquement routiers, de type accidentel ou spécifique peuvent se rencontrer :

- Boues de tunneliers (marinage par voie humide) et boues de forage ;
- Dépotoirs sauvages d'ordures ménagères ;

- DIB de type industriel : ferrailles (profilés de blindages, ossatures de coffrages, chutes d'armatures), aluminium, emballages divers (bois, polystyrène, plastiques, amiante).

I.1.6. Recyclage des déchets

I.1.6.1. Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés **[2]**.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets ;
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage ;
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

I.1.6.2.Les types des déchets recyclés

A. Travaux publics : des matériaux recyclés au service des chantiers routiers et VRD. Les déblais inertes sont reçus sur site, contrôlés, triés puis recyclés. De la fraction valorisable des déblais, naît le "granulat recyclé", sous la forme de sables, gravillons, graves et cailloux.

B. Bâtiment : des matériaux recyclés pour les applications bétons. Le granulat recyclé est issu de la déconstruction des ouvrages en béton pour être ensuite réintroduit dans la filière béton. L'utilisation des matériaux recyclés dans ce domaine est très réglementée et fait l'objet d'études approfondies et de projets de recherche en cours. L'offre aggneo TM bâtiment est actuellement en tests **[6]**.

I.1.6.3.Les matériaux bitumineux recyclés

A. Origine

Les agrégats d'enrobés sont des mélanges de granulats, de liant bitumineux et quelquefois d'additifs, voire de déchets. Lorsque la traçabilité des anciens chantiers permet de situer les zones dites « à risques » contenant des composants répertoriés dangereux, il est fortement conseillé de procéder à une déconstruction sélective et à un tri préalable destinés à orienter les agrégats vers les destinations adaptées. Ceci correspond par ailleurs aux orientations rappelées dans la circulaire interministérielle du 15 février 2000 **[7].**

Les agrégats d'enrobés proviennent essentiellement de trois origines :



Figure I.1 : Stockage de fraisât de provenance unique avant conditionnement.

Les matériaux de provenance unique sont typiquement issus de grands chantiers, susceptibles de fournir plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de tonnes. Ces fraisât, obtenus par un fraisage respectant des consignes de travail définies à l'aide d'une planche de référence, présentent une homogénéité convenable et leur composition d'origine est souvent connue. Ils constituent, selon la norme XF P 98-135, des agrégats d'enrobés de classe (a) et sont recyclables en l'état (figure I.1).

Les matériaux de provenances diverses stockés de façon individualisée sont issus de chantiers de moyenne importance, et stockés en fonction de la provenance de l'enrobé. Obtenus essentiellement sous la forme de fraisât, ces agrégats d'enrobés de classe (b) nécessitent généralement un conditionnement destiné à les homogénéiser avant réutilisation. Envisagé dans le contexte de la norme 98-135 dans l'hypothèse d'un tri préalable, ce cas n'est actuellement pas représenté sur le territoire national.

Les autres matériaux de provenances diverses regroupent les enrobés issus de la déconstruction de chaussées (fraisât et croûtes), les fonds de camion et les surplus de centrale d'enrobage. Ces agrégats d'enrobés, de classe (c), sont souvent hétérogènes et subissent un conditionnement pour réduire leur dimension maximale et les homogénéiser (figure I.1).

B. Elaboration

Dans le cas d'une mise en stock de mélanges bitumineux de provenances diverses, l'élaboration d'agrégats d'enrobés conformes à la réutilisation comprend les phases de stockage des mélanges, de reprise des mélanges sur stocks, de conditionnement et de stockage des agrégats prêts à être réutilisés. Il existe donc deux types de stockage, avant et après conditionnement **[8].**

C. Stockage

Le stockage (avant et après conditionnement) dont il est question ici est la mise en stock temporaire d'un produit destiné à être réutilisé, et non la mise en décharge.

Deux types de considérations sont à prendre en compte pour le stockage des agrégats :

C.1.Considérations environnementales

- Selon la nouvelle classification des déchets, les agrégats sans goudron sont des déchets non dangereux (classification 17 03 02) **[9]**.
- Selon le guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes les agrégats d'enrobés bitumineux, sans goudron, sont considérés comme admissibles dans la catégorie des déchets inertes **[10]**.

C.2.Considérations pratiques

La mise en conformité d'agrégats de provenances diverses comprend trois parties : les stockages successifs des différents enrobés à recycler, la reprise dans le stock ainsi constitué et le conditionnement de ces agrégats repris. Ces trois opérations sont menées dans l'optique de favoriser l'homogénéité des agrégats d'enrobés. A cet effet, un stockage par couches horizontales des différents approvisionnements, suivi d'une reprise par tranches verticales, permet de prélever avant conditionnement une quantité d'agrégats la plus représentative possible du stock total.

Après conditionnement par concassage, criblage ou fraisage avant réutilisation immédiate, les agrégats d'enrobés ne doivent pas être stockés sur une hauteur importante (supérieure à 3m), et la durée de stockage doit être limitée (inférieure à une semaine en période d'été), afin d'éviter la prise en bloc du matériau **[10]**.

C.3.Conditionnement

Le conditionnement des agrégats est fonction de la réutilisation envisagée, avec des contraintes en matière d'études préalables imposées par la technique de réutilisation **[9].**

C.4.Pour le recyclage en centrale à chaud

Le conditionnement des agrégats d'enrobés est généralement nécessaire pour les agrégats de classe b et impératif pour les agrégats de classe c. Il consiste à réduire la taille maximale des matériaux et à pratiquer une homogénéisation des agrégats.

Ce conditionnement, réalisé par concassage - criblage, conduit à constituer des stocks temporaires d'agrégats dont la granularité dépend du type de formulation envisagée (béton bitumineux ou grave bitume).

Selon les disponibilités en matière de surface de stockage individualisé, on trouve des stocks de type 0/6, 0/10, 0/12,5 mm destiné à être utilisé dans une formulation bien spécifique (béton bitumineux) ou un stock général destiné à la fabrication de grave bitume.

Les étapes successives d'un conditionnement sous la forme d'agrégats 0/10mm sont représentées sur les figures (I.2) et (I.3). Dans tous les cas, il reste des refus au

criblage réalisé, qui sont destinés aux techniques autres que celle du recyclage à chaud en centrale (figure I.3) **[10]**.



Figure I. 2 : Stock d'agrégats avant conditionnement et reprise par pelle mécanique avant concassage.



Figure I.3 : Stock d'agrégats 0 / (10-12,5) mm après concassage – criblage.

C.5.Pour le retraitement à froid en centrale

Les agrégats de classe b et c font l'objet d'un passage préalable dans une installation de concassage - criblage qui permet d'obtenir la granularité adaptée à l'utilisation ultérieure : 0/20, 0/31,5mm…**[11]**.

C.6.Pour le retraitement en place à froid ou le recyclage en place à chaud

Lorsqu'il s'agit d'une réutilisation en place, le conditionnement est effectué par fragmentation lors de l'opération de reprise des agrégats d'enrobés. Les documents de référence sont le guide technique de retraitement à froid des anciennes chaussées et le document CFTR à paraître sur le retraitement des chaussées et le recyclage des matériaux bitumineux de chaussée**[12]**.

C.7.Pour la réutilisation en remblais et couches de forme

La réutilisation en terrassements est subordonnée au classement des agrégats d'enrobés, par la taille maximale de ces agrégats et par la connaissance de leurs

caractéristiques géotechniques. Les documents de référence sont la norme NF P 11-300 et le guide technique de réalisation des remblais et couches de forme (GTR) **[13]**.

- La figure(I.4) synthétise les différentes techniques proposées en matière de réutilisation des agrégats d'enrobés **[14]**.

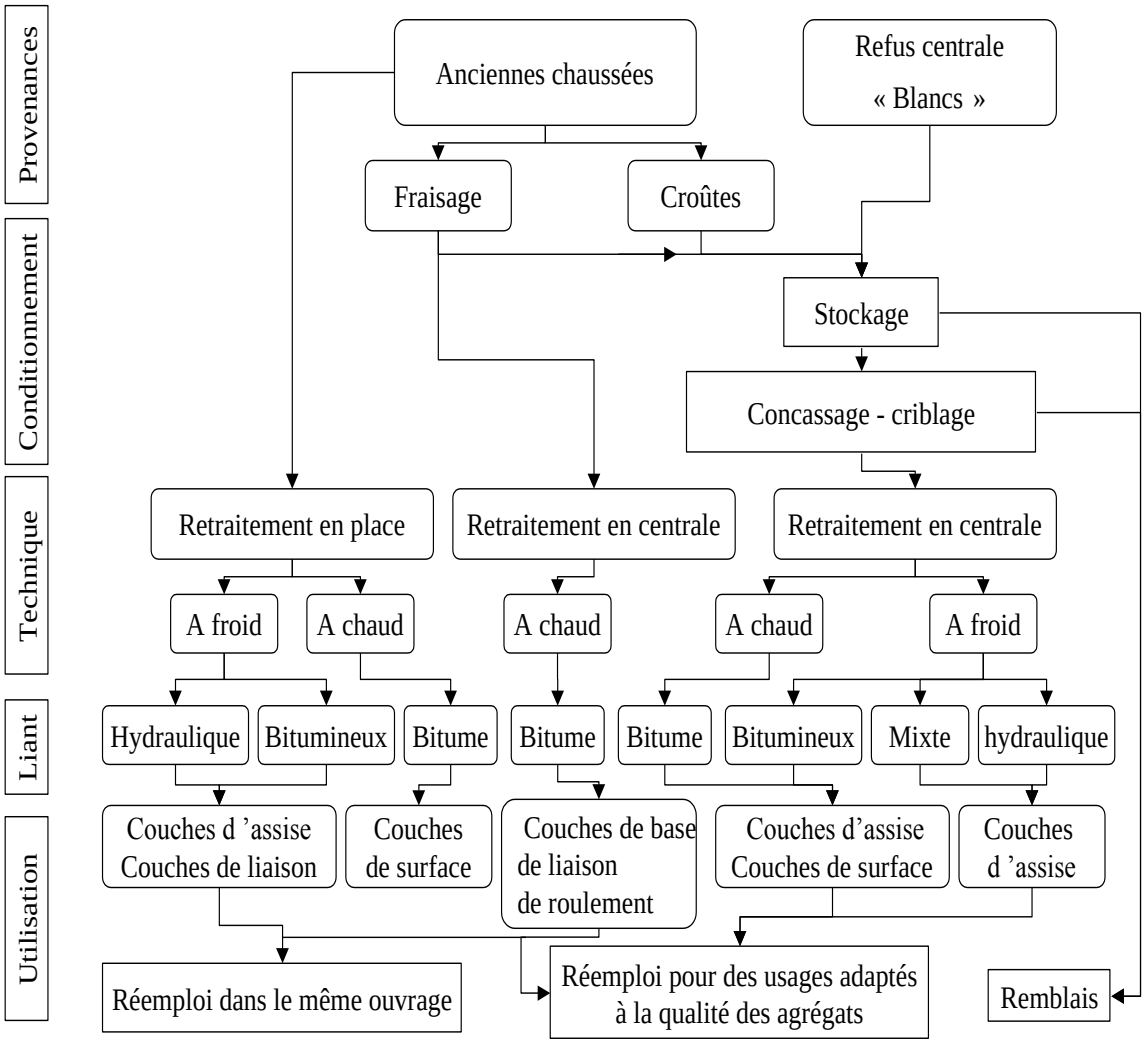


Figure I.4 : Réutilisation des agrégats d'enrobés **[14]**.

I.1.6.4. Définition et Réglementation des matériaux hydrocarbonés

A. Définitions générales

A.1.L'enrobé

L'enrobé est un granulat recouvert de bitume, utilisé dans les revêtements de chaussées. Il peut être constitué d'une ou plusieurs couches de béton bitumineux (mono à tri-couche) **[15]**.

A.2.Le revêtement

Le revêtement consiste en une couche imperméable liée, soit en enrobé bitumineux, soit en béton.

A.3.Les déchets bitumineux

Le terme générique « déchets bitumineux » est consacré pour désigner les déchets de démolition routière parmi lesquels se trouvent des enrobés, revêtements et liants hydrocarbonés, les fraisât et les croûtes.

A.4.Les liants hydrocarbonés

Ce sont des matériaux constitués essentiellement d'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides telles que les granulats, développent des forces d'adhésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances aux déformations en traction, compression et cisaillement [USIRF, 2001].

Il existe trois grandes familles de liants hydrocarbonés : les asphaltes et bitumes naturels, les goudrons, et le bitume de pétrole.

B. Documents réglementaires

On ne dispose pas de réglementation particulière aux déchets routiers. Leur gestion et leur élimination doivent être réalisées en respectant la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 **[16]** relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. Cette loi a été complétée et modifiée par **[17]** :

- la loi n° 92-646 du 13 juillet 1992**,** relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement ;
- et par la loi n° 95-101 du 2 février 1995 dite loi Barnier relative à la protection de l'environnement, cet ensemble de lois s'impose aux acteurs de la chaîne de production et d'élimination des déchets **[18]**.

Par ailleurs, la mise en œuvre des objectifs de la loi du 13 juillet 1992 impose de recycler et de valoriser au maximum les matériaux, déchets ou sous-produits issus de l'ensemble des secteurs d'activités industriels dans le respect des exigences technologiques, environnementales et de santé publique. Seuls les déchets non valorisables seront éliminés, après traitement si nécessaire, la mise en décharge étant limitée aux seuls *déchets ultimes* dès le 1er juillet 2002.

La particularité des déchets routiers est traitée dans deux circulaires de portée plus spécifique, précisées ci-après Circulaire 2000- du 15 Février 2000 dite : « Déchets du BTP » relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics **[17]**, Circulaire n°2001-39 du 18 Juin 2001 relative à la gestion des déchets dans le cadre du réseau routier national **[19].**

Dans le cas des déchets dits « routiers », le maître d'ouvrage de l'infrastructure concernée est responsable de ces déchets produits et doit en assurer l'élimination dans les conditions réglementaires en vigueur. Les éléments constituant les équipements de la route répondent aux prescriptions définies dans l'arrêté du 31 juillet 2002.Notamment, l'article 5 de cet arrêté intitulé « Nature, modèle et homologation des signaux, produits ou dispositifs destinés à la signalisation », précise que **[20]** :

« Pour s'assurer des garanties de divers ordres et en particulier pour obtenir la conformité aux normes réglementaires des signaux, produits ou dispositifs de signalisation routière, des arrêtés du ministre de l'équipement déterminent ceux qui sont soumis à homologation et les conditions dans lesquelles celle-ci est accordée. Tous les autres matériels de signalisation non soumis à homologation doivent avoir reçu un avis favorable à l'emploi. Les conditions dans lesquelles sont émis ces avis sont fixées par le ministre de l'équipement ».

I.1.6.5. Terminologie et identification des déchets

Les déchets sont définis comme la fraction pierreuse et sableuse des déchets provenant de la construction, de la rénovation ou de la démolition de bâtiments et d'ouvrages d'art ou de routes ou d'autres installations. On distingue **[21]** :

- Débris de béton

Proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil;

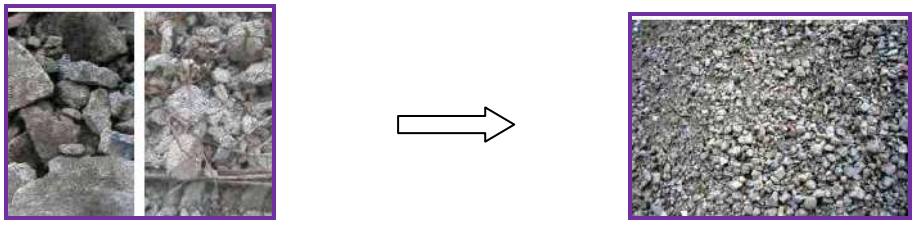


Figure I.5 : representation de déchet de béton avant et aprés concassage.

- Débris de maçonnerie

Proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments ;

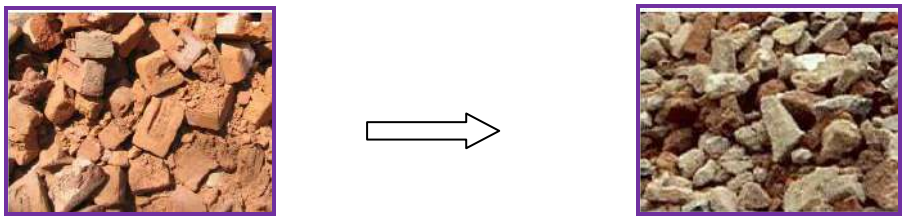


Figure I.6: representation de dechet de maçonnerie avant et aprés concassage.

- Débris mixtes de béton et de maçonnerie

Proviennent de la construction / rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles…) ;

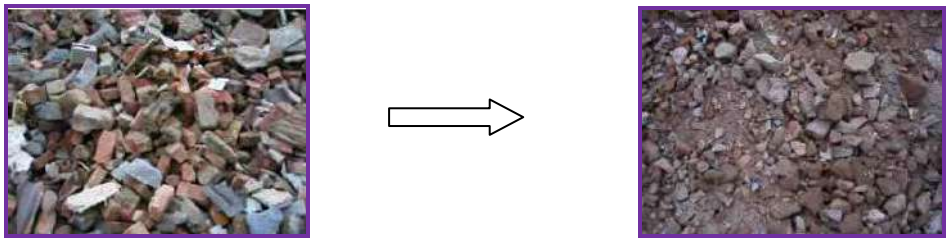


Figure I.7 : representation de dechet de béton et de maçonnerie avant et aprés concassage.

- Débris d'enrobés hydrocarbonés (bitumineux ou contenant des goudrons)

Proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes…), de la démolition de parkings ;

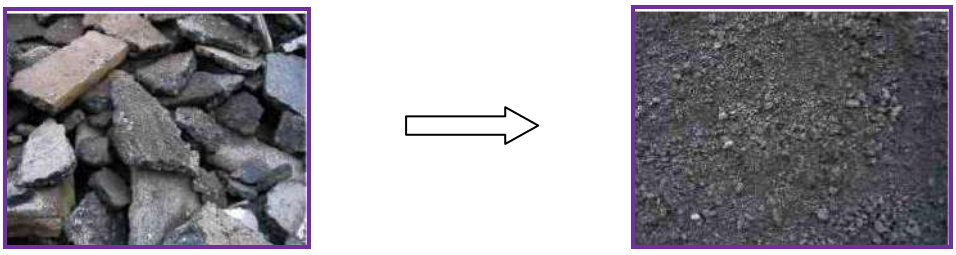


Figure I.8 : representation de dechet d'enrobés hydrocarbonés avant et aprés concassage.

Les déchets de construction et de démolition se composent pour près de 95% de ces débris. La majeure partie peut être d'autant mieux valorisée qu'elle contient peu d'impuretés et ne doit donc pas être mise en décharge. Les 'débris' deviennent 'granulats recyclés' après tri et concassage.

I.1.6.6. L'utilisation des granulats issus de recyclage

Le tableau de synthèse ci-après présente, les différentes sources de granulats et leur utilisation sur le marché. [21]

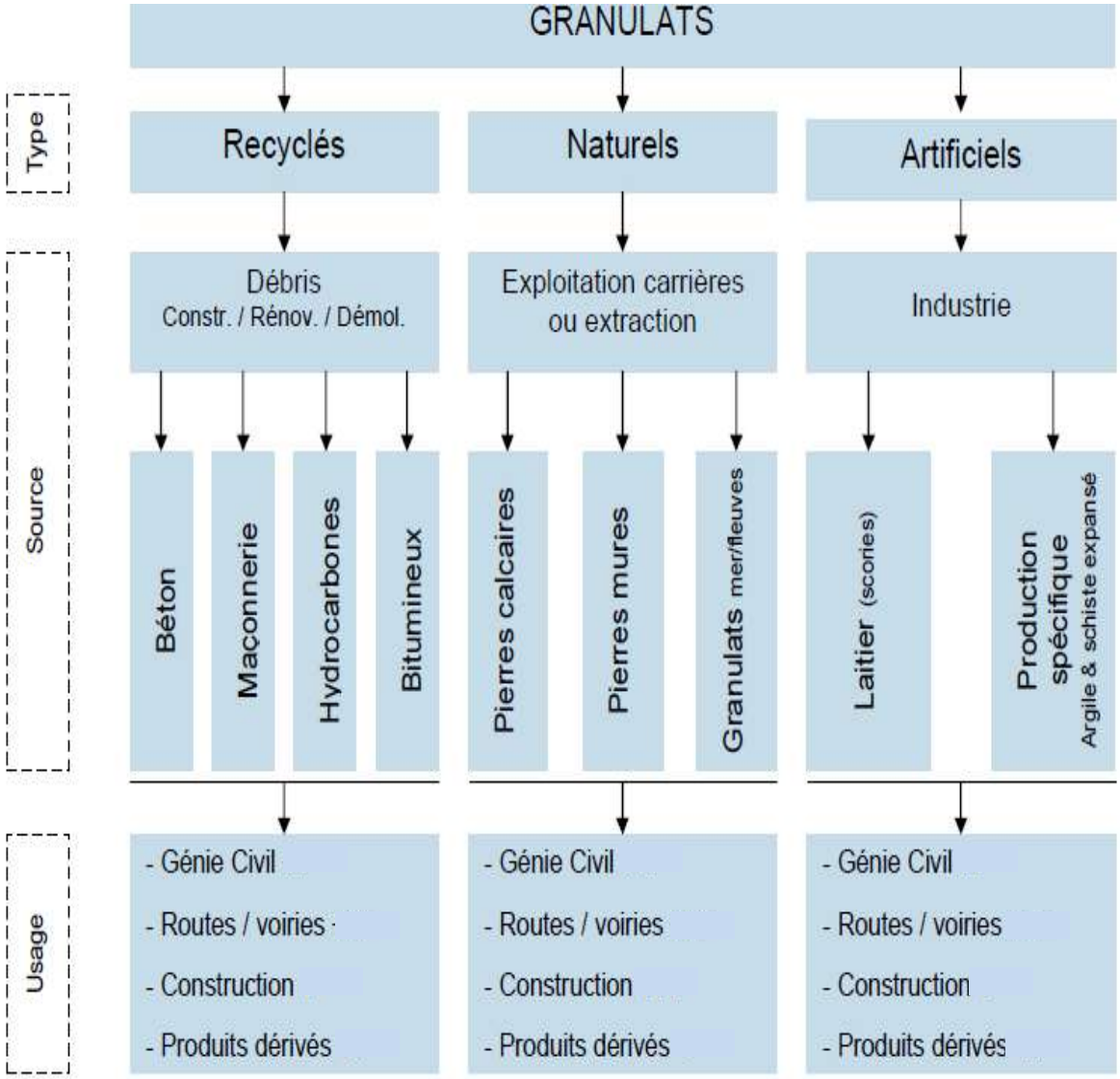


Figure I.9 : Synthèse des origines et définition des usages **[21]**

I.1.6.7. Matériaux de recyclage autorisé

Parmi les matériaux recyclés autorisé pour la construction sont:

A. Remblais

- Sables de criblage de débris ;
- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés de débris de maçonnerie ;
- Concassés mixtes (débris de béton et maçonnerie) ;
- Concassés de débris d'enrobés Hydrocarbonés ;

B. Sous-fondation

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés mixtes (débris de béton et maçonnerie) ;
- Concassés de débris d'enrobés Hydrocarbonés.

C. Fondation et empierrement

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton (ρ>1950 kg/m³).

D. Fondation en empierrement stabilisé au ciment

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés de débris d'enrobés Hydrocarbonés.

E. Béton maigres

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris de béton ;
- Concassés mixtes (débris de béton et Maçonnerie).

F. Revêtements de chaussées en enrobes bitumineux

- Sables de concassage de débris ;
- Concassés de débris d'enrobés Bitumineux.

G. Pavages

- Sablage de concassage de débris.

I.1.7.Conclusion

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans cette recherche on s'intéresse aux déchets de béton bitumineux pour l'utiliser en tant que granulats pour un nouveau béton compacté au rouleau toute en respectant certains critères.

I.2. Le Béton Compacté au Rouleau (BCR)

I.2.1. Introduction

Le béton compacter au rouleau tien son nom de la technique employer pour le maitre en place. Il est en effet épandu au moyen de matériel pour terrassement (chargeur, bull, pousseur, niveleuse) puis compacté par des rouleaux vibrants.

Le béton compacte au rouleau réunis les même constituant de base que le béton classique : ciment eau et granulats. Toute fois le BCR est un béton plus sec à affaissement nul qui nécessite la forme d'une énergie de compactage externe plus importante pour être correctement consolider. En effet à cause de son état sec le BCR ne peut être mis en place à l'aide d'aiguille vibrante utiliser pour les bétons ordinaires.

I.2.2. Historique

La première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord a été réalisée en 1942 par l'US Army Corps of Engineers **[22]**.

- Le B.C.R., en anglais R.C.C. (Rolled Compacted Concrete) et sa variante japonaise R.C.D. (Rolled Concrete in Dam) sont issus d'évolutions amorcées ponctuellement dans les années 1960 en Italie et au Canada, la première réalisation en grande masse concernant la réparation de l'évacuateur de crues de Tarbela (Pakistan).
- Le développement de cette technique s'accélère au début des années 80 avec la réalisation des premiers grands barrages au Japon d'abord, aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne ensuite **[23]** ;
- La technique japonaise (R.C.D.) utilise un matériau très proche des bétons classiques et une réalisation de barrages poids à plots indépendants équipés de joints de dilatation alors que la technique américaine (R.C.C.) emploie un béton maigre et une construction de barrage sans joint. C'est cette dernière technique qui s'est le plus largement répandue, en particulier en Australie, en Afrique du Sud, en Espagne et en France ;
- Fin 1988, une trentaine de barrages de plus de 20 m de hauteur étaient construits en B.C.R. à travers le monde (dont 20 achevés en 1987 et 1988). En outre, le B.C.R. est maintenant fréquemment utilisé pour la construction de batardeaux ou en fondation d'ouvrages.

- En France, le barrage des Olivettes dans le département de l'Hérault a été achevé en décembre 1987 et constitue la première réalisation importante en B.C.R. avec une hauteur de 36 m et un volume de béton de 80 000 m3 (cf. V). Il a été précédé par la construction d'une petite digue à Saint-Martin-de-Londres, également dans l'Hérault et du batardeau du barrage de Pont-de Veyrière en Ardèche. température provoquée par la prise du béton et limite le retrait thermique.

Tableau I.1: Principales caractéristiques d'un BCR pour barrage et d'un BCR pour chaussée **[24]**.

Caractéristiques	Barrage	Chaussée
Teneur en liant (kg/m^3)	60-250	200-350
Rapport eau/liant	0,40-0,80	0,30-0,40
Diamètre maximal des granulats (mm)	75	20
Résistance à la compression 28 j (MPa)	15	45
Temps Vebe (s)	10-25	30-60

I.2.3. Les avantages du BCR

I.2.3.1. La durabilité: L'un des avantages les mieux connus du béton est sa durabilité. Cette durabilité mène à une réduction des travaux de construction et d'entretien qui entravent la circulation **[25]** ;

I.2.3.2. Moins de travaux d'entretien: ERES indique en outre dans son rapport que les routes asphaltées exigent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contraste, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton qu'après 12 ans ;

I.2.3.3. Moins de déformation: Vu la souplesse du revêtement en asphalte, les véhicules de fort tonnage peuvent finir par y creuser des ornières. La poussée qu'ils exercent sur le revêtement peut aussi, à long terme, le faire plisser et lui donner l'apparence d'une tôle ondulée. La rigidité du béton empêche toutefois ce genre de déformations de se produire. D'autre part le béton ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur Une meilleure adhérence: Les études ont démontré que le béton assure, dans l'ensemble, une meilleure adhérence et une distance d'arrêt plus courte que l'asphalte, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.

I.2.3.4. Des économies de carburant (jusqu'à 20 %): La chaussée souple fléchit davantage que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à supposer qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple. La rigidité de la chaussée en béton réduit la déflexion et diminue ainsi la consommation de carburant ;

I.2.3.5. Une meilleure visibilité la nuit*:* La chaussée en BCR assure une meilleure visibilité la nuit. Comme le béton est de couleur claire, il réfléchit mieux la lumière des phares et des lampadaires que l'asphalte, qui est foncé. Autrement dit, il y a plus de lumière visible.

Le procédé du BCR présente des avantages pour la construction de surfaces de trafic ou de dépôt relativement vastes, que l'on réalise en plusieurs bandes accolées.

Des surfaces construites selon cette technique offrent une bonne résistance au jeune âge et peuvent être mises en service relativement tôt. On peut aussi construire en BCR des sols industriels à l'intérieur de halles si celles-ci comprennent de grands espaces sans piliers **[26]**.

I.2.4. Inconvénients

Les inconvénients du BCR sont résumés aussi dans les points suivants :

- La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être adaptés selon les différents types d'applications visées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique. La texture de la surface d'un revêtement est mesurée à l'aide de l'essai de tache de sable. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macro texture de la surface (ASTM E 965). Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, le texturomètre et la stéréoscopie ;
- L'uni d'une chaussée est exprimé par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a resté toujours un problème limitant relativement les applications du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante.

L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage **[25].**

I.2.5. Mise en place du BCR

I.2.5.1. Conditions météorologiques

Il est interdit de mettre en œuvre le béton si la probabilité de précipitation est supérieure à 50 %. En cas de pluie, interrompre la mise en œuvre, compléter le plus rapidement possible le compactage du béton déjà mis en place, et protéger les surfaces fraîchement compactées contre la pluie. La température ambiante doit être supérieure à 5°C durant les 24 heures suivant l'exécution **[27].**

I.2.5.2. Préparation de l'infrastructure

Il s'agira, dans un premier temps, de compacter la fondation granulaire à au moins 95% de la masse volumique de l'essai Proctor modifié.

Après nivellement pour avoir un profil plan, uniforme et lisse, il faudra humidifier la surface de la fondation granulaire immédiatement avant la mise en place du béton.



Figure I.10 : préparation du l'infrastructure.

Cependant, l'excès d'eau est à éviter; en effet, la partie inférieure du revêtement en BCR est la zone la plus sollicitée par les charges, c'est-à-dire que les contraintes de flexion y sont plus élevées. Donc un apport d'eau provenant de la fondation dans cette partie critique du revêtement augmenterait localement le rapport E/C et diminuerait par conséquent la résistance mécanique du BCR.

C'est ainsi que les zones humides de la fondation granulaire doivent être excavées et remplacées par du nouveau matériau granulaire. Le cas échéant, un drainage adéquat est requis.

I.2.5.3. Réglage

La mise en place du BCR se fait de préférence au moyen d'un finisseur équipé d'une poutre à haut pouvoir de compactage et d'un dispositif de nivellement automatique. On pourrait utiliser les finisseurs conventionnels comme ceux utilisés pour le répandage des enrobés bitumineux, mais le degré de pré-compactage du BCR serait plus faible dans ce cas.

Lors de la construction, il est primordial de mettre en place le BCR de façon continue afin d'éviter les joints froids tant horizontaux que verticaux. Par ailleurs, l'ACI recommande qu'il y ait un intervalle maximum d'une heure entre la mise en place de deux couches successives. D'autre part, il est recommandé de corriger les irrégularités ou inégalités de répandage à l'aide de raclettes.



Figure I.11 : Réglage de la couche du BCR à l'aide d'un finisseur.

I.2.5.4. Compactage du BCR

A. Généralités

Les BCR se distinguent des bétons ordinaires par leur affaissement nul, leur proportion importante de granulats et leur faible teneur en liant. Ainsi, ce type de matériau, ayant une apparence sèche et raide, sa densification requiert quelques passages d'un rouleau compacteur.

Toutes les propriétés du BCR à l'état durci, notamment la résistance en compression et celle en flexion, sont étroitement liées au degré de compactage. En effet, si le compactage est insuffisant, il subsistera des vides entre les granulats, qui agissent comme des points de faiblesse et provoqueront une diminution de la résistance en compression.

Généralement, le degré minimal de compactage à respecter est de 97 % de l'optimum Proctor modifié.

B. Opération

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

A défaut d'un compacteur à pneus, on peut donner quelques passes finales du compacteur à rouleau sans vibration pour fermer la surface. Le compactage des bords est aussi une question délicate. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les épauler avec des matériaux stables placés à l'avance, comme par exemple les bordures en zone urbaine; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produisent. Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale **[27]**.



Figure I.12 : Compactage du BCR

I.2.6. Constituants

Les trois composants de base d'un béton compacté au rouleau sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physicochimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes **[28]**.

Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

I.2.6.1. Les liants

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

Les propriétés nécessaires des liants hydrauliques utilisés pour le BCR sont principalement **[29]:**

- Une faible chaleur d'hydratation ;
- Une prise retardée ou un temps de prise assez long ;
- Le pourcentage C3A doit être limité pour garantir une bonne durabilité et éviter la dégradation ;
- Une bonne résistance aux sulfates car l'eau peut contenir des agents agressifs.

Plusieurs types de liants ont été utilisés pour le BCR, on trouve principalement :

- Un ciment du même type que ceux utilisés pour le BC,

- le ciment avec des additions en quantité souvent importante de cendres volantes (principalement), de laitier moulu ou de pouzzolanes,

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

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

I.2.6.2. Les granulats

Les granulats sont définis par la norme (NF P18-101) comme étant l'ensemble de grains minéraux, désignés par les termes fins, sables, gravillons ou cailloux et de dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Baron et Olivier ont indiqué que les granulats représentent un constituant essentiel et un élément permanent des mélanges de BCR qui conditionne à la fois ces caractéristiques et son coût. Ils constituent aussi le squelette de ce matériau et représentent les 4/5 du poids du mélange. Ils sont peu déformables et ils améliorent les résistances du mélange en s'opposant à la propagation des microfissures provoquées par le retrait selon Saadi **[28].**

Les granulats employés dans la formulation de BCR proviennent des carrières de roches calcaires. Ces granulats interviennent généralement pour les BC avec un pourcentage de 75% du volume total du mélange solide. Par contre, pour le BCR les granulats représentent une proportion comprise entre 75 et 85% du volume total du mélange solide. Leurs influences sur le BCR à court et à long terme sont remarquables.

I.2.6.3. Eau

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment **[28].**

Pour les mélanges de béton compacté an rouleau, la quantité d'eau requise dépend de l'optimum de compacité. Afin de déterminer la quantité d'eau à ajouter au mélange, on réalise des essais Proctor modifié. Ces essais sont décrits à la section suivante. Un béton ayant une trop faible quantité d'eau nécessite une énergie de compactage élevée afin d'obtenir de bonnes densités. A l'opposé, un mélange ayant une trop grande quantité d'eau sera difficile à compacter car celui-ci sera trop fluide.

I.2.7. Intérêt du B.C.R. et domaines d'utilisation

I.2.7.1. Intérêt économique

On considère en général que le coût du m^3 de BCR mis en œuvre dans un barrage poids est en moyenne deux fois inférieur à celui d'un béton classique (non compris des traitements particuliers entre couches). Cette proportion tend à augmenter avec les quantités mises en œuvre. Mais ce rapport est évidemment moins élevé si l'on considère l'ensemble de l'ouvrage incluant le traitement de la fondation, le déversoir et les ouvrages annexes.

La comparaison entre le barrage poids classique et le barrage poids en BCR est facilitée par un certain nombre de constantes entre ces deux solutions : provenance souvent identique des matériaux ; travaux de fondation semblables ; déversoir identique ; profils voisins.

Par contre la comparaison avec d'autres solutions telles que barrages en terre ou en enrochements, à zones ou à masques, nécessite une étude approfondie de la qualité, de la quantité et de la provenance des matériaux, ainsi que des conditions de fondation.

Les ouvrages récents réalisés en BCR ont souvent fait apparaître que l'adoption de ce procédé permet d'espérer une économie globale de 10 à 20 % par rapport à des solutions terre ou enrochements, pour autant que les fondations soient favorables à la réalisation d'un barrage poids.

I.2.7.2. Intérêt du point de vue des délais de réalisation

Un des atouts majeurs du BCR est de permettre des cadences élevées pour la réalisation du barrage, le facteur limitant étant en général la centrale à béton. On atteint couramment des rythmes d'élévation de l'ouvrage de 1 m par jour. Cet atout peut donc s'avérer primordial dans certains cas de contraintes climatiques particulières ou de périodes d'étiage courtes. De plus l'expérience a montré que les barrages en BCR pouvaient, sans grands dommages, supporter un déversement en cas de crue importante survenant pendant la construction **[23].**

I.2.8. La cure d'un BCR

La cure garantit un revêtement robuste et durable. Comme dans le cas des autres bétons, elle assure l'humidité nécessaire à l'hydratation, cette réaction chimique qui fait durcir le béton et lui donne sa résistance. Un système arrose le béton pour le garder humide. On peut aussi recouvrir le revêtement d'une membrane d'étanchéité pulvérisable pour y sceller l'humidité.



Figure I.13 : Bâche de protection contre la pluie. **[30]**

Quand l'apparence de la chaussée est une considération importante, on peut exécuter des traits de scie dans la surface du revêtement en béton compacté pour exercer un certain contrôle sur la fissuration. Si le coût l'emporte sur l'apparence, on laisse le béton se fissurer naturellement. Une fois le béton durci **[30],** La cure par arrosage d'eau doit durer au moins trois jours [26], et la chaussée peut être ouverte à la circulation. Toute circulation de moins de 3,5 t est permise immédiatement après la fin de la mise en œuvre.



Figure I.14 : Cure du béton par arrosages ciblés. **[30]**

La circulation lourde est interdite pendant les 5 jours qui suivent la mise en œuvre **[31].** On applique parfois une couche d'asphalte pour rendre la surface plus égale ou accroître la qualité du roulement sur les voies de circulation à grande vitesse **[30].**

I.2.9. Méthodes de formulation d'un BCR

Les méthodes de formulation des BCR peuvent être classées en trois catégories distinctes : méthode empirique, méthode semi-empirique et méthode théorique.

I.2.9.1. Méthodes empiriques

Les premières méthodes qui ont été utilisées pour formuler des mélanges de BCR sont des procédures dites empiriques. Elles demandent la réalisation d'un certain nombre de gâchées en laboratoire avant d'obtenir le mélange de BCR ayant les caractéristiques voulues. Dans certains cas, plus de 25 gâchées d'essais sont requises pour obtenir un mélange. De plus, des gâchées sont souvent requises en chantier pour ajuster la maniabilité du mélange. Simples à utiliser et relativement efficaces, ces méthodes ne sont pas très flexibles et demandent beaucoup de temps et d'énergie. Le comité 325.10R-95 de l'American Concrete Institute (ACI) a décrit les méthodes empiriques les plus couramment employées pour formuler des mélanges de BCR. Voici deux de ces méthodes **[32] :**

- formulation respectant certaines limites de maniabilité;
- formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

1.2.9.2. Méthode semi-empirique

Par définition, une méthode semi-empirique est basée à la fois sur des données expérimentales et sur quelques formules empiriques. Un exemple de méthodes semi-empiriques est celui du volume de pâte optimal. Les mélanges de BCR sont formulés en se basant sur un calcul de volume de pâte par rapport à un volume de vides. Cette approche requiert la réalisation de quelques gâchées d'essais en laboratoire **[32].**

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le mélange de BCR optimal devrait avoir juste assez de pâte pour remplir complètement les espaces inter granulaires restants lorsque le squelette granulaire a atteint la densité maximale après compactage.

Cette méthode de formulation est également basée selon une approche volumétrique. Si moins de pâte est utilisée, les vides laissés après le compactage vont réduire les propriétés mécaniques et augmenter la perméabilité du béton. Par contre, une teneur en pâte excessive augmentera la chaleur d'hydratation de même que les coûts de fabrication sans une augmentation significative des propriétés physiques ou une diminution de la perméabilité.

Cette méthode de formulation de BCR comporte trois étapes **[33] :**

1. Déterminer les proportions des différentes classes granulaires afin de produire un mélange après compactage possédant un volume de vides minimal et de mesurer le volume des vides des granulats compactés par mètre cube;
2. Ajuster le dosage volumique de la pâte de manière à obtenir une maniabilité donnée;
3. Choisir le rapport entre l'eau et les matériaux cimentaires et les proportions de ciment et de pouzzolanes pour produire une pâte permettant de satisfaire aux exigences mécaniques.

I.2.9.3. Méthode théorique

L'une des percées majeures dans le domaine de la formulation de mélange de béton a été l'introduction de méthodes théoriques. Ces méthodes permettent de minimiser la porosité (ou maximiser la compacité) du squelette granulaire de mélange de béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, pierre, ciment, ajouts minéraux). Ces méthodes théoriques ont l'avantage de prendre en considération l'influence de plusieurs paramètres sur le béton à l'état frais et durci.

Parmi les méthodes théoriques de prévision de la compacité d'un empilement granulaire, le Modèle d'empilement compressible (appelé anciennement Modèle de suspension solide) développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) s'applique particulièrement bien à la formulation de mélanges de béton de ciment à compacité granulaire optimale**[34,35].**

Ce modèle a été utilisé avec succès pour la formulation de mélange de béton ordinaire, à haute performance et auto nivelant. Cette méthode a par la suite été adaptée par le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval à la formulation de mélange de BCR **[32].**

La performance de cette méthode de formulation a été démontrée à la suite de plusieurs travaux de recherche en laboratoire et de nombreuses réalisations de revêtement en BCR dans l'Est du Canada et aux États-Unis. Basée sur des relations mathématiques, cette méthode est donc programmable. Un logiciel de calcul a d'ailleurs été développé à cet effet.

Ce modèle a été développé pour répondre à différents besoins. Il permet de formuler des mélanges de BCR adaptés aux applications industrielles, où les sollicitations mécaniques sont très importantes. Il produit des mélanges de BCR spécialement adaptés aux applications en milieu urbain, municipal et agricole, où les charges sont généralement plus faibles, en optimisant la teneur en liant. Sa flexibilité rend possible la correction rapide des proportions des constituants lorsque l'approvisionnement en matières premières (ciment, granulats) d'un chantier varie dans le temps. Le nombre de gâchées de laboratoire est réduit au minimum. Dans la grande majorité des cas, une seule gâchée de laboratoire est requise pour ajuster les proportions du mélange. Cette méthode de formulation de mélange de BCR est basée sur l'optimisation de la compacité (par le fait même, de la porosité) d'un empilement de grains de différentes tailles. La combinaison des constituants par cette méthode permet de produire un mélange sec à compacité optimale pour une maniabilité donnée. Ce modèle de compacité rend possible l'obtention d'excellentes propriétés mécaniques à court et à long terme et la réduction de la quantité de liant, d'où une réduction de la fissuration de retrait. La compacité d'un mélange granulaire dépend de la granulométrie des particules, de leur forme et de l'interaction entre les grains.

Les données d'entrée requises pour chacun des constituants (le liant, les ajouts minéraux, les granulats fins et grossiers) sont la granulométrie, la densité et l'indice des vides. N'importe quel type de granulat peut être employé dans cette méthode de formulation à condition de connaître ces informations. Avec le modèle, on détermine alors le rapport optimum entre les granulats fins et grossiers pour une teneur en liant donnée ou pour un rapport eau/liant donné.

Plus spécifiquement, le modèle permet d'évaluer la compacité d'un arrangement de grains de différents diamètres di ($d_1 > d_2 \ldots > d_n$), sur la base de:

- la compacité propre (α_i) de chaque classe granulaire (c'est-à-dire, la compacité d'un arrangement de grains de diamètre similaire di);
- la proportion massique (*yi*) de chaque classe de grains (exprimée en fonction du volume total des solides).

Le modèle de suspension solide est dérivé des travaux de Mooney sur la viscosité de suspensions concentrées de particules solides. Ce modèle s'appuie sur l'hypothèse que la viscosité relative de référence ($n^*_{r,j}$) d'un arrangement de grains consolidé est une valeur finie. La viscosité de référence est définie comme étant l'indice de l'énergie requise pour bien consolider le béton. Plus la technique de mise en place est énergétique, plus la viscosité de référence du béton est grande. Pour un arrangement unimodal de grains de diamètre di, la viscosité de référence peut être calculée par l'équation suivante (1), où β_i représente la compacité virtuelle d'une classe de grains (i).

$$\eta^*_{rj} = \exp\left(\frac{2{,}5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}}\right) \quad \text{.....Equ.I.1}$$

Théoriquement, si l'on prenait un empilement de sphères de même dimension (unimodales) et qu'on les agençait une à une, on devrait atteindre une compacité de 0,74 (compacité virtuelle β_i). Par contre, en pratique, cet arrangement de grains n'est pas réalisable. C'est pourquoi le terme représente une compacité virtuelle. De plus, en pratique, la compacité maximale atteinte pour des sphères unimodales n'est que de 0,64 (compacité réelle α_i). Si on remplace les valeurs de β_i et de α_i dans l'équation 1, la viscosité maximale ($n^*_{r,j}$)d'une classe de particules sphériques est de 136 000. D'après l'équation 1, plus le mélange est serré, plus la viscosité ($n^*_{r,j}$)est élevée étant donné que la compacité réelle (α_i) tend vers la compacité virtuelle (β_i).

En pratique, la compacité réelle de chaque classe granulaire (granulat grossier, granulat fin et matériaux cimentaires) se détermine facilement par une mesure expérimentale.

Pour les matériaux granulaires, la compacité de chaque classe granulaire est déterminée à l'aide de l'appareil Vébé (mesure de l'indice des vides). Pour les matériaux tels que le ciment, les cendres volantes et les fillers, une méthode expérimentale a été mise au point afin de mesurer la compacité. Elle consiste à placer une certaine quantité de matériaux cimentaires dans un malaxeur à mortier. Graduellement, un certain volume d'eau est ajouté au mélange. La valeur de la compacité est atteinte (représentée par le volume d'eau ajouté) lorsque la quantité d'eau est suffisante pour que la pâte passe de l'état sec à plastique. En supposant que la viscosité relative maximale est similaire à celle d'un arrangement de particules sphériques, qui est égale à 136000, la valeur de β_i peut être calculée à partir de l'équation (I.1) pour chaque classe de grains.

Une fois que les valeurs de β_i a été déterminées pour chaque classe de grains, la compacité virtuelle (γ) d'un arrangement de grains de n classes est donnée par :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1}\left[1 - \beta_i + b_{ij}\beta_i\left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right]y_i - \sum_{j=i+1}^{n}\left[1 - a_{ij}\left(\frac{\beta_i}{\beta_j}\right)\right]y_i} \qquad \text{……..Equ.I.2}$$

Comme mentionné précédemment, yi dans l'équation (2) représente la proportion massique de chaque classe de grains. Les valeurs de yi peuvent être déterminées à partir des courbes granulométriques de chaque matériau. Pour les matériaux granulaires, les courbes granulométriques sont obtenues par un tamisage conventionnel. Pour les matériaux inférieurs à 80 μm, la granulométrie est réalisée à l'aide d'une technique au laser.

Le modèle de suspension solide tient compte de l'arrangement des grains de même que des phénomènes reliés à l'effet de desserrement et à l'effet de paroi dans l'équation (I.2). Ces interactions sont prises en compte par les paramètres a_{ij} et b_{ij}. L'effet de desserrement, représenté par le terme a_{ij}, produit lorsqu'un grain n'est pas assez fin pour pouvoir s'insérer dans un vide de l'empilement de plus gros grains, et l'effet de paroi, comme montré à la figure(I.15), se traduit par le relâchement de l'empilement des grains lorsqu'ils se retrouvent à la surface d'un plus gros grain **[36].**

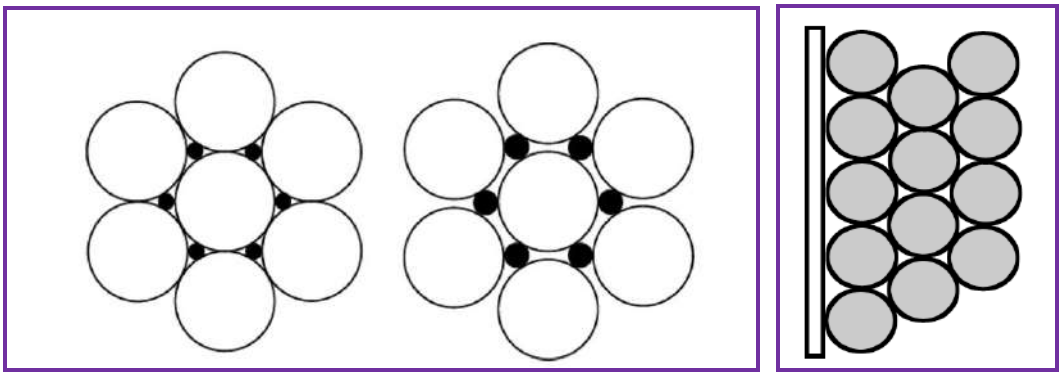


Figure I.15 : Représentation de l'effet de desserrement (gauche) et de l'effet de paroi (droite).

Les coefficients d'interaction a_{ij} et b_{ij} sont facilement déterminés par les équations (I.3) et (I.4) :

$$a_{ij} = \sqrt{\frac{d_j}{d_i}} \qquad \text{.....Equ.I.3}$$

$$b_{ij} = \frac{d_i}{d_j} \qquad \text{.....Equ.I.4}$$

Une fois que la compacité virtuelle (γ) du mélange est connue, on détermine la compacité réelle (C) du mélange à partir de l'équation (I.5) :

$$\eta_r^* = exp\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{2{,}5y_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}}\right) \qquad \text{.....Equ.I.5}$$

La valeur de la viscosité de référence (n^*_r)doit être connue pour utiliser l'équation (I.5). Rappelons que la viscosité de référence dépend de l'énergie nécessaire pour consolider adéquatement le matériau. Pour un béton conventionnel, la notion de viscosité peut être plus ou moins reliée à l'affaissement du béton. Pour un béton mis en place par un simple déversement, la viscosité est de l'ordre de 460, tandis que pour un béton mis en place par vibration, la viscosité est de 2 600. Par contre, l'énergie requise pour mettre en place adéquatement un béton sec comme le BCR est beaucoup plus grande. La viscosité de référence d'un mélange de BCR possédant la maniabilité requise pour être mise en place adéquatement doit être déterminée sur la base d'expériences passées.

La viscosité de référence de mélanges de BCR formulés à l'aide du modèle de suspension solide pour des revêtements est d'une valeur moyenne d'environ 3 000 000 Le modèle de suspension solide s'est avéré fiable pour la formulation de mélange optimum de BCR. Le modèle permet de formuler des mélanges à compacité optimale pour une maniabilité optimale, et ce pour n'importe quel type d'application. Généralement, une seule gâchée d'essai est requise en laboratoire.

Les résultats des nombreuses études expérimentales en laboratoire de même que l'utilisation de ces mélanges en chantier ont montré l'énorme potentiel et la versatilité de cette méthode de formulation. Le modèle de suspension solide permet de recalculer rapidement les proportions optimales d'un mélange de BCR. Cet avantage est très utile en chantier, où la provenance des granulats et/ou du ciment peut changer dans un court laps de temps **[32].**

I.2.10. Rôle et constituants des différentes couches de chaussée

I.2.10.1.Constituants d'une couche de chaussée

Une couche de chaussée est constituée principalement de trois sous couches, la couche de surface, la couche d'assise et la couche de forme **[37].**

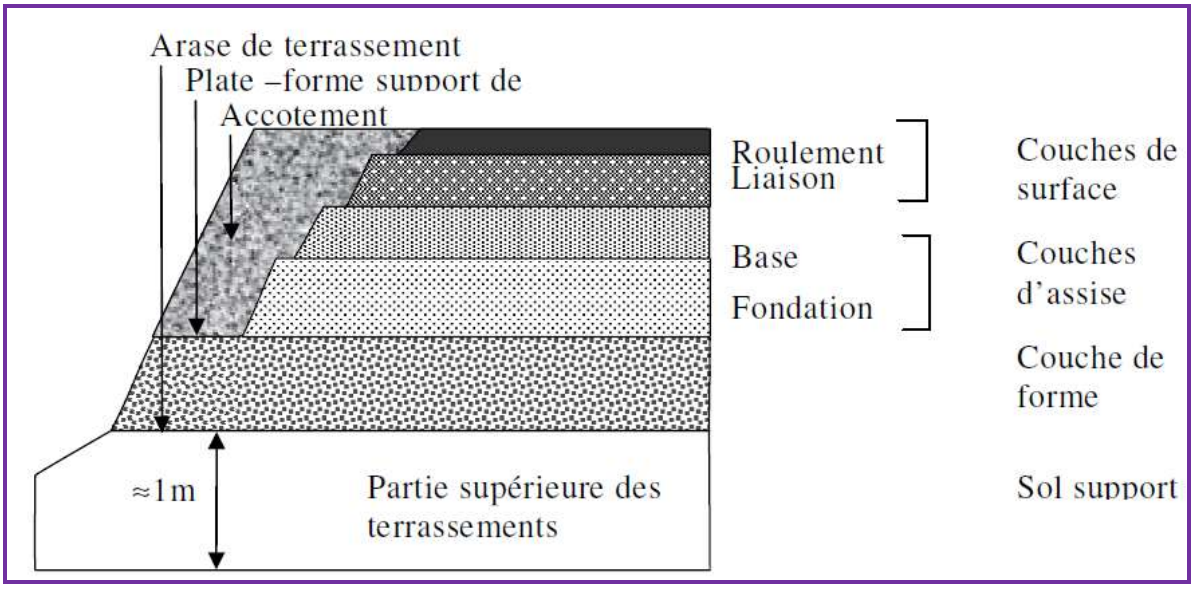


Figure I.16: Les différentes couches d'une chaussée **[37].**

A. Les couches de surface

Elle a aussi généralement une structure bicouche, avec :

- la couche de roulement, qui est la couche supérieur, sur laquelle s'appliquent directement les actions du trafic et du climat ;
- son apport structurel est secondaire (sauf pour les chaussées à assise granulaire, dont la couche de surface est la seule couche liée) : elle est plutôt tributaire de la pérennité de la chaussée et doit satisfaire à quatre objectifs principaux :
- la sécurité et le confort des usagers, qui dépendent directement des caractéristiques de surface ;
- la maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de déverglaçage et des divers polluants susceptibles d'être répandus en surface.
- l'impact sur l'environnement, qui consiste essentiellement en la réduction des bruits de roulement ;
- les possibilités de génération des caractéristiques de surface.

B. Les couches d'assises

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : la couche de fondation et la couche de base. Ces couches apportent à la chaussée la résistance mécanique nécessaire pour reprendre les charges verticales induites par le trafic. Elles repartissent les pressions sur le sol support afin de maintenir les déformations à ce niveaux les limites admissibles.

C. La couche de forme

Bien que ne faisant pas partie de la chaussée proprement dite, elle participé à son intégré de part ses fonctions :

-pendant les travaux, elle contribue au nivellement et assure la traficabilité du chantier

-elle permet d'homogénéiser les caractéristiques du sol support et le protége, notamment contre le gel.

I.2.10.2.Principe de fonctionnement des différentes familles de chaussées

Suivant leur mode fonctionnement, on distingue 6 grandes familles de chaussées :

- les chaussées souples ;
- les chaussées bitumineuses épaisses ;
- les chaussées à assise traitée aux liant hydrauliques (ou chaussées semi-rigides) ;
- les chaussées à structure mixte ;
- les chaussées à structure inverse ;
- les chaussées en béton de ciment.

A. Les chaussées souples

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm). Parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30et 60cm.

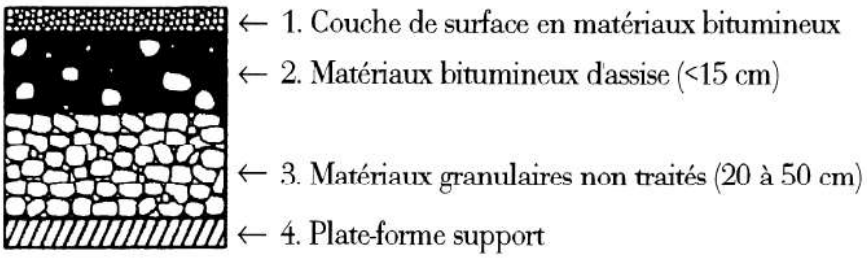


Figure I.17 : Représentation d'un chaussé souple.

Les matériaux granulaires constituant l'assise de la chaussée ont un module de rigidité relativement faible. Comme la couverture bitumineuse est mince, les efforts verticaux sont transmis au support avec une faible diffusion. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques qui se répercutent en déformations permanentes à la surface de la chaussée.

La couverture bitumineuse subit à la base des efforts répétés de traction-flexion.l'évolution la plus fréquente des chaussées souples se manifeste d'abord par l'apparition de déformation de types orniérage et affaissement qui détériorent les qualités des profils en travers et en long.

Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entrainent une détérioration par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées, puis évoluant peu à peu vers le faïençage.

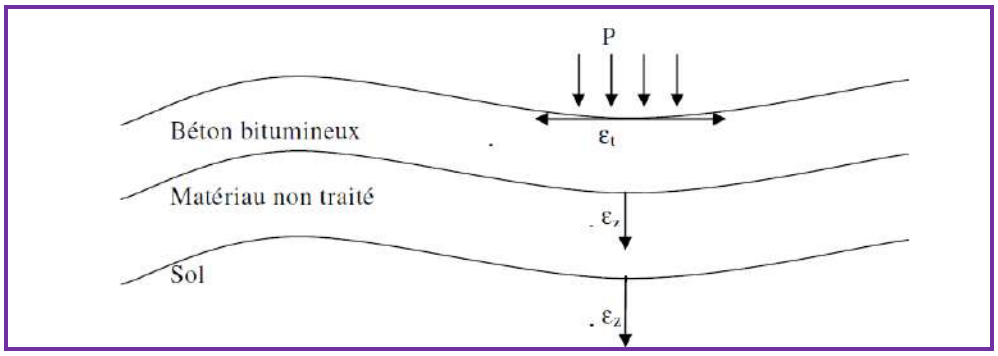


Figure I.18 : fonctionnement d'une chaussée souple.

B. Les chaussées bitumineuses épaisses

Les chaussées bitumineuses épaisses comportent une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux bitumineux disposés en une ou deux, voire trois couches, dont l'épaisseur totale est comprise entre 15 et 40cm. Le fonctionnement des chaussées épaisses est d'autant plus différent de celui des chaussées souple que l'assise est épaisse.

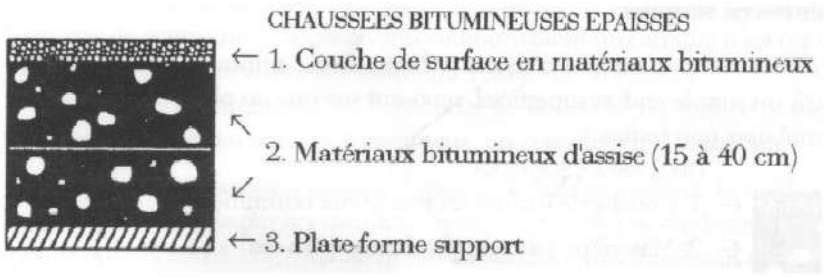


Figure I.19 : Représentation d'une chaussée bitumineuse épaisse.

La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser en les atténuant fortement les contrainte verticales transmises au sol. La qualité des interfaces a une grande importance pour ce type de chaussée ; en effet : si les couches bitumineuses sont liées, les allongements maximaux se produisent à la base de la couche liées la plus profonde ; par contre, lorsquelle sont décollées, chaque couche se retrouve sollicitée en traction, provoquant la ruine prématurée de la structure.

C. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm).parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60cm.

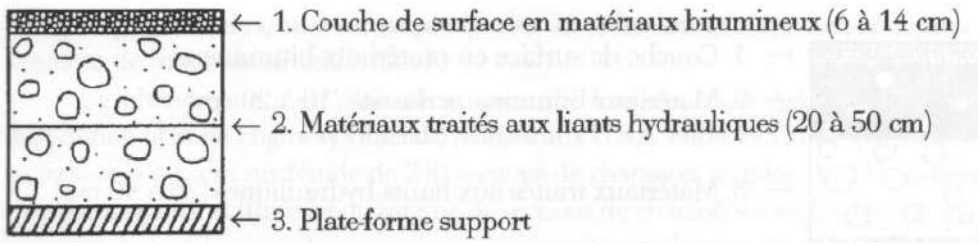


Figure I.20 : Représentation d'une chaussée à assise traitée liants hydrauliques.

Le fonctionnement de ces structures peut être schématisé comme suit :

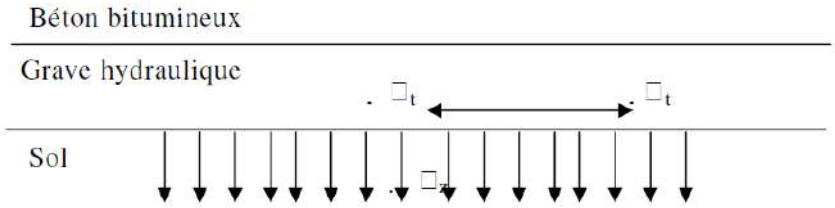


Figure I.21 : fonctionnement d'une chaussée à assise traitée au liant hydraulique.

Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydraulique. Les contraintes verticales transmises au sol support sont très faibles. En revanche l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion σ_t qui s'avèrent déterminantes pour son dimensionnement.

L'interface couche de surface-couche de base est aussi une zone sensible car elle est souvent soumise à de forte contraintes normales et de cisaillement horizontal et les centimètres supérieurs de l'assise traitée sont souvent de faible résistance.

Ces assises sont sujettes à des retraits (phénomène thermique et de prise du béton le retrait bien qu'empêché par le frottement de la couche d'assise sur son support, provoque des fissures transversales qui remontent au travers de la couche de roulement.

D. Les chaussées à structure mixte

Les chaussées à structure mixte comportent une couche de surface et une couche de base (10 à 20 cm) en matériaux bitumineux sur une couche de matériaux traités aux liants hydraulique (20à 40cm).les matériaux bitumineux représentent environ la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée.

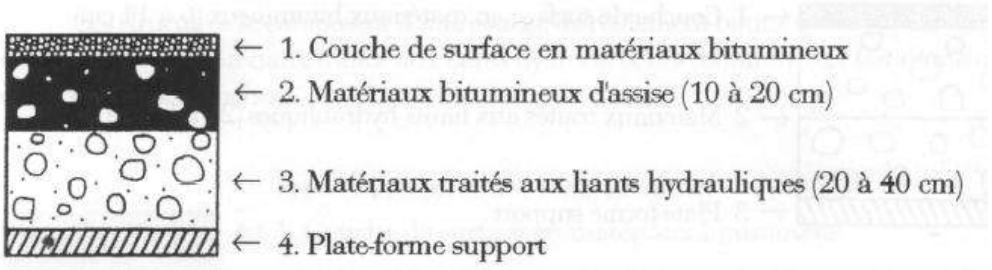


Figure I.22 : Représentation d'une chaussée à structure mixte.

Chaque couche assure une fonction bien déterminée :

- la couche de fondation traitée au liant hydraulique diffuse et atténue les efforts transmis au sol support.
- les couches bitumineuses ralentissent la remontée fissures transversales de la couche sous-jacente et réduisent les contraintes de flexion à la base de la structure tout en assurant les qualités d'uni et de continuité l'adhérence entre les couches bitumineuses et les couche traitées aux liant hydraulique est le point faible de la structure.

Elle peut être rompue par suite de dilatation différentielle entre les deux couches et de l'action du trafic, entraînant alors une forte augmentation des contraintes de traction à la base de couche bitumineuse, qui peut ainsi périr par fatigue.

E. Les chaussées à structure inverse

Par rapport aux structures mixtes, les structures inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires entre la couche de fondation (traitée aux liants hydrauliques) et les couches supérieures bitumineuses.

Cette couche de matériaux granulaires a pour rôle d'éviter la remontée des fissures de la couche de fondation.

F. Les chaussées en béton de ciment

Ces structures sont peu répandues en France.la chaussée est constituée par une couche de fondation en grave ciment d'environ 15cm d'épaisseur, surmontée par une dalle de béton de 25cm d'épaisseur environ.des joint transversaux sont effectué tous les 4 à 5cm pour éviter une fissuration anarchique du béton, ainsi que des joints longitudinaux.

I.2.11. Propriétés du béton compacté au rouleau

I.2.11.1. Propriétés du BCR à l'état frais

A. La détermination de la teneur en eau optimal

D'après DELHEZ Pascal **[38],** la teneur en eau optimale a été déterminer par la réalisation de 7 gâchés notés, la quantité d'eau varie entre 120 à 180 (l/m^3), le rapport E/C trouvé est de 0,32 à 0,56 et le rapport s/g =0,6:

Tableau I.2 : Teneur en eau optimal des différents mélanges.

Dénomination	Eau totale (l/m^3)	Eau efficace (l/m^3)	$(E/C)_{efficace}$
DP G1	180	140,5	0,56
DP G3	160	120,5	0,48
DP G4	150	110,5	0,44
DP G5	140	100,5	0,40
DP G6	145	105,5	0,42
DP G14	130	90,5	0,36
DP G15	120	80,5	0,32

Pour chaque quantité d'eau, la densité humide et sèche est mesurée, les résultats de l'essai Proctor modifié sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau I.3: Résultats de l'essai Proctor modifié.

E (l/m^3)	ρ_h (kg/m^3)	W (kg/m^3)	ρ_d (kg/m^3)
170	2362	7,85	2190
160	2388	7,39	2224
150	2384	6,93	2229
140	2371	6,46	2227
130	2336	6,00	2204
120	2241	5,54	2124

Ces résultats sont représentés dans le graphe masse volumique à l'état sec ρ_d en fonction de la teneur en eau W (figure I.23). L'optimum Proctor se situe pour une teneur en eau comprise entre 6,46 % et 7,39 %. Ces valeurs de teneur en eau correspondent à une teneur en eau totale de 140 l/m^3 à 160 l/m^3.

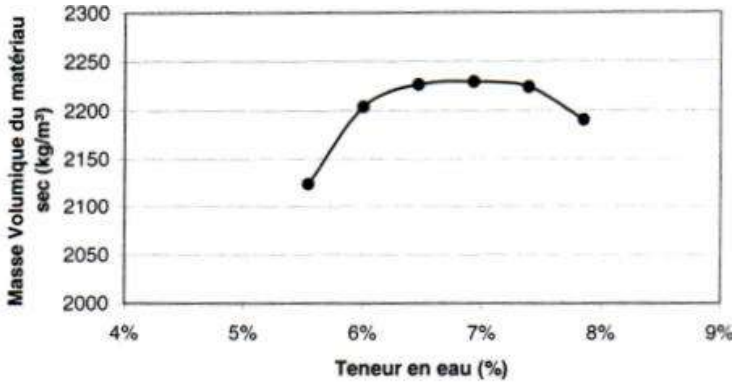


Figure I.23 : Résultat de l'essai Proctor modifié.

Selon DEBIEB Farid **[39],** la démarche vise à faire vérifier la teneur en eau totale en gardant le même squelette granulaire de la composition BCRR-NV4. C'est la mesure de résistance en compression sur le béton qui est optimisée.

Tableau I.4: Optimisation de la quantité d'eau pour le rapport S/G optimal.

	$E/C_{effi.}$	$E_{effi.}$	E_{tot}	E_{abs} (G+S)	Rc 7j (MPa)
BCRR–NV7	0,38	95,5	224	128,6	22,50
BCRR–NV8	0,36	90	219	128,6	17,75
BCRR–NV9	**0,32**	**80**	**209**	**128,6**	**26,00**
BCRR–NV10	0,40	100	229	128,6	22,25
BCRR–NV11	0,42	105	233	128,6	16,75

Sur la figure I.24 se résume la résistance à la compression à l'âge de 7 jours en fonction de E/C_{eff}. La résistance est optimale avec un rapport E/C égale à 0,32.

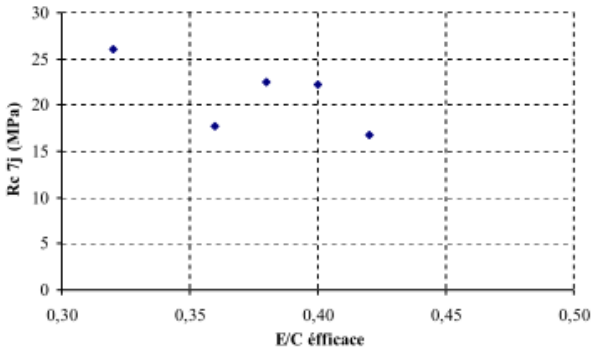


Figure I.24 : Résistance à la compression à 7 jours en fonction de E/C_{eff}.

D'après COURARD et al **[40],** la quantité d'eau est optimisé par la mesure de la compacité des différents teneurs en eau. Compacité maximale correspond à une résistance maximale à 7 jours.

Tableau I.5 : Compacité des mélanges en fonction de E/C_{eff}.

Mix	Total water (l/m³)	Efficient water (l/m³)	$(W/C)_{eff}$	$\varnothing_{solid}$	$\varnothing_{water\ efficient}$	$\varnothing_{solid\text{-}efficient}$	f_{cm} 7 days (N/mm²)
1	170	115.5	0.46	0.799	0.115	0.853	20
2	160	105.5	0.42	0.807	0.106	0.862	20
3	150	95.5	0.38	0.811	0.096	0.866	21
4	145	90.5	0.36	0.810	0.091	0.865	20
5	140	85.5	0.34	0.814	0.086	0.869	20
6	130	75.5	0.30	0.789	0.074	0.843	16
7	120	65.5	0.26	0.757	0.062	0.808	13

Ces résultats sont représentés dans le graphe compacité des mélanges en fonction de E/C_{eff} , telle que la compacité maximale de 0,869 correspond à un rapport E/C de 0,34 (figure I.25).

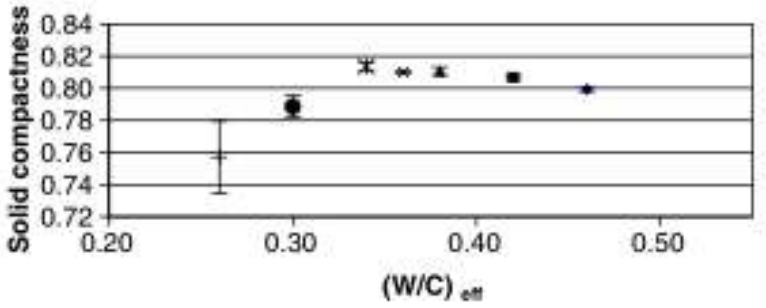


Figure I.25 : Compacité en fonction de E/C_{eff} pour un S/G optimal.

Et par comparaison des densités trouvées par l'essai Proctor modifié et par la vibration sous pression, ces chercheurs ont remarqué que ces densités sont comparable pour une teneur en eau compris entre 6,46 et 7,85 sachant que si on diminue ce pourcentage, la densité trouvé par vibration sous pression se diminue par rapport à celle obtenue par l'essai Proctor modifié (tableau I.6).

Tableau I.6 : Densité du BCR donné par Proctor modifié.

Water content, w (%)	Proctor Modified Test, ρ_d (kg/m³)	Vibration Weighing Test, ρ_d (kg/m³)
7.85	2190	2225
7.39	2224	2246
6.93	2229	2245
6.46	2227	2244
6	2204	2167
5.54	2124	2068

SAADI A. **[28],** a trouvé la teneur en eau optimale par l'essai Proctor modifié des 8 mélanges formulé à base de granulats de différents carrière, la teneur en eau était variable entre 3,5 % à 7 %. Les résultats trouvés sont résumé dans le tableau suivant :

Tableau I.7 : Résultats de l'essai Proctor modifié.

HB1	W (%)	3,41	3,84	4,28	5,14
	ρ_d (kg/m^3)	2339,89	2397,78	2455,34	2437,94
HB2	W (%)	4,72	5,25	5,784	/
	ρ_d (kg/m^3)	2391,79	2398,96	2392,2	/
HO1	W (%)	4,28	4,67	5,06	5,44
	ρ_d (kg/m^3)	2415,49	2430,64	2499,99	2449,75
HO2	W (%)	5	5,5	6	/
	ρ_d (kg/m^3)	2446,72	2450,5	2448,56	/
DB1	W (%)	5	6	7	/
	ρ_d (kg/m^3)	2398	2411	2388,47	/
DB2	W (%)	5	6	7	/
	ρ_d (kg/m^3)	2408,81	2418,12	2395,52	/
DO1	W (%)	3,914	4,187	4,608	5,02
	ρ_d (kg/m^3)	2362,84	2385,62	2412,1	2406,23
DO2	W (%)	5	6	7	/
	ρ_d (kg/m^3)	2419,59	2435,92	2413,5	/

La quantité d'eau optimale des ces mélanges est donnée par le tableau I.8 :

Tableau I.8 : Propriétés à l'état frais des BCR.

Mélange du béton	Eau (E) Optimum Proctor (kg/m^3)
HB1	125,00
HB2	136,50
HO1	141,00
HO2	142,50
DB1	129,35
DB2	138,60
DO1	139,70
DO2	140,75

ZDIRI M. [25], a compacté le BCR au laboratoire par l'utilisation du procédé Proctor modifié qui correspond à une énergie de compactage assimilable à l'énergie donnée par un rouleau compacteur.

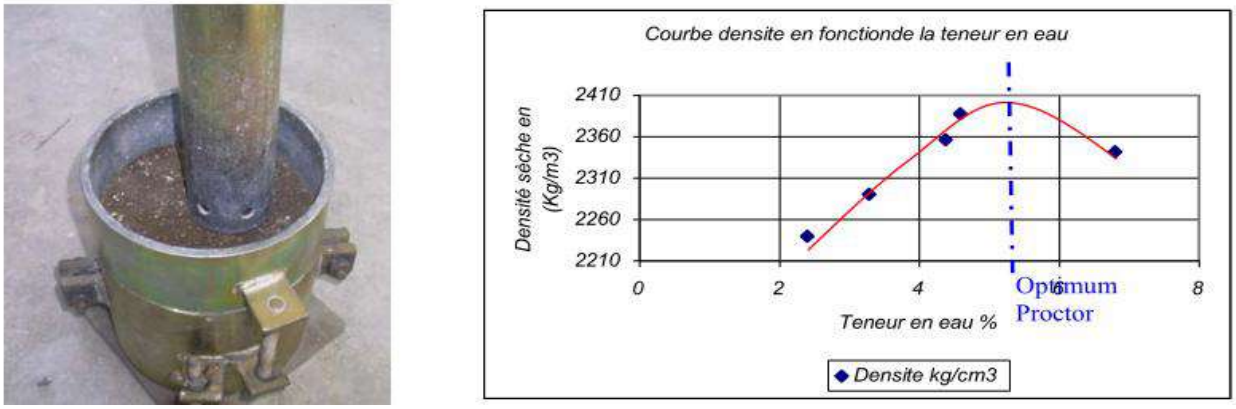


Figure I.26 : Compactage du BCR et variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau.

Ali Mardani-Aghabaglou et al **[41],** ont mesuré la densité d'un BCR à l'état frais par le même procédé Proctor modifié mais par l'introduction de 20% de cendre volante, et par comparaison de leur béton de référence, ils ont remarqué une chute considérable de densité.

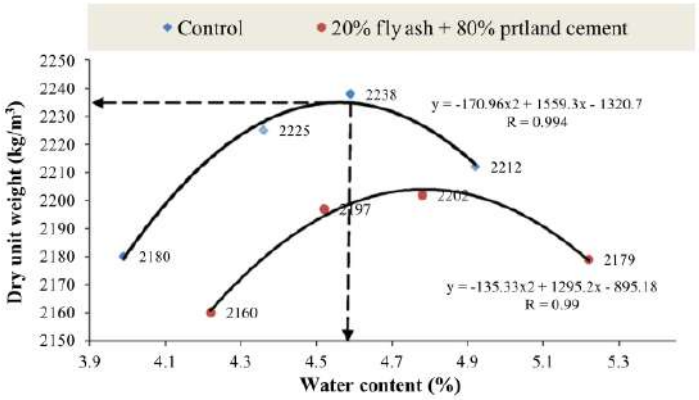


Figure I.27 : Relation entre la teneur en eau optimal et la densité du BCR.

Selon Mahmoud Nili et al **[42],** ont fabriqué un BCR avec différent dosage de ciment et différent ajouts (fumé de silice, cendre volante et la pouzzolane naturelle), et ont trouvé un rapport E/L varie entre 0,36 à 0,43.

Tableau I.9 : Différents dosage d'un BCR (kg/m^3).

Mix code	Cement	Silica fume	Fly ash	Natural pozzolan	Water	Water reducer	Sand	Coarse agg. (5–12.5 mm)	Coarse agg. (12.5–19 mm)	W/b
300-REF	300	-	-	-	107.5	2.26	1006	415	603	0.36
300-SF	276	24	-	-	107.5	2.26	1006	415	603	0.36
300-FA	240	-	60	-	107.5	2.26	1006	415	603	0.36
300-NP	240	-	-	60	107.5	2.26	1006	415	603	0.36
250-REF	250	-	-	-	107.5	1.89	1008	425	615	0.43
250-SF	230	20	-	-	107.5	1.89	1008	425	615	0.43
250-FA	200	-	50	-	107.5	1.89	1008	425	615	0.43
250-NP	200	-	-	50	107.5	1.89	1008	425	615	0.43

Farshid Vahedifard **[43],** a utilisé comme ajout dans le BCR (la poudre de pierre et la fumé de silice), avec deux dosage différent de ciment, il a trouvé une variation de E/C entre 0,41 à 0,47.

Les différents résultats sont récapitulés dans le tableau I.10 :

Tableau I.10 : Différents mélanges du BCR.

Mixture	Cementitious materials (kg/m³)			Water (kg/m³)	w/cm	Sand (kg/m³)	Gravel (kg/m³)
	Portland cement	Pumice	Silica fume				
12% cm (Cement Type II)							
C12	238	–	–	98	0.41	1127	918
12% cm (0.9 Type II + 0.1 pumice)							
C12P10	215	22	–	98	0.41	1127	918
12% cm (0.7 Type II + 0.3 pumice)							
C12P30	167	67	–	98	0.42	1127	918
12% cm (0.9 Type II + 0.1 silica fume)							
C12S10	215	–	17	98	0.42	1127	918
15% cm (Cement Type II)							
C15	281	–	–	128	0.46	1064	867
15% cm (0.9 Type II + 0.1 pumice)							
C15P10	253	26	–	128	0.46	1063	867
15% cm (0.7 Type II + 0.3 pumice)							
C15P30	197	79	–	128	0.46	1064	867
15% cm (0.9 Type II + 0.1 silica fume)							
C15S10	253	–	20	128	0.47	1064	867

I.2.11.2. Propriétés mécaniques du BCR

Courard et al **[40],** ont observé une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la compacité du mélange (voir figure I.28).

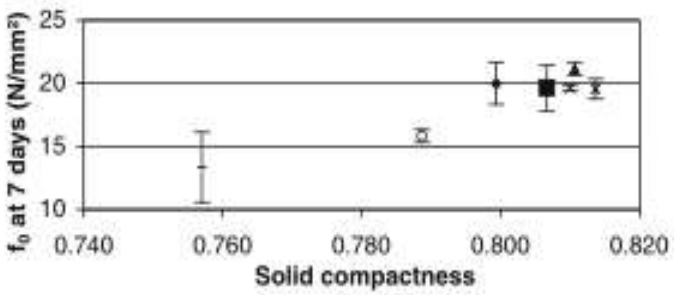


Figure I.28 : Résistance à la compression à 7 jours en fonction de la compacité.

D'après Saloua El Euch Khay et al **[44],** ont trouvé une résistance à la compression atteint 20 MPa pour 3 mélanges différents, et une résistance à la flexion ne dépasse pas 3 MPa mais concernant la résistance à la traction est d'environ 2 MPa à l'âge de 88 jours.

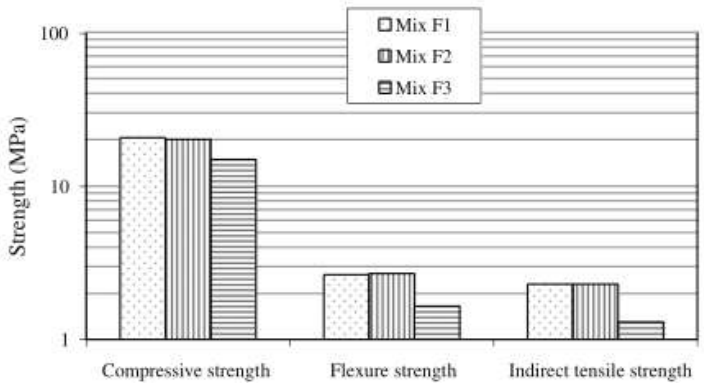


Figure I.29 : Résultats des propriétés mécaniques sur 3 mélanges à l'âge de 88 jours.

Selon M. Najimi et al **[45],** les valeurs de la résistance à la compression et résistance à la flexion des quatre mélanges réalisés dans 4 âges différents sont données dans le tableau I.11 :

Tableau I.11 : Résistance mécanique des mélanges.

Mixture	Compressive strength (MPa)				28 days flexural strength (MPa)
	1 day	7 days	28 days	90 days	
ACI-10	21	51	63	69	7.4
ACIM-10	22	50	66	71	7.6
DP-5	10	34	61	64	6.6
DP-7	9	32	46	49	5.2

Ces mélanges sont représentés sur le graphe (figure I.30), telle que la résistance à la compression augmente en fonction de l'âge.

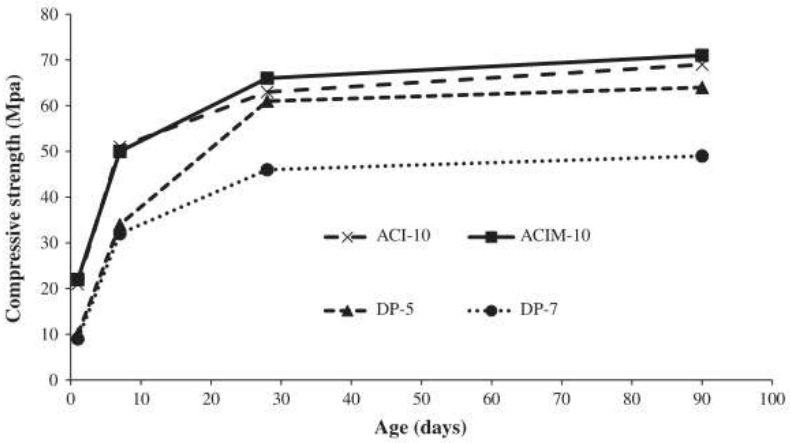


Figure I.30 : résistance à la compression en fonction de l'âge.

Mahmoud Nili et al **[42],** ont réalisé des BCR à l'âge de 14 et 28 jours, et ont trouvé une résistance comparable pour tous les mélanges avec une valeur limite de 27,5 MPa.

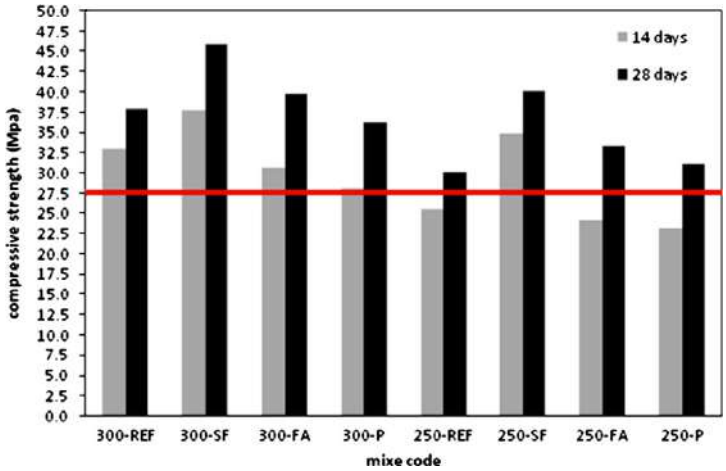


Figure I.31: Résistance à la compression des éprouvettes.

D'après Farshid Vahedifard et al **[43],** Comme était montré sur la Figure I.32, l'usage de la fumée de silice a augmenté la résistance en compression plus efficacement que la pierre ponce, les spécimens qui ont été utilisés dans cette étude. Les plus hauts résultats de la résistance ont été observés pour C15S10 qui a donné des résistances en compression de 27,1 MPa et 34.3 MPa aux âges de 14 et 28 jours, respectivement. La plus basse résistance a été observée pour C12P30 qui est de 15,9 et 18,7 MPa aux âges de 14 et 28 jours respectivement.

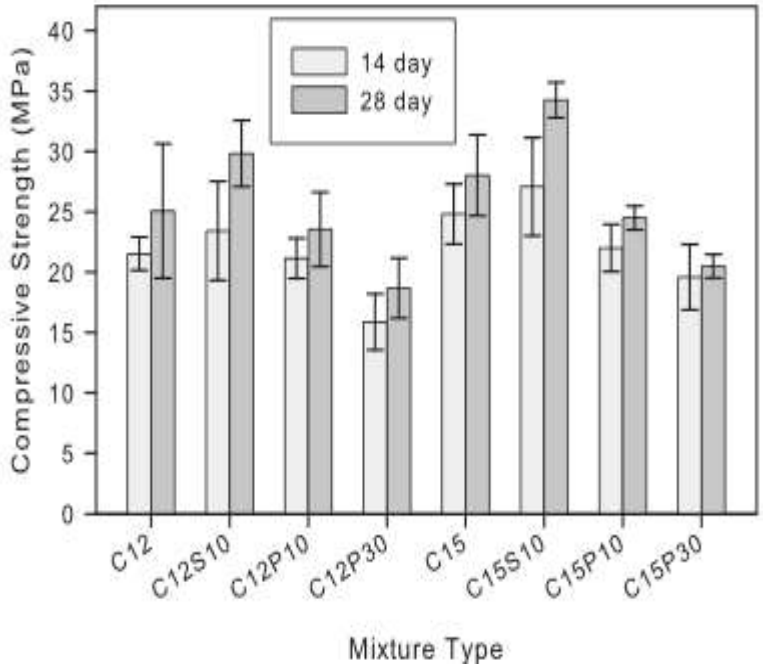


Figure I.32: Résistance à la compression des différents mélanges.

Delhez pascal **[38],** a fabriqué deux BCR, l'un avec les granulats naturels et l'autre avec les granulats recyclés hydrocarbonés. La résistance en compression à 7 jours sur éprouvettes cylindriques est beaucoup plus élevée pour les BCR à partir des granulats naturels (chute de résistance de ±40%). Cela provient certainement du fait que les granulats recyclés utilisés sont de moins bonne qualité, moins résistants, que les granulats naturels.

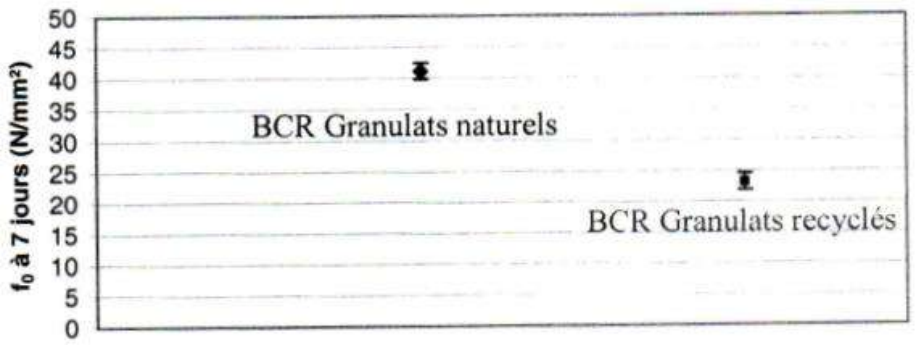


Figure I.33: Résistance à la compression à 7 jours sur des BCR à partir de granulats recyclés et naturels.

A l'âge de 28 jours, la résistance des bétons recyclés augmente par rapport à l'âge de 7 jours mais reste inférieure au BCR naturel, cette augmentation étant de l'ordre de 5 N/m² pour les deux BCR réalisés.

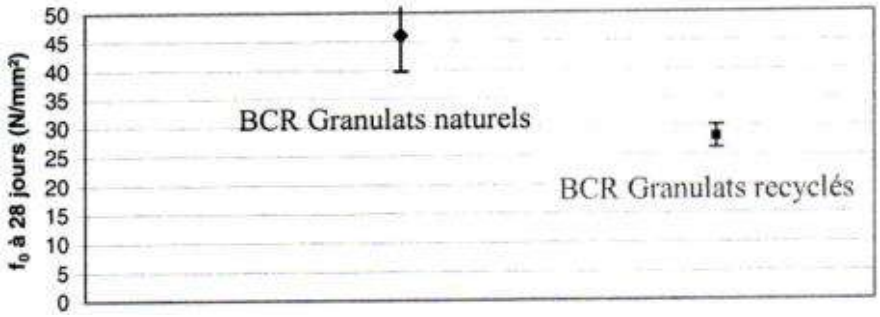


Figure I.34: Résistance à la compression à 28 jours sur des BCR à partir de granulats recyclés et naturels.

Si le critère de choix principal est la résistance en compression à 7 jours sur des éprouvettes cylindriques (ϕ=16cm, h=32cm), alors la teneur en ciment ne devrais pas descendre en dessous de 200 kg/m^3 puisqu'elle chute lorsqu'on descend à une teneur en ciment de 175 kg/m^3. Donc la résistance à la compression des BCR augmente avec l'augmentation du dosage en ciment, et elle est optimale à 250 kg/m^3.

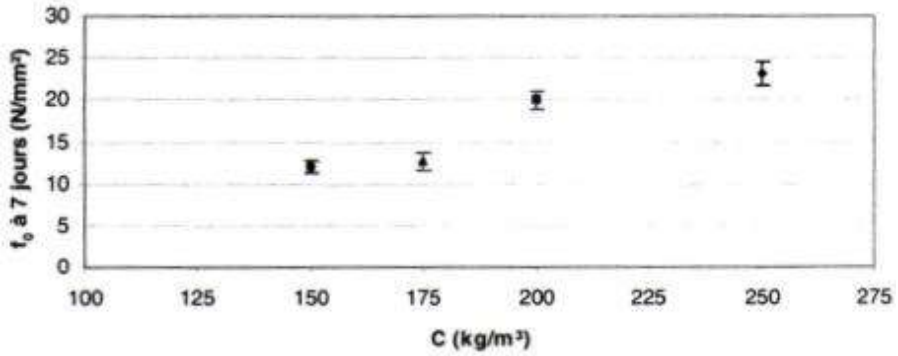


Figure I.35: Résistance à la compression à 7 jours lors de la variation de la teneur en ciment.

Selon Saadi A. **[28],** a fabriqué quatre mélanges BCR de différents carrières, a trouvé que les deux mélanges D.B.2 et H.B.2 ont une résistance à la compression à 90 jours environ 10MPa, mais pour les deux autres cette résistance atteint 20 MPa.

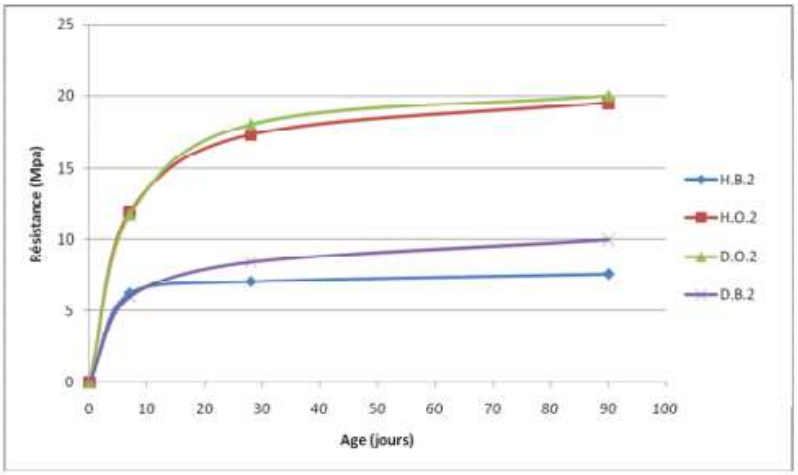


Figure I.36: Evolution de la résistance à la compression des BCR dosé à 250 kg/m^3 avec l'âge.

La résistance à la traction par fendage pour tous les mélanges ne dépasse pas 2 MPa, sauf pour le mélange D.O.2 qui est presque 2,5 MPa.

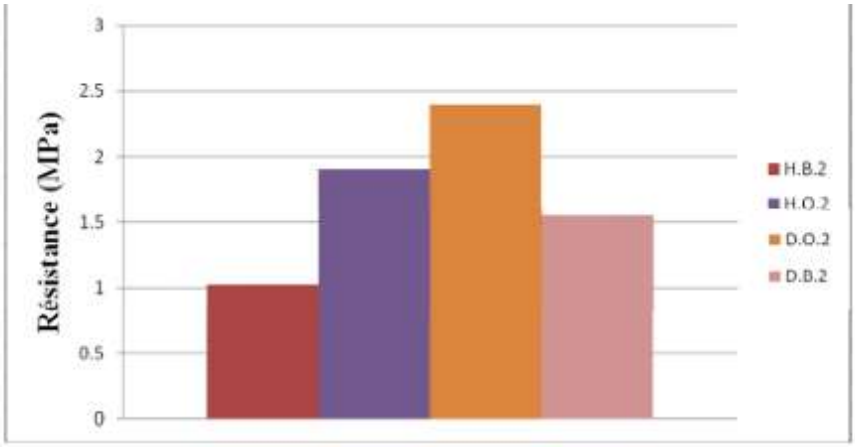


Figure I.37: Evolution de la résistance à la traction par fendage des BCR dosé à 250 kg/m^3 avec l'âge.

Certains mélanges de BCR formulés par le modèle « René – LCPC » exemple DO et HO, développer des bonnes propriétés mécaniques suffisantes pour résister aux trafics. Peut être expliqué par le développement d'un important phénomène d'arrangement à l'intérieur des mélanges.

La (figure I.38) donne quelques valeurs pour le module d'élasticité selon différentes échéances pour des mélanges de BCR avec un ciment portland de type 10 et un ciment de type 10E-FS pour des rapports eau/liant de 0,35 ; 0,40 et 0,45 **[41].** Comme montré sur cette figure, le module d'élasticité moyen de ces différents types de mélanges de BCR est environ de 30 GPa après 28 jours de mûrissement.

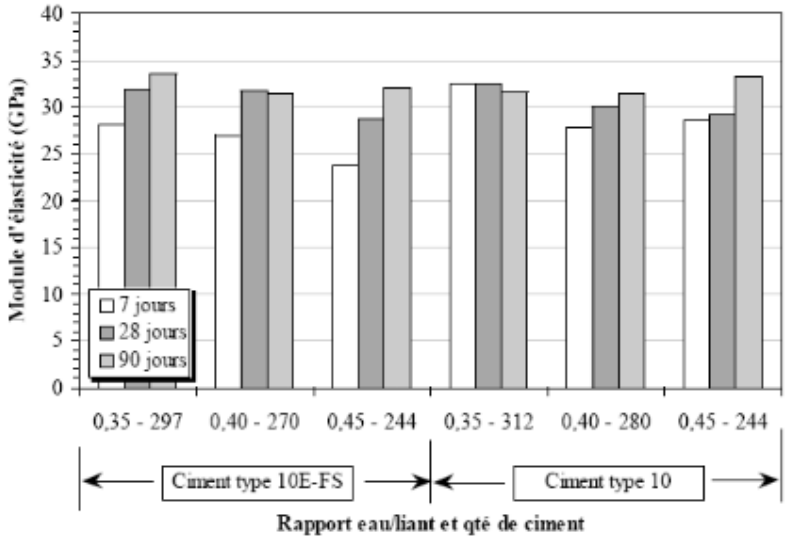


Figure I.38: Module d'élasticité de différents mélanges de BCR **[36].**

Une diminution du module d'élasticité comparable à celle de la résistance en compression est observée pour les bétons recyclés BR et BRCR, par rapport à leur béton témoins respectifs. La diminution est de 38% pour BR et 32% pour BRCR

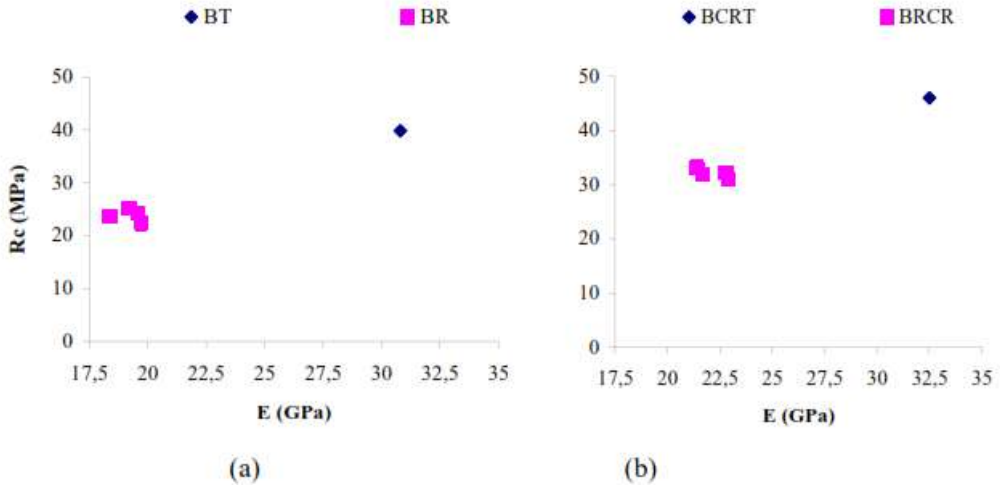


Figure I.39: Corrélation entre résistance en compression et module d'élasticité du béton durci **[39]**

Zdiri M. **[25],** a fait l'essai de chargement sur des éprouvettes en BCR (contrainte en fonction de déformation) pour calculer le module d'élasticité (E) et avoir la résistance à la rupture pour chaque mélange.

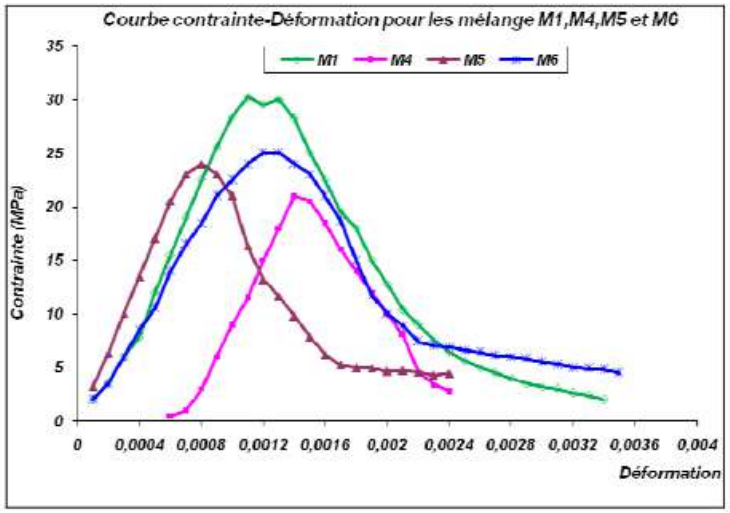


Figure I.40: Essai de chargement et relation contrainte – déformation du BCR

Le module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression trouvé selon les différentes normes est proche du modèle de BAEL.

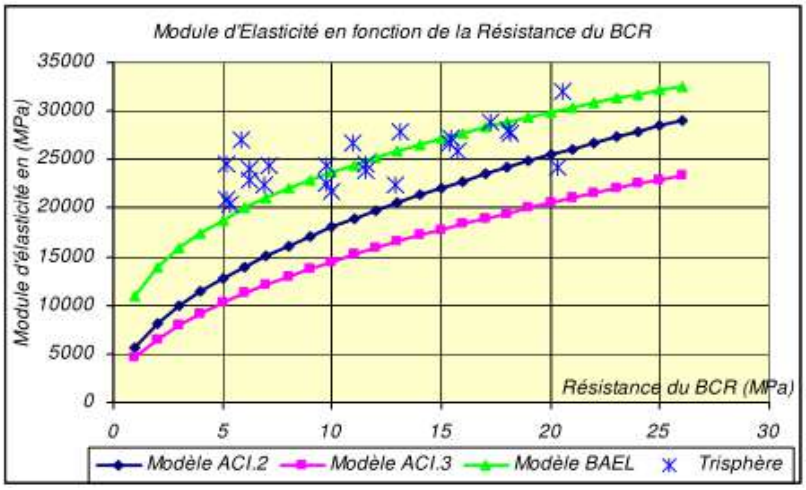


Figure I.41: Variation du module d'élasticité en fonction de la résistance du BCR.

I.2.11.3. Durabilité du BCR

Les bétons recyclés type BCRR, semblent présenter une capacité d'absorption d'eau comparative à celle du béton naturel en dépit du même pourcentage de granulats recyclés utilisés pour les bétons recyclés type BR.

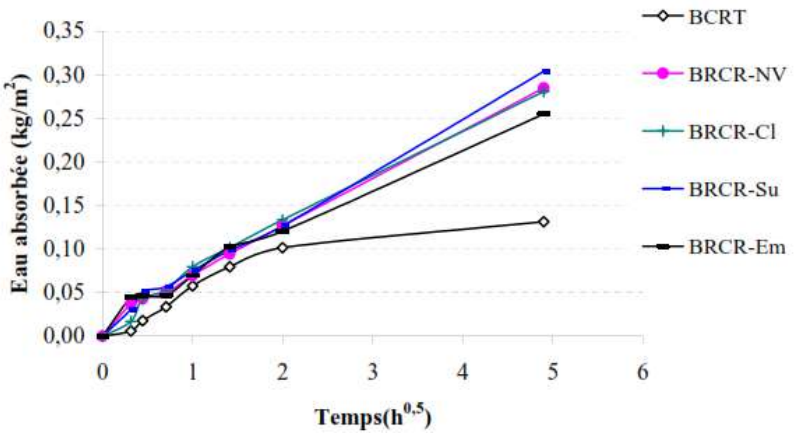


Figure I.42: Absorption d'eau par capillarité des bétons recyclés **[39].**

Après presque un an de conservation dans l'eau, Debieb **[39]** a observé un gonflement très faible pour le BRCR.

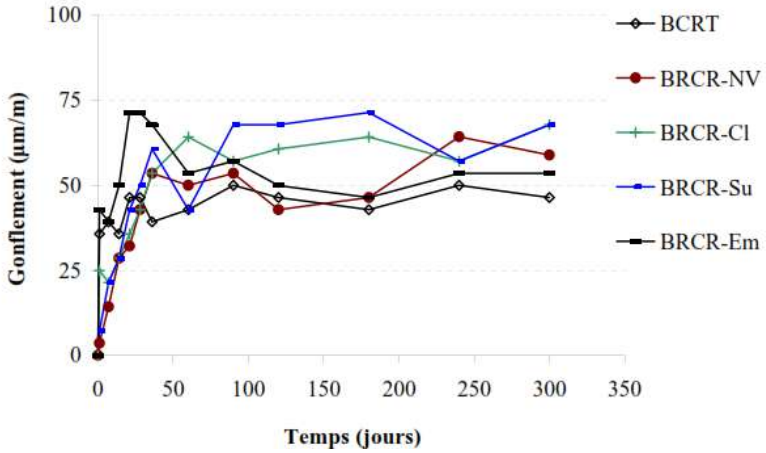


Figure I.43: Gonflement dans l'eau des BRCR.

Selon Saadi A. [28], le retrait de tous les mélanges augmente avec l'âge mais reste faible même pas 100 µm/m.

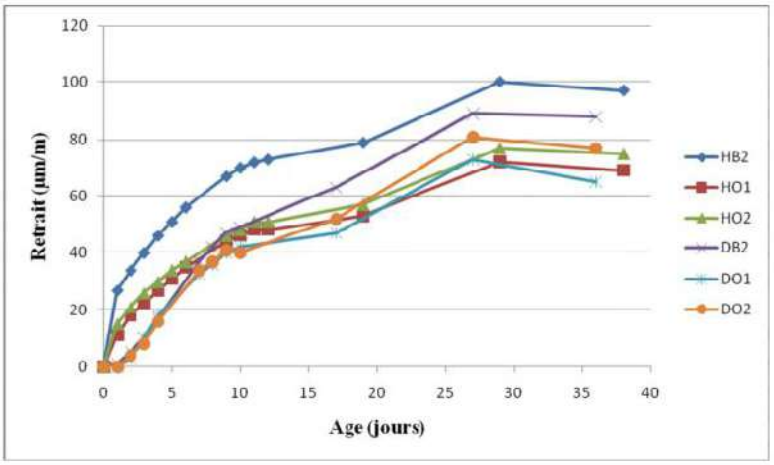


Figure I.44: Retrait des BCR en fonction de l'âge.

C'est la même remarque que pour le retrait, mais le gonflement plutôt trop faible que le retrait et ne dépasse pas 30 µm/m.

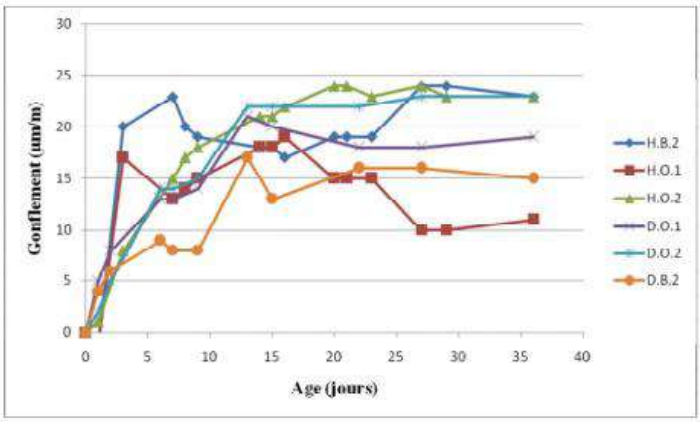


Figure I.45: Gonflement des BCR en fonction de l'âge.

I.2.12.Conclusion

Dans le cas des bétons compactés au rouleau pour les ouvrages de masse, le problème principal, du à la grande quantité de béton le développement de contraintes thermiques pouvant provoquer la fisuration.la meilleur solution pour résoudre ce problème est de réduire la teneur en ciment pour diminué le dégagement de chaleur.

De plus, cette solution a pour avantage de réduire le cout du béton et comme deuxième solution de recycler les anciens matériaux bitumineux dans un nouveau béton compacté au rouleau.

I.3. Présentation de logiciel René - LCPC [49]

I.3.1.Introductiion

Le logiciel René – LCPC (version 6.1d), est un logiciel d'optimisation granulaire, développé par Thierry Sedran et François de Larrard, Il s'agit, d'autre part, d'un logiciel expérimental, les auteurs souhaiteraient donc recueillir le maximum de commentaires et d'exemples d'utilisation.


LCPC

Manuel d'utilisation de

René-LCPC

version 6.1d

Logiciel d'optimisation granulaire

Thierry Sedran, François de Larrard
Septembre 2000

I.3.2. Domaine d'application du logiciel René - LCPC

Le domaine d'application de René-LCPC est celui des empilements granulaires et des suspensions granulaires. Par calculs successifs, il permet d'accéder, avec une bonne précision, aux proportions optimales des constituants d'un mélange granulaire. A noter qu'optimiser veut dire ici minimiser la porosité du squelette granulaire pour un mode de malaxage et de compactage donnés, ou encore maximiser la maniabilité pour une porosité donnée.

Un des domaines privilégiés (pour lequel il a, d'ailleurs, été développé) est celui de l'optimisation des bétons hydrauliques. Toutefois, le cadre du modèle est beaucoup plus général, et le logiciel trouvera sans doute des utilisateurs dans d'autres domaines du génie civil (celui des bétons bitumineux, par exemple).

Le logiciel René-LCPC met en œuvre le Modèle d'Empilement Compressible développé au LCPC. Ce modèle permet de calculer:

- La compacité d'un mélange quelconque de constituants granulaires;
- L'indice de compaction de toute suspension à porosité donnée;
- La porosité de toute suspension à indice de compaction donnée.

Ces calculs sont effectués à partir des proportions massiques de chaque constituant et de caractéristiques aisément accessibles à l'expérience:

- La compacité de l'empilement de chaque constituant pris individuellement, et la de référence correspondante;
- La masse volumique de chaque constituant;
- La granularité de chaque constituant.

Le logiciel a fait l'objet d'une validation dans le domaine du calcul de la compacité de mélanges granulaires secs. Elle a été effectuée sur de nombreux échantillons, et l'erreur fournie par le modèle par rapport à l'expérience est en général inférieure à 1% en valeur absolue.

La pertinence du logiciel a également été vérifiée dans le domaine des suspensions concentrées, et notamment sur des bétons **[46, 47, 48, 49, 50].** Par calculs successifs, René-LCPC permet de retrouver, avec une bonne précision, le squelette optimum d'un béton tel qu'obtenu expérimentalement par la méthode Baron-Lesage.

Dans le domaine de la formulation des bétons, ce logiciel peut donc remplacer les méthodes graphiques usuelles du type Dreux ou Faury.

I.3.3. Données d'entrée nécessaires au logiciel

Pour effectuer les calculs, on doit fournir au logiciel les masses volumiques, les granularités et les compacités des empilements individuels des constituants ainsi que l'indice de compaction et l'effet de paroi associés à la mesure de ces compacités.
Ce chapitre précise la nature de ces données et présente, à titre indicatif, les méthodologies utilisées au LCPC pour déterminer chacune des caractéristiques des constituants.

1.3.3.1. Masses volumiques

Les masses volumiques réelles sont déterminées selon les normes AFNOR P18-554 et P18-555, respectivement pour les gravillons et les sables, et selon la norme ASTM C188 pour les poudres (ciment, fines et ultrafines...).

I.3.3.2. Granularités

La granularité des gravillons et des sables est obtenue par simple tamisage. Celle du ciment et des additions de taille comparable (fillers, laitiers, cendres volantes) est déterminée à l'aide d'un granulomètre laser CILAS type 715. La poudre est dispersée dans de l'eau distillée et soumise à 1 min. d'ultrasons + 2 minutes d'agitation mécanique (avec un agitateur magnétique) +1 min. d'ultrasons supplémentaire, avant la mesure.

Enfin la granulométrie des ultrafines, telles que la fumée de silice, est effectuée à l'aide d'un sédigraphe après dispersion aux ultrasons. Cet appareil ne fournit pas de mesures pour les tailles de grains inférieures à 0,25 µm. Dans ce cas, le logiciel permet d'extrapoler la courbe granulométrique, sous la forme $p(x)=a\ln(x)+b$, ainsi que la valeur d_{min}, comme indiqué sur la figure ci-après.

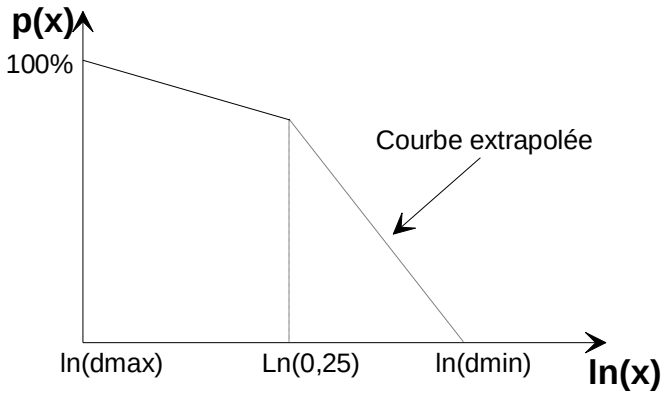


Figure I.46: Analyse granulométrique des ultrafines.

I.3.3.3. Surface spécifique

Lorsque l'on ne peut pas déterminer la courbe granulométrique complète il est nécessaire de déterminer la surface spécifique (en g/ m^2) par la méthode Blaine (AFNOR P 15 - 476) **[46, 47, 48, 49,50]** pour le ciment ou les additions de taille similaire et par la méthode BET pour extrapoler la courbe.

I.3.3.4. Compacité de l'empilement individuel de chaque constituant

Pour effectuer les calculs, le logiciel a besoin de connaître la compacité propre de chaque classe granulaire de chaque constituant. Comme il est très fastidieux d'accéder à toutes ces valeurs, René-LCPC permet de les estimer, à partir de la mesure des compacités de l'empilement de chaque constituant pris individuellement. La mesure de ces compacités est effectuée suivant des protocoles dépendant de la nature des produits.

I.3.3.5. Indice de compaction

L'indice de compaction est une grandeur qui caractérise l'efficacité du malaxage et du compactage du constituant. Plus cet indice de compaction est grand, plus le compactage est efficace. Ainsi, un indice de compaction infini correspond à un empilement virtuel (théorique) inaccessible à l'expérience.

L'analyse de différents modes opératoires à permis de fixer une échelle des indices de compaction comme indiqué ci-après.

Tableau I.12 : Indice de compaction.

Mise en place	Simple versement	Piquage	Vibration	Demande en eau sur poudre	Vibration+ Compression 10 kPa	Empilement virtuel
Indice de compaction	4,1	4,5	4,75	6,7	9	Infini

I.3.3.6. Confinement

Lorsqu'on dépose une famille de grains de diamètre d dans un volume fini, l'empilement de ces grains se trouve décompacté au voisinage des frontières du volume sur une épaisseur de d/2. Ainsi la compacité de l'empilement d'un constituant en milieu fini est inférieure à sa compacité en milieu infini.

Pour prendre en compte cet effet, il faut rentrer, dans le logiciel, le rapport v/V où V est le volume de l'échantillon et v le volume non perturbé par l'effet de paroi.

Par exemple:

- Pour un cylindre de diamètre D et de hauteur h on a:

$$V = \frac{\pi}{4} h \phi^2 \quad \text{et} \quad v = \frac{\pi}{4}(h-d)(\phi-d)^2 \qquad \text{donc} \quad \frac{v}{V} = (1-\frac{d}{h})(1-\frac{d}{\phi})^2 \text{.....Equ I.6}$$

- Pour un cube de coté a, on a:

$$V = a^3 \quad \text{et} \quad v = (a-d)^3 \qquad \text{donc} \quad \frac{v}{V} = (1-\frac{d}{a})^3 \text{..... Equ I.7}$$

I.3.4. Données de sortie

A l'issu d'un calcul pour un squelette granulaire donné, le logiciel fournit les quatre grandeurs suivantes:

- L'indice de compaction du mélange ;
- La porosité du mélange ;
- La masse volumique à sec du mélange (en kg/m^3): cette valeur correspond au poids de solide contenu dans un volume unité du mélange;
- La masse volumique à l'état saturé: cette valeur correspond au poids d'un volume unité du mélange en supposant que le liquide suspendant est de l'eau.

I.3.5. Fonctions du logiciel

On doit détailler ici comment utiliser le logiciel René-LCPC.

I.3.5.1. Fenêtre "Résultats"

C'est dans cette fenêtre que s'affichent les résultats des calculs. Les données affichées sont les suivantes :

- Les noms des constituants des mélanges ;
- Les proportions massiques des constituants ;
- La porosité du mélange ;
- L'indice de compaction du mélange ;
- La masse volumique à sec du mélange ;
- La masse volumique à l'état saturé du mélange ;
- Les coefficients du polynôme de confinement (si le milieu est infini).

I.3.5.2. Menu "Constituants"

A. Fenêtre "Bibliothèque de constituants"

C'est la première fenêtre qui s'affiche quand vous appuyez sur le menu « constituants ». Elle permet d'accéder aux propriétés des constituants à partir desquels vous allez composer vos mélanges granulaires.

Tous les constituants sont classés dans des dossiers dont le nom se termine par ".mat". La liste de ces dossiers apparaît en haut de la fenêtre. Ces dossiers doivent obligatoirement se trouver dans le répertoire où a été installé **rene.exe,** pour pouvoir figurer dans la liste. Un second utilisateur peut ainsi accéder à ces propres matériaux grâce à une simple copie des ses dossiers dans ce répertoire.

Lorsqu'un dossier est sélectionné dans la liste, la seconde liste indique immédiatement les matériaux disponibles dans ce dossier.

La fenêtre "Bibliothèque de constituants" contient huit boutons de commande:

- **Bouton "Nouv. dossier"**: crée un nouveau dossier de matériaux dont le nom est de la forme ∗.mat;
- **Bouton "Supp. dossier"**: supprime un dossier existant;
- **Bouton "Fusion"**: permet de transférer des matériaux d'un dossier à un autre. La pression de ce bouton ouvre la fenêtre "Fusion".

- **Bouton "Supprimer"**: supprime du dossier le constituant sélectionné;
- **Bouton "Voir"**: permet de consulter et de modifier les propriétés d'un constituant déjà existant. La pression de ce bouton ouvre la fenêtre "Propriétés du constituant".
- **Bouton "Nouveau"**: permet de créer un nouveau constituant. La pression de ce bouton ouvre successivement deux fenêtres vous permettant d'entrer les diamètres extrêmes du constituant. Si vous ne connaissez pas le diamètre minimum (pour une ultrafine par exemple) introduisez le plus petit diamètre connu. Le logiciel ouvre ensuite la fenêtre "Propriétés du constituant".
- **Bouton "Fermer"**: ferme la feuille "Bibliothèque de matériaux";
- **Bouton "Export prop."**: colle dans le presse-papier les caractéristiques du constituant sélectionné. On peut donc aisément insérer avec la fonction collé (ctrl v) ces données dans un tableau Excel™ ou Word™ pour la rédaction de rapports ou de documents divers.

B. Fenêtre "Propriétés du constituant"

Cette fenêtre permet d'introduire le dossier, le nom, la masse volumique et la granularité du constituant. Si vous connaissez les diamètres extrêmes, une pression sur le **bouton "OK"** ouvrira la fenêtre "Compacités propres des classes granulaires".

Si vous ne connaissez pas le diamètre minimum, entrer la granularité partielle et la valeur de la surface spécifique BET. Si vous cliquez sur le **bouton "Calculer"**, le logiciel fait une estimation de la partie inférieure de la courbe. Cliquez le **bouton "OK"** pour poursuivre.

C. Fenêtre "Compacités propres des classes granulaires"

Cette fenêtre vous permet:

- D'entrer la compacité propre (notée c(d)) de chaque classe granulaire si vous les connaissez;
- D'estimer, si vous ne les connaissez pas, les compacités propres de chaque classe granulaire, à partir de la compacité de l'empilement global du matériau.

Quatre options d'entrée vous sont proposées:

- Entrée individuelle de chaque compacité propre;

- c(d)= A ln(d)+B si d<1 µm et c(d)=B si d>1 µm : cette option peut être choisie pour les ultrafines (fumée de silice...);
- c(d)= A d+B : cette option peut être choisie pour des granulats concassés;
- c(d)= A d½/(d½+B) : cette option peut être choisie pour des granulats roulés.

Ces options ont été proposées dans un premier temps pour des raisons de recherche. En principe, les valeurs A et B étaient choisies de telle sorte que la fonction c(d) soit croissante (ceci traduisant le fait expérimental suivant: pour une même nature de grain, les grains de petit diamètre se compactent moins bien que ceux de plus grand diamètre).

Toutefois, d'un point de vue pratique, on choisit toujours c(d)= B (soit A=0 dans l'option 2 et l'option 3).

Le **bouton "OK"** vous permet d'enregistrer toutes les données de votre constituant. Vous devez toutefois au préalable effectuer un calage comme expliqué au paragraphe suivant.

C.1. Calage

Lorsque vous avez choisi une des quatre options, vous devez impérativement cliquer sur le **bouton "Caler"**. Ceci a deux conséquences:

- Enregistrer des informations nécessaires à René - LCPC;
- Afficher la compacité de l'empilement global du constituant calculée par le logiciel. Ainsi, par essais successifs, vous devez ajuster les valeurs de compacités propres de chaque classe granulaire du constituant, pour que cette valeur calculée corresponde à la compacité expérimentale.

Lorsque vous cliquez sur le **bouton "Caler",** le logiciel vous demande l'indice de compaction. Cette valeur caractérise l'efficacité du compactage utilisé lors de la mesure de la compacité de l'empilement du constituant.

Le programme vous demande ensuite si la mesure de la compacité a été effectuée en milieu confiné ou infini.

En théorie, la mesure est toujours effectuée en milieu confiné toutefois l'effet de paroi devient négligeable lorsque le diamètre des grains est petit devant les dimensions du récipient. Ainsi, on peut considérer que la mesure de compacité des sables est effectuée en milieu infini.

Si vous choisissez l'option milieu confiné, le logiciel ouvre la fenêtre "Confinement".

Lorsque le calage du constituant est effectué, le logiciel calcule et stocke des propriétés intrinsèques à ce constituant (i.e.: granularité et compacités propres virtuelles en milieu infini). Ainsi calé, il pourra être utilisé dans le calcul de mélanges dont l'indice de compaction et le confinement sont quelconques.

C.2. Fenêtre "Confinement"

Le confinement, subi par un échantillon dans un contenant, peut être caractérisé par le rapport v/V exprimant le rapport du volume non perturbé par l'effet de paroi, sur le volume total de l'échantillon. Ce rapport s'exprime, en général, par un polynôme du $3^{ème}$ degré en d (diamètre des grains en mm).

La fenêtre "Confinement" vous permet d'entrer les coefficients de ce polynôme.

Le **bouton Cylindre** est un utilitaire qui calcule, pour vous, ces coefficients dans le cas d'un récipient cylindrique.

C.3. Fenêtre "Fusion"

Cette fenêtre gère le transfert de matériaux d'un dossier source vers un dossier cible. Ceci permet, par exemple, de récupérer dans son répertoire des matériaux qui ont été enregistrés sur un autre ordinateur (dans un autre laboratoire...) puis copiés sur disquette.

Pour accéder à ces dossiers pressez les boutons **Parcourir...**.

Pour transférer les matériaux sélectionnés dans la liste de gauche pressez le bouton avec la flèche. A noter que l'on peut faire une sélection multiple, en conservant appuyé la touche "Shift", pour sélectionner des constituants adjacents, et la touche "Ctrl", pour sélectionner des constituants distants.

I.3.5.3. Menu "Mélange"

Lorsque vous cliquez sur ce menu, trois listes apparaissent à l'écran:

- La liste des dossiers et des constituants disponibles (en haut). Ce sont ceux qui se trouvent dans votre bibliothèque de constituants;

- La liste de constituants sélectionnés (en bas). Ce sont ceux dont vous aller étudier des mélanges en différentes proportions. Les constituants sont repérés par le nom du dossier auquel ils appartiennent suivi de leur propre nom.

Le **bouton "Sélectionner"** vous permet de transférer dans la liste du bas, les constituants sélectionnés avec la souris dans la liste du haut. A noter que l'on peut faire une sélection multiple, en conservant appuyé la touche "Shift", pour sélectionner des constituants adjacents, et la touche "Ctrl", pour sélectionner des constituants distants.

Le **bouton "Enlever"** permet de supprimer les constituants sélectionnés à la souris dans la liste du bas. On peut également effectuer une sélection multiple.

I.3.5.4. Menu "Calcul"

Ce menu n'est accessible que si des constituants apparaissent dans la liste de constituants sélectionnés du menu "Mélange". Lorsque vous cliquez sur ce menu, les menus "Mélange" et "Constituants" deviennent inaccessibles, la fenêtre "Données des calculs" s'ouvre et quatre boutons de calcul apparaissent.

Il est important de comprendre que les indices de compaction et les caractéristiques de confinement introduits dans le calcul de mélanges sont propres à ces mélanges et sont totalement indépendantes des valeurs utilisées pour caler chaque constituant individuellement. Ainsi, on pourra chercher la porosité d'un mélange binaire ayant un indice de compaction de 12, en milieu infini, même si les deux constituants on été calés en milieu confiné, avec un indice de compaction de 6,7 et 9 respectivement.

A. Fenêtre "Données des calculs"

Cette fenêtre permet d'entrer les proportions massiques des constituants par rapport à la masse totale de solide. Lorsque vous cliquez sur la fenêtre "Résultats", le logiciel sélectionne automatiquement, le cas échéant, les proportions massiques contenues sur la ligne où se trouve le curseur. Ceci permet de ne pas avoir à rentrer plusieurs fois les mêmes valeurs.

Vous pouvez choisir d'effectuer vos calculs en milieu confiné (par exemple si vous optimisez un béton devant passer dans une gaine de pompage) ou en milieu infini, en sélectionnant l'option adéquate.

Le bouton "**Modifier les matériaux"** vous permet de sortir du menu "Calcul".

Lorsque vous avez choisi vos proportions de mélange, effectuez vos calculs en cliquant sur un des quatre boutons présentés dans les paragraphes suivants :

B. Bouton "Compacité virtuelle"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, le logiciel calcule la valeur de la compacité virtuelle du mélange et l'imprime sur la feuille "Résultats". Cette compacité virtuelle est une valeur théorique correspondant à un indice de compaction infini.

C. Bouton "Porosité à indice de compaction fixé"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, le logiciel vous demande l'indice de compaction souhaité pour la suspension, calcule la porosité correspondante, et imprime les données sur la feuille "Résultats".

D. Bouton "Indice de compaction à porosité fixée"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, le logiciel vous demande la porosité visée pour la suspension, calcule l'indice de compaction correspondant, et imprime les données sur la feuille "Résultats".

E. Bouton "Optimisation d'un mélange binaire"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, une seconde feuille de proportions massiques apparait à l'écran. Lorsque vous validez ce second jeu de proportions, le logiciel calcule tous les mélanges binaires, à indice de compaction ou porosité fixé, de ces deux jeux de proportions avec un pas qui se resserre autour du mélange optimal. Ce bouton permet donc de localiser rapidement un mélange binaire optimum (indice de compaction minimal pour une porosité donnée, ou porosité minimale pour un indice de compaction donné).

I.3.5.5. Menu "Edition"

A. Copier (Ctrl c)

Cette fonction copie dans le presse-papier le contenu de toutes les cellules sélectionnées à l'aide de la souris dans la feuille "Résultats". Ceci permet de transférer les résultats dans des logiciels de type Word™ ou Excel™.

B. Supprimer (Suppr)

Cette fonction permet de supprimer toutes les lignes contenant les cellules sélectionnées à l'aide de la souris sur la feuille "Résultats".

I.3.5.6. Menu "Fichier"

A. Ouvrir

Cette fonction permet d'ouvrir une feuille de résultats déjà existante. Les feuilles "Résultats" sont en général enregistrée avec le suffixe .mcl.

B. Nouveau

Cette fonction permet d'ouvrir une nouvelle feuille Résultats.

C. Enregistrer

Cette fonction permet d'enregistrer la feuille "Résultats" active. Les fichiers d'enregistrement sont en général de la forme .mcl.

D. Quitter

Cette fonction permet de quitter l'application René-LCPC.

I.6.Conclusion

La prévision de la compacité d'un mélange granulaire est un problème qui se pose dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques. En particulier, en génie civil, la recherche de la compacité maximale du squelette granulaire dans un béton hydraulique (et donc de la teneur en eau minimale) a occupé plusieurs générations d'ingénieurs. En effet, l'utilisation de ce squelette optimal permet, pour une maniabilité donnée, d'optimiser la plupart des propriétés du béton durci ou, d'optimiser la maniabilité pour une teneur en eau donnée et donc de minimiser le nombre des essais à l'état frais.

En conclusion, nous rappelons que, si les exemples d'utilisation du modèle exposés dans notre recherche concernent les bétons destiné au chaussées qui a été le but de développeur de ce logiciel.

Chapitre II

Matériaux et essais



II.1.Introduction

Cette partie concerne la caractérisation des matériaux utilisés et les essais faits au laboratoire. Des essais expérimentaux sont effectués afin d'étudier les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité du béton compacté au rouleau.

II.2.Matériaux utilisés

Le but de ce travaille et de pouvoir comparer les résultats d'un BCR témoin et d'un autre BCR à base de granulats recyclé. Les constituants entrant dans la composition du BCR sont :

II.2.1.Ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie (de Mascara) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442]**[51]**.



Figure II.1 : Le ciment utilisé.

II.2.1.1.Définition

MATINE est ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélangeconvenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constituéd'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et lasilice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al_2O_3) et le fer(Fe_2O_3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermiqueà des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C.

En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'unréseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calciumhydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiquesphysico-chimiques conforment à la norme NA 442 **[51]**, EN 197-1 **[52]** et à la normeNF P 15-301 **[53]**.

II.2.1.2.Domaine d'utilisation

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautesrésistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvragesen béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfatesdu sol ou de l'eau, ainsi que dans les dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, ports, aéroports…etc) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement…etc) ;
- Secteur industriel.

II.2.1.3.Analyse et caractérisation

- ***Essais chimiques***

Le tableau II.1 résume l'Analyse chimique du ciment et compositionhypothétique du clincker, selon la fiche technique du ciment (Annexes).

Tableau II.1: l'analyse chimique du ciment et composition du clincker.

Analyse chimique du ciment	**Perte au feu (%) (NA 5042)**	**7.00-9.50**
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfate SO_3(%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clincker	Silicates tricalciques C_3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalcique C_3A(%)	6.00-8.00

- **Essais physiques**
  - La finesse

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistancemécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée parla surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide duperméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476]**[54]**.

  - La consistance normale

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de cimentpréalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide del'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431]**[55]**.

  - Le temps de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur unepâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme[NF P 15-473]**[56]**.Le tableau II.2 résume les résultats des essais physiques sur leciment utilisé.

Tableau II.2 : essais physique sur ciment.

Essais	Norme
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	<1000
Expansion (mm)	0.50-2.50
Début de prise (min)	120-180
Fin de prise (min)	210-280

- ***Essais mécaniques sur le ciment***

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectuésconformément à la norme [NF P 15-471] **[57]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utiliséest un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Lesrésultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le tableauII.3.

Tableau II.3: Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.

Age (jours)	Résistance a la compression (MPa)
2	>20
28	≥42.5et62.5

II.2.2.Granulats naturels

Dans cette recherche on a utilisédeux types de gravier, gravier naturel et gravier recyclé (enrobés bitumineux).Le gravier naturel qu'on a utilisé vient de la carrière de Mont korno et on a utilisé deux classes de gravier 3/8 et 8/15.

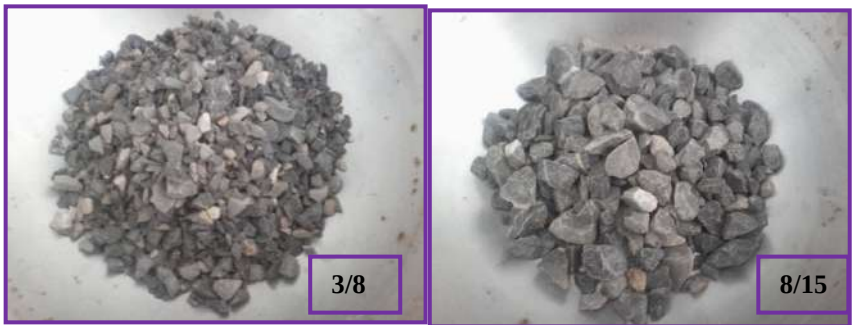


Figure II.2: Les graviers utilisés.

Pour le besoin de cette recherche, on a utilisé deux types de sable, le sable naturel roulé de HassiBahbah(région : Djelfa), située à 300 km au sud d'Alger, sa classe granulaire est 0/0,4 c'est un sable fin (voir figure II.3)corrigé avec un sable concassé naturel (0/3) vient de la carrière de Mont korno.

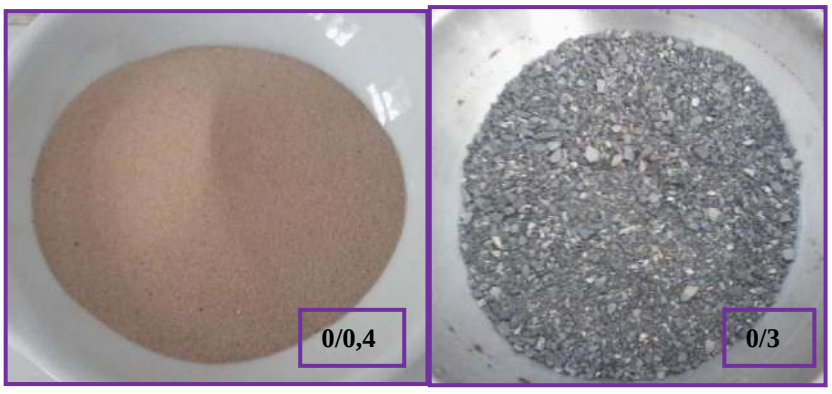


Figure II.3 : Les sables utilisés.

II.2.3. Granulats recyclés

Ce type de granulats est obtenu par fraisage des anciennes routes bitumineuses dans la région de Médéa. Pour cette étude on a utilisé les classes granulaire suivantes : sable 0/4, gravier 4/10 et gravier 10/14.



Figure II.4 : Sable et gravier recyclés.

II.2.4.L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau potable de distribution, exempte d'impuretés, conforme à la norme [NFP 18-303] **[58]**.

II.3.Préparation des matériaux utilisés

II.3.1.Granulats naturel

II.3.1.1.Lavage du gravier naturel

Le lavage du gravier doit se faire afin d'obtenir un gravier propre de toutesimpuretés et de toutes poussière pour qu'il assure l'adhérence entre les différent constituants du béton, le lavage est effectuésous pression d'eau, dans un tamis de diamètre de6,3mm pour le gravier 8/15 et dans un tamis de1,6 mmde diamètre de pour le gravier3/8, ensuite on a fait un séchage à 105°C pendant 24 heures.



Figure II.5: Procédure de lavage du gravier.

II.3.1.2.Lavage du sable concassé naturel

Le lavage du sable doit se faire afin d'obtenir un constituant propre, exempte d'éléments nocifs et de fines. Le lavage est effectué sous l'eau de robinet en procédant au tamisage de sable avec un tamis de maille égale à 0,315 mm et la récupération des fines avec le tamis de maille égale 0,063 ensuite on a fait un séchage à 105°C pendant 24 heures.



Figure II.6: Etape de préparation du sable concassé.

II.3.1.3.Le sable roulé

Le sable roulé doit être juste séché dans l'étuve à 105°C pendant 24 heures puis tamisé dans un tamis de maille égale à 0,4 mm pour éliminer tous éléments nuisibles.



Figure II.7 : Etape de préparation du sable roulé.

II.3.2.Granulats recyclé

II.3.2.1.Tamisage des granulats recyclé

Pour séparer les classes granulaires, nous avons utilisé deux tamis de maille de 10 mm et 14 mm l'un sur l'autre puis on a pris la quantité de gravier restante entre eux c'est le gravier de la classe 10/14et le refus du tamis 10 est passé en suite par un tamisage avec le tamis de 4mm et il résulte le gravier de classe 4/10 (refus) et le sable de classe 0/4 (tamisât).



Figure II.8: Etapes de préparation des granulats recyclés bitumineux.

II.4.Equipement utilisé

II.4.1. Malaxeur : Conçu pour un malaxage consistant et très homogène des bétons ou autres matériaux.

II.4.2. Table vibrante : Une table vibrante est composée de un ou plusieurs vibrateurs pouvant donner une vibration verticale ou multidirectionnelle. Elle a notamment pour fonction le compactage et le tassage de produits

II.4.3. Les moules cylindrique :16x32 cm² les moules sont indéformable et étanche et on hauteur égal a deux foi leur diamètre

II.4.4. La masse de 20 kg : elle épouse parfaitement le moule et nous facilite la tâche de compactage

II.4.5. La rehausse : elle se pose sur le moule cylindrique afin de pouvoir compacté la deuxième couche sans que le béton soit au même niveau du moule.

II.4.6. Moules prismatique, masse prismatique de 4,80kg, tige de piquage :moules prismatique pour faire les essais de retrait et gonflement, la masse pour le compactage et la tige pour homogénéiser le béton et éliminer les vides.



Figure II.9: Equipement utilisé pour la fabrication du BCR.

II.5.Essais effectués sur granulats

II.5.1.Granulométrie

L'analyse granulometrique nous a permis de determiner et d'observer les differents diamètre de grains qui constituent un echantillon. Pour cela l'analyse consiste a séparer et classer ces grains selon leur diametre a l'aide des tamis emboité les un sur les autres dont les dimentions des ouvertures sont decroissantes du haut vers le bas. L'echantillon etudié est mis sur le tamis superieur et le classement des grains sont obtenus par vibration de la colone de tamis [NF P18-560]**[59]**.



Figure II.10 : Tamiseuse électrique.

II.5.2.Masse volumique

Selon les normes suivantes (NF P 18-554 **[60]**et NF P 18-555**[61]**), on mesure la Masse volumique apparente et la Masse volumique absolue.

II.5.2.1. Masse volumique apparente

Pendant l'essai on remplit un corps de volume de 1L par le matériau, ensuite onmesure la masse de matériau.

$$\rho_{app}=\frac{M}{V}\ kg/L \quad \text{.....EquII.1}$$



Figure II.11 :Cône pour la mesure de la masse volumique apparente.

II.5.2.2. Masse volumique absolue

Cet essai consiste à mettre dans une éprouvette un volume d'eau de 500ml et onverse 500g du matériau :

$$\rho_{abs}=\frac{M}{V'-V}kg/L \quad \text{.....EquII.2}$$

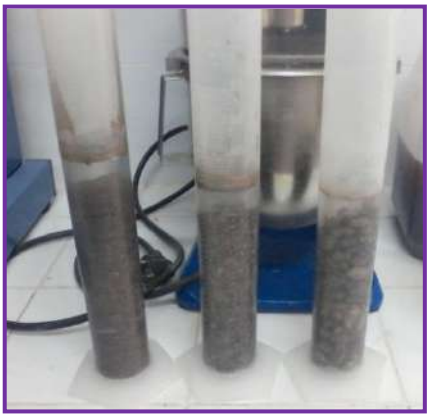


Figure II.12 : Eprouvette pour la mesure de la masse volumique absolue.

II.5.3.Absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats est mesurée suivant la norme(NF P 18-554 **[61]**et NF P 18-555**[62]**),qui exige pour les granulats entrant dans la composition des bétons, une valeur d'absorption d'eau inférieure à 5%.



Figure II.13 : Absorption d'eau des granulats.

II.5.4.Equivalent de sable

Le procédé de l'essai selon la norme NF P 18-598**[62]**consiste à verser une quantité de sable de 120g dans uneéprouvette normalisée comprend la solution lavante jusqu'au premier trait. Aprèsl'agitation pendant 30s, on va remplir l'éprouvette jusqu'au deuxième trait par la solutionlavante. Le mélange repose 20 min et alors on peut mesurer les hauteurs h1, h2 et h2'.

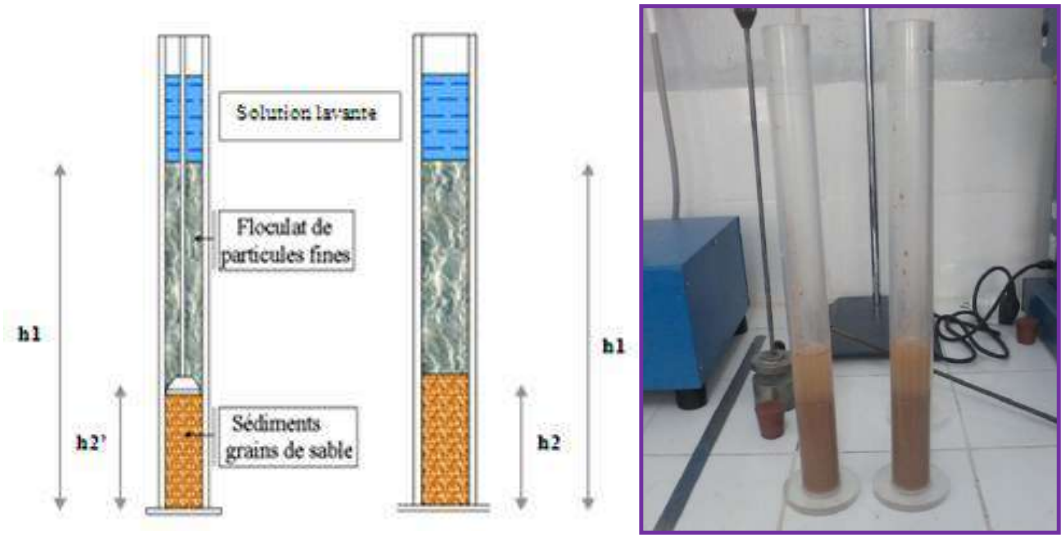


Figure II.14 : Eprouvettes pour la réalisation de l'équivalent de sable.

II.5.5.Dureté Los Angeles

II.5.5.1. Objectif de l'essai

Détermination de la résistance à l'abrasion selon la norme NF P 18-573 **[63]**(fragmentation par chocs plus usure par frottements réciproques) des granulats.

II.5.5.2. Equipement nécessaire

- L'appareil Los Angeles.
- Un bac –balance - tamis.
- Des boulets sphériques de 47 mm ± 1 mm de diamètre et pesant 420 à 445 g.



Figure II.15: Appareil Los Angeles.

II.5.5.3. Conduite de l'essai

- Prendre une masse minimale de 15 kg pour les granulats de la classe entre 10 mm et 14 mm de façonque 60% à 70% des granulats passent au travers le tamis de 12,5 mm.
- Tamiser l'échantillon sur la classe granulaire choisie

Tableau II.4 : Classe granulaire en fonction du nombre de boulets.

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse de la charges de boulets (g)
8–4	8	3450 à 3540
6,3–10	9	3840 à 3980
8-12.5	10	4260 à 4420
10–14	11	4700 à 4860
12,5–16	12	5120 à 5300

- laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve et prendre une masse 5000 g ± 5g.
- Introduire la charge de boulets correspondant à la classe granulaire de l'échantillon.
- Mettre la machine en marche durant le nombre 500 rotations à une vitesse de 30à 33tr/min.
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis 1,6 mm, Laver le refus au tamis, égoutter et sécherà l'étuve à 105 °C , puis le peser, Soit m' le résultat de la pesée.

Le coefficient Los Angeles (LA)est déterminé par la formule suivante :

$$LA = 100 \times \frac{m}{500} \quad \text{.....EquII.3}$$

Avec : m = 5000 – m'.

II.5.6.Compacité / porosité des granulats

La compacité est le volume plein du matériau sur le volume apparent. Par contre la porosité (P) est par définition le complément à l'unité de la compacité (C).

$$P = 1 - C \quad \text{.....EquII.4}$$

L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-555 **[61]**.

II.6.Confection et cure des éprouvettes

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance de 20 ±2 °C de température pour une hygrométrie de 55%.

Après démoulage, elles sont conservées dans l'eau jusqu'au moment de réalisation des essais (7, 28 et 90jours).



Figure II.16 : Conservation des éprouvettes.

II.7.Identification et formulation du BCR

La composition du Béton Compacté au Rouleau (BCR), est basée sur le logiciel d'optimisation granulaire René -LCPC met en œuvre le Modèle d'Empilement Compressible développé au LCPC **[64]**.



Figure II.17: Optimisation de la composition du BCR selon René-LCPC.

La teneur en ciment de 250 kg/m^3, constante tout au long du travail, a été choisie en référence**[28]** ,(voir tableau**III.8**)pour réaliser les mélanges de BCR, et un rapport E/C de départ fixe et égale à 0,35(voir tableau **III.8**).Donc on doit étudier le comportement mécanique et la durabilité des BCR incluant des sables et des graviers bitumineux recyclés.

II.7.1.Identification des mélanges

Cinq mélanges sont réalisés : **BCR naturel et 4 BCR recyclés**. Pour cette raison, nous avons choisi de comparer les bétons compactés au rouleau recyclés au béton compacté au rouleau naturel. On a choisi la notation suivante : BCR G/S.

BCR 0/0 :Béton compacté au rouleau à base de 100% gravier et sable naturel ;

BCR 100/100 :Béton compacté au rouleau à base de 100% gravier et sable recyclé ;

BCR 0/100 :Béton compacté au rouleau à base de gravier naturel et 100% sable recyclé;

BCR 100/0 :Béton compacté au rouleau à base de 100% gravier recyclé et sable naturel;

BCR 50/50 :Béton compacté au rouleau à base de 50% gravier et sable recyclé ;

II.7.2.Optimisation de la composition du BCR par René –LCPC

II.7.2.1. Compacité des granulats

Dans un cylindre métallique (ϕ16x32), fixé sur une table vibrante, et fermé par un piston exerçant une pression de 10 kPa avec une vibration d'une minute.



Figure II.18 : Calcul de la compacité des granulats selon RENE**[64]**.

II.7.2.2. Compacité du ciment

Pour le ciment, la mesure de la compacité c'est une mesure de la demande en eau. On mélange une certaine quantité de poudre à l'eau dans un malaxeur à mortier et ondéterminelepoidsd'eaujustenécessairepourfairepasserlemélangedel'état deboulettesàl'état de pâte homogène.



Figure II.19 : Calcul de la compacité du ciment selon RENE **[64]**.

II.7.2.3. Optimisation de la quantité d'eau optimale (Proctor modifié)

Cette étape consiste à déterminer une teneur en eau optimaleselon la norme NF P 94-093 **[65]**, de chaque composition BCR par l'essai Proctor modifié.

Cet essai permet de définir la relation entre la teneur en eau d'un mélange granulaire et sa densité sèche pour une énergie de compactage donnée. L'essai consiste à laisser tomber un marteau plusieurs fois sur un matériau granulaire dans un moule. La masse du marteau (4,5kg), la hauteur de chute (457 mm),le nombre d'impacts (55) et le nombre de couches (5) sont fixés par la norme. Suite aux opérations de compactage, le moule est arasé puis pesée la masse volumique humide(γ_h) du matériau est déterminée. On peut calculer la masse volumique sèche(γ_d) du mélange à l'aide de l'équation suivante:

$$\gamma_d = \frac{\gamma h}{w+100}100 \qquad \text{.....Equ II.5}$$

Où:

- $\gamma_h$etγ_d sont exprimés en kg/m^3 ;
- W représente la teneur en eau totale du béton incluant l'eau absorbée par les granulats, exprimée en pourcentage de la masse de matériaux secs ;

La courbe Proctor modifiée, exprimant ρ_d en fonction de w, à l'aspect d'une cloche ou chaque point sur la courbe représente un essai de compactage. Cette courbe est propre à un matériau donné et l'optimum Proctor modifié est situé au sommet de la courbe. Ce point représente la teneur en eau optimale pour atteindre la densité sèche la plus élevée.

En effet, lorsque l'on ajoute de l'eau à un mélange granulaire sec, celle-ci agit tout d'abord comme lubrifiant entre les particules qui ont plus de facilité à glisser les unes sur les autres et a se placer de façon optimale. Lorsque cet arrangement granulaire est atteint, l'eau prend cette fois la place du matériau solide à l'intérieur du moule et la densité sèche du squelette diminue.



Figure II.20: Equipement de l'essai Proctor modifié.

II.7.2.4. Etapes de compactage

La compacité est évaluée sur des échantillons d'environ 6 à 7,5 kg chacun; durant la vibration (150 Hz), un poids de 20 kg induit, une pression de 10 kPa sur le matériau déposé dans un moule cylindrique fixé à la table vibrante.



Figure II.21 : Vibration sous Pression des différents moules.

Les étapes de l'Essai de Vibration sous Pression sont les suivantes (2 couches):

1. Placer le moule sur la table vibrante ;
2. Placer une quantité connue (presque la moitié 7,5 kg) de béton frais dans le moule cylindrique avec piquage ;
3. Placer un poids de 20 kg dans le moule, sur le béton frais ;
4. Mettre la table vibrante en marche pendant une durée de 1 minute ;
5. Placer la deuxième quantité de béton frais (presque 6 kg) dans le moule avec piquage aussi ;

6. Placer le poids dans le moule, sur le béton frais ;
7. Mettre la table vibrante en marche pour la deuxième fois pendant une durée d'une minute ;
8. Araser bien la surface supérieur du moule à la fin de vibration ;



Figure II.22: Eprouvettes cylindriques et prismatique après coulage.

La méthode de malaxage est celle décrite par Delhez**[38]**.Dans cette méthode, le ciment est ajouté après avoir procédé à une homogénéisation des granulats et du sable, ce qui permet une meilleure répartition du ciment dans le squelette granulaire pour y ajouter ensuite l'eau de gâchage.



Figure II.23: Avant et après malaxage du BCR.

La procédure de malaxage du mélange BCR, est résumée dans le tableauII.5. La durée totale de malaxage est de 3 minutes.

Tableau II.5 : Procédure de malaxage du BCR**[39]**.

Temps	**40 sec**	**20 sec**	**10 sec**	**1 min**	**1 min**
Ajouts	GR+SR		Ciment	Eau	
Malaxage	**Malaxage**	**repos**	**Malaxage**	**malaxage**	**repos**

II.8. Essais effectués sur le béton

II.8.1. Béton à l'état frais

II.8.1.1. Affaissement

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre.il est utilisable tan que la dimension maximal des granulats ne dépasse pas 40mm.

Principe de l'essai :

Il s'agit de constater selon la norme NF P 18-451**[66]**l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement ne sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

- **Equipement nécessaire :**

L'appareillage est complètement se compose de 4 élément :

-un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, de 20cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10cm de diamètre en sa partie supérieure ;

-une plaque d'appui ;

-une tige de piquage ;

-une règle graduée.



Figure II.24 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

- **Conduite de l'essai :**

Le moule et la plaque son légèrement humidifiés avec une éponge.

Le moule est fixé sur la plaque. Le béton est introduit dans le moule en 3couche d'égales hauteurs qui seront mise en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche(la tige doit pénétrer la couche inférieur immédiatement).

Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution(entre 5 et 10 secondes).le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant consistance. Celle-ci est caractérisé par cet affaissement, noté h, et arrondi au centimètre le plus proche.la mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.la durée totale de l'essai, du début du remplissage à mesure de l'affaissement ne doit pas excéder 2min30s.

II.8.1.2. Densité à l'état frais

La densité du béton frais est déterminée à partir des pesées conformément à la norme (NF P 18-440)**[67]**.



Figure II.25 : Mesure de la densité du BCR à l'état frais.

II.8.2.Béton à l'état durci

II.8.2.1. Densité à l'étatdurci

La densité du béton à l'état durci est déterminée à partir des pesées conformément à la norme (NF P 18-435)**[68]**.

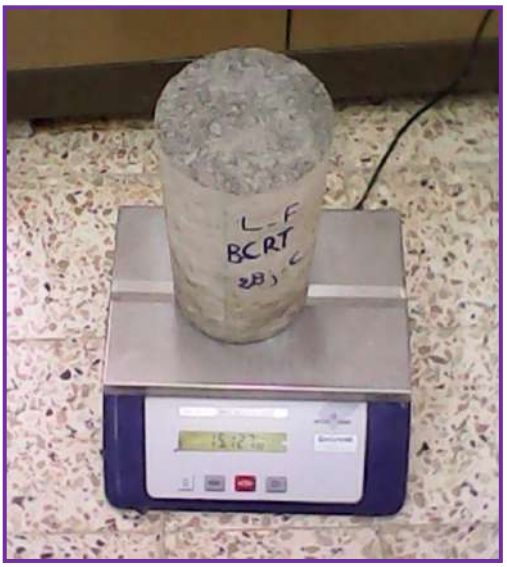


Figure II.26 : Mesure de la densité du BCR à l'état durci.

II.8.2.2. Résistance à la compression

- **Objectif de l'essai :**

L'essai a pour but de connaitre la résistance à la compression du béton de l'éprouvette selon la norme NF P 18-455**[69]**.

- **Principe de l'essai :**

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

- **Equipement nécessaire :**

-une machine d'essai qui est une presse de force et dimension appropriées à l'éprouvette à tester.

-un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes.



Figure II.27: Eprouvette cylindrique avant et après essai de compression simple.

- **Conduite de l'essai :**

L'éprouvette, doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre.Pour des éprouvette ϕ11x22 ou ϕ16x32 cela signifie une précision millimétrique qui ne pourra pas être obtenue sans l'emploi d'un gabarit de centrage prenant appui sur l'éprouvette (et non sur le produit de surfaçage).

La mise en charge doit être effectuée à une vitesse comprise entre 0,2 et 1,0MPa/s pour des éprouvettes ϕ11x22 cela signifie une montée en charge comprise entre 2kN/s et 10kN/s et pour des éprouvettes ϕ16x32 entre 4kN/s et 20kN/s.

La charge de rupture, p, est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit s la section orthogonale de l'éprouvette ; la résistance **f_c, est** exprimée en MPa a 0,5MPa prés et a pour expression :

$$\mathbf{F_c = p/s} \text{.....EquII.6}$$

Dans la relation ci-dessus f_c est directement obtenue en MPa si p exprimé en méga newtons (MN) et s en m².

II.8.2.3. Résistance à la traction par fendage

- **Objectif de l'essai :**

Le but de l'essai de connaitre la résistance à la traction du béton à une éprouvette cylindrique selon la norme NF P 18-434**[70]**.

- **Principe de l'essai :**

Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux générations opposées .cet effort de compression induit de la contrainte de traction dans le plan passant par ces deux génératrice.la rupture, due à ces contraintes de traction. Le calcule permet de définir la contrainte de traction correspondant à cette rupture.

- **Equipement nécessaire :**

-une presse de force appropriée.

-des bandes de chargement en contreplaqué neuf ayant une section dont les dimensions et une longueur au moins égale à cette de l'éprouvette.

-des moules cylindrique, pour la confection des éprouvettes, qui ne doivent pas être en carton car de tels moules ne garantissent pas avec suffisamment de précision la rectitude des génératrices.



Figure II.28: Eprouvette cylindrique avant et après essai de traction par fendage.

- **Conduite de l'essai :**

L'éprouvette est placée entre les deux plateaux de la presse, le contacte entre les plateaux et l'éprouvette se faisant par l'intermédiaire des deux bandes de contreplaqué. Le centrage de l'éprouvette doit se faire à 0.5mm près à l'aide d'un gabarit de centrage.

La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 1,94kN/s ±0,39kN/s pour les cylindre 11x22 et 4,01kN/s ±0,80KN/s pour les cylindre de 16x32(ce qui correspond à un accroissement de la contrainte de traction de 0,05MPa/s avec une tolérance de ± 20%.

Si h est la hauteur de l'éprouvette, d son diamètre et p la charge appliqué, la contrainte de rupture vaut :

$$F_t=0,637\ F/dxh \quad \text{.....EquII.7}$$

Dans la relation ci-dessus f_t est directement obtenue en MPa si p est exprimé en Méga newtons(MN) et d et h en mètre(m).cette contrainte doit être exprimée à 0,1 MPa.

II.8.2.4. Dureté superficiel (indice de rebondissement)

- **Objectif de l'essai**

La mesure de la dureté au choc selon la norme (NF P 18 - 417) **[71]**permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.

- **Principe de l'essai**

Il s'agit de tester la dureté de surface d'un béton durci. Cette dureté étant d'autant plus élevée que le béton est plus résistant, cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné.

- **Equipement nécessaire**

- Une presse hydraulique.
- Un scléromètre à béton conforme à la norme en vigueur.
- Pierre à polir, de texture à grains moyens en carbure de silicium ou matériau équivalent.

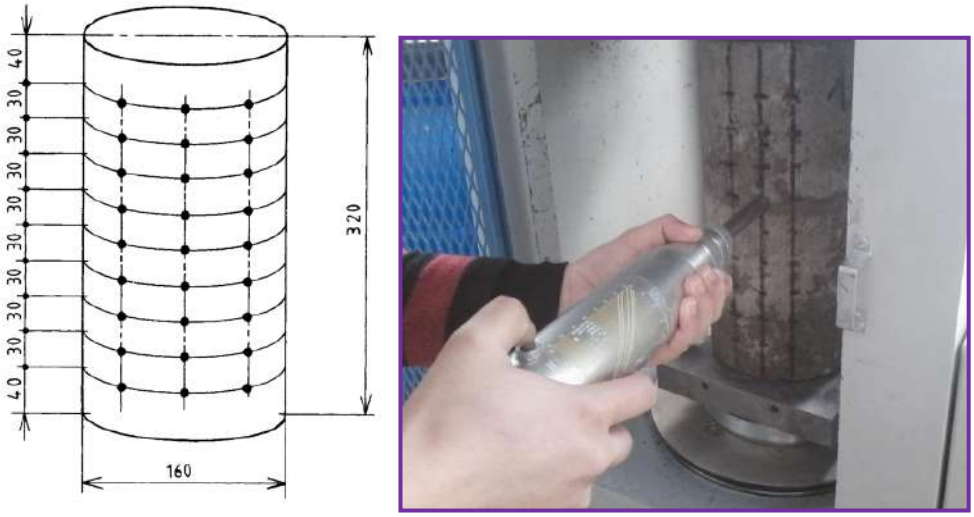


Figure II.29: Mesure de l'indice de rebondissement.

- **Surface d'essai**

Choix de la surface

Les éléments de béton soumis à l'essai doivent avoir une épaisseur minimale de 100 mm et être encastrés dans une structure. Des corps d'éprouve de dimensions plus réduites peuvent être testés à condition qu'ils soient fermement maintenus.

Il convient d'exclure les zones présentant des nids de cailloux, des écaillages, une texture grossière ou une porosité élevée.

Préparation

Poncer au moyen de la pierre à polir les surfaces de texture rugueuse ou peu résistante ou couvertes de laitance se désagrégeant jusqu'à ce qu'elles soient lisses. Toute trace d'humidité constatée à la surface du béton doit être éliminée. L'appareil étant disposé perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette, il est relevé 27 mesures réparties sur trois génératrices en 27 points distincts et distants entre eux de 30 mm. Aucune mesure ne doit être située à moins de 40 mm des faces de l'éprouvette (voir figure **II.29).**

- **Conduite de l'essai**

- Il convient d'utiliser le scléromètre dans une température ambiante comprise entre 10 °C et 35 °C,
- Placez l'éprouvette surfacée au centre des 2 plateaux de la presse,

- Appliquez une charge en kN correspondant à une pression de 0,5 MPa. Tourner ensuite la vis de mise en charge pour stabiliser la charge,
- Maintenir fermement le scléromètre de manière à permettre à la tige de percussion de frapper perpendiculairement la surface d'essai,
- Augmenter progressivement la pression exercée sur la tige jusqu'au déclenchement du choc,
- Après le choc, enregistrer l'indice de rebondissement,
- Pour obtenir une estimation fiable de l'indice de rebondissement de cela surface d'essai, neuf essais au moins doivent être effectués,
- Enregistrer la position et l'orientation du marteau à chaque série d'essai,
- La distance minimale entre deux essais de choc doit être de 25 mm et aucun essai ne doit être réalisé à moins de 25 mm du bord de la surface testée,
- Il est préférable de tracer un quadrillage de 25 mm à 50 mm de coté, et de considérer les intersections de ces lignes comme points d'impact de la tige de percussion.

- **Expression des résultats**

Le résultat de l'essai est la valeur médiane de l'ensemble des lectures effectuées, éventuellement corrigées afin de prendre en compte l'orientation du marteau conformément aux instructions délivrées par le fabricant, et exprimée sous forme de nombre entier.

Si plus de 20 % de l'ensemble des lectures effectuées sur une surface d'essai donnée différent de la valeur médiane de plus de six unités, l'ensemble des lectures doit être écarté.

L'indice de rebondissement ainsi obtenu est injecté dans le graphique donné pour le fabricant pour déduire la résistance du béton.

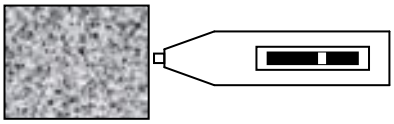


Figure II.30 : Essai scléromètrique.

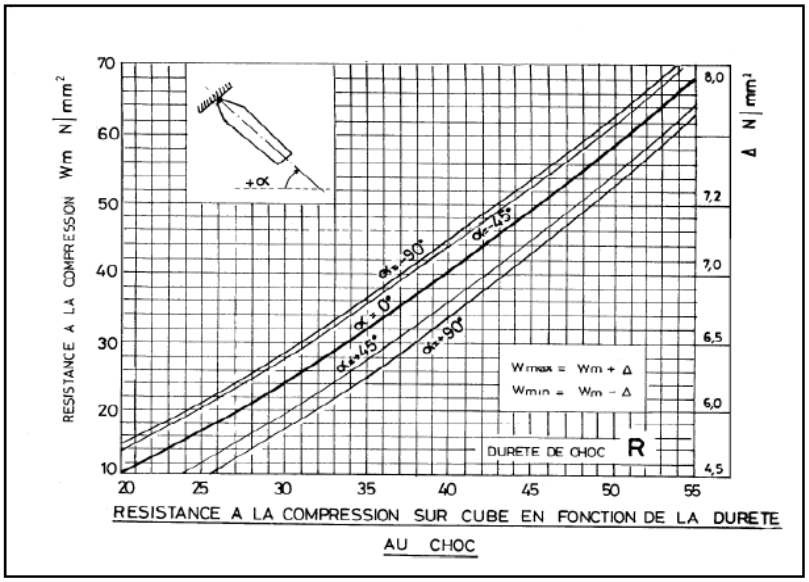


Figure II.31 : Courbe traduisant l'indice de rebondissement en résistance mécanique.

II.8.2.5. Auscultation dynamique

- **Objectif de l'essai**

Le but de l'essai est d'apprécier la qualité du béton d'un ouvrage selon la norme (NF P 18 - 418) **[72]**, sans procéder à un prélèvement d'éprouvette par carottage.

- **Principe de l'essai**

Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton ; cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton à un module d'élasticité plus important, donc à priori une résistance plus importante.

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler. Après avoir franchi une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores **t**.

- **Equipement nécessaire**

L'appareil comprend les accessoires suivants :

- Un générateur d'impulsions électriques,
- Paire de transducteurs,
- Un amplificateur,

- Un dispositif électronique de mesure de temps permettant de mesurer la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur - émetteur et son arrivée au transducteur - récepteur,
- Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse.

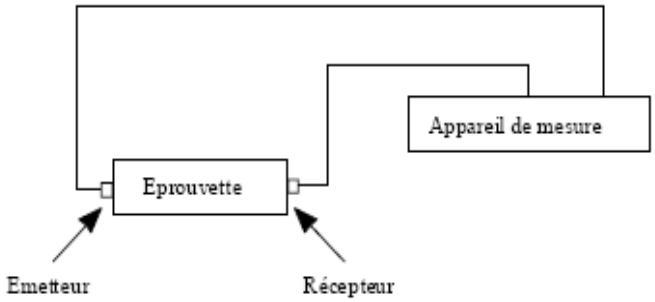


Figure II.32 : Essai ultrasonique.



Figure II.33 : Mesure de la vitesse du son.

- **Conduite de l'essai**

1- Préparation de l'éprouvette

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l 'appareil est bien appliqué contre la surfa+ce à tester.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

2- Point de mesure

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, …) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0,5 m, le cas des petits éléments (poteaux, poutres…) les mesures se font en six points.

3- Disposition du transducteur

Il est possible de mesurer la vitesse de propagation du son en plaçant les deux transducteurs sur des faces opposées « Transmission directe », sur des faces adjacentes « Transmission semi-directe » ou sur la même face « Transmission indirecte ou transmission de surface » en cas de structure ou d'éprouvette de béton.

- **Expression des résultats**

La vitesse de propagation du son à travers le béton est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{……EquII.8}$$

Ou :

V : est la vitesse de propagation du son, en km/s ;

L : est la longueur de parcours, en mm ;

T : est le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en μs.

- **Classification du béton d'après la vitesse du son**

Tableau II.6: Vitesse du sonpar essai ultrasonique.

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

II.8.2.6. Module d'élasticité

Avant d faire cette essais il est recommander de déterminer la force de compression maximal F_{cm} force avant rupture sur une éprouvette de la même série que celle utilisée pour la détermination du module d'élasticité selon la norme (NA 437)**[73]**.



FigureII.34 : Mesure des déformations en fonction des charges appliquées.

- Mettre en marche la presse et amener le plateau supérieur de la presse en contact avec l'éprouvette habillée avec l'étrier ;
- Fixer le taux de charge de la presse a 240 kPa±30Pa /s. durant l'essai la presse doit fonctionner en continue avec un taux de charge constant ;
- Mettre en marche le comparateur et l'initialiser : la valeur afficher par le comparateur doit être nulle ;
- Charger l'éprouvette une 1^{ere} foi sans noter les résultats jusqu'à obtenir un déplacement du comparateur ε= 0.01mm. si le comportement du comparateur et les valeurs afficher du déplacement semblent anormales, revoir la position et la fixation du comparateur. Décharger l'éprouvette ;
- Réaliser un tableau comme si dessous pour noter les déplacements du comparateur ε en fonction de la charge F :

Tableau II.7 : Résumé des résultats obtenus.

F(kN)	ε(mm)	ΔL(mm)	σ(KPa)	$\Delta L/L_0$

- Commencer la mise en charge de l'essai : pour une charge stabilisée donnée, relever la valeur du comparateur ;
- Faire de même avec d'autre valeur de charges relever en particulier la valeur pour laquelle ε=0.005 mm et le déplacement du comparateur pour une charge F=0.4 F_{cm} ;
- Recommencer une série de mesure sur une autre éprouvette en notant les mêmes charges que précédemment ;
- A la fin faire la moyenne des déplacements obtenus sur les deux éprouvettes.

La valeur théorique du module d'élasticités calculé comme suit :

$$E_{theo}= 1100\sqrt[3]{fc_{28}} \ldots\ldots\ldots \text{EquII.9}$$

II.8.2.7.Absorption d'eau:

Cet essai a été choisi car il permet d'obtenirdes mesures quantitatives sur la structure poreuse d'un béton. L'essai est réalisé conformément à la norme (EN 13057)**[74]** sur des tranches de BCR obtenues par sciage des demi-cylindres.



Figure II.35: Préparation des tranches pour l'essai d'absorption d'eau.

Le résultat est la moyenne de la mesure sur deux éprouvettes testées pour chaque composition. À la fin de la cure, les éprouvettes sont séchées dans une étuve ventilée à 40 ± 5 °C pendant 7 jours au moins et jusqu'à poids constant.

Après séchage, la périphérie (face latérale) de l'éprouvette est surfacée de peinture époxy et, après séchage, l'éprouvette de béton est posée sur sa base sur des cales d'au moins 1 cm d'épaisseur, dans un bac où le niveau d'eau est maintenu constant (environ 4 à 6 mmau-dessus de la base de l'éprouvette) pendant toute la durée d'essai (environ 24 heures). Les éprouvettes sont soumises à une absorption d'eau unidirectionnelle. A intervalle de temps précisé par la procédure utilisée, on relève le poids de chaque éprouvette après l'avoir essuyée au moyen d'un chiffon humide. L'absorption capillaire est exprimée en kg/m^2 par le rapport de l'augmentation de masse ($m_{initiale} - m_{finale}$) à la section (m^2)de la face inférieure de l'éprouvette, en contact avec l'eau.

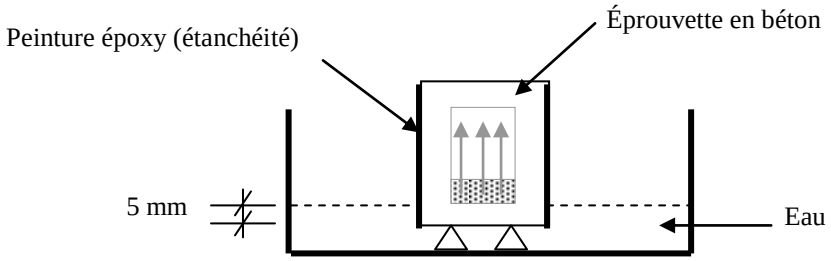


Figure II.36 : Principe de l'essai.



Figure II.37 : Essai d'absorption d'eau.

II.8.2.8. Variations dimensionnelleset massiques

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Cesdéformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation,qui se traduit par un rétrécissement des éléments en mortier. Le retrait dépend nonseulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussides constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques(7x7x28 cm) conformément à la norme [NF P 18-427]**[75]**. Ces éprouvettes aunombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un rétractomètre (figure II.38) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait àtout moment à court terme et long terme (du 1jours jusqu'à90jours). Laconservation des éprouvettes est faite dans l'air.



FigureII.38: Rétractomètre pour la mesure des déformations.

a) Mesure des variations de longueur

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'unemesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de0,03mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'enrechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots,… etc.).Et sielle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métalde 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots del'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations detempérature qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations).

b) Mesure des variations de masse

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1g chaque éprouvette àchacun des temps utilisés pour mesurer le retrait ou le gonflement.



Figure II.39 : Pesé des éprouvettes destinées au retrait et gonflement.

c) Expression des résultats

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L_0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges etpour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement àcet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

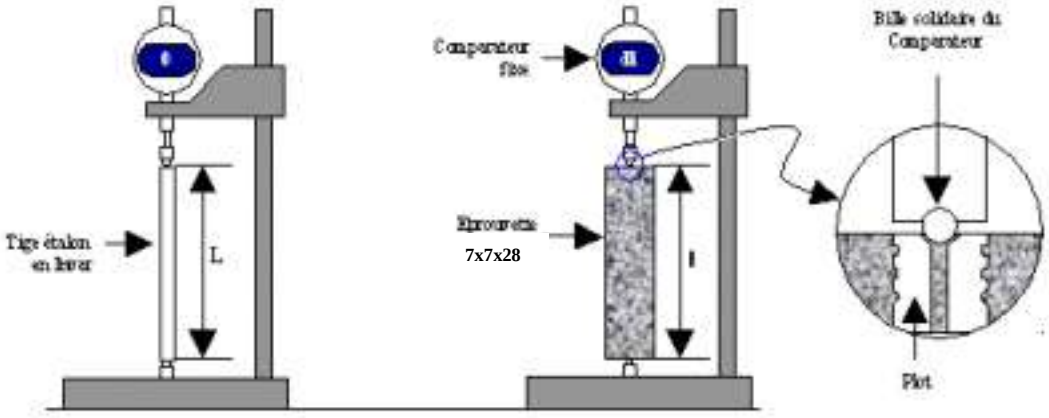


Figure II.40: Principe de mesure du retrait.

d) Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon enInvar de longueur L = 280mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t) \quad \text{.....EquII.10}$$

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps tchoisi d'origine ; en général cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection deséprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

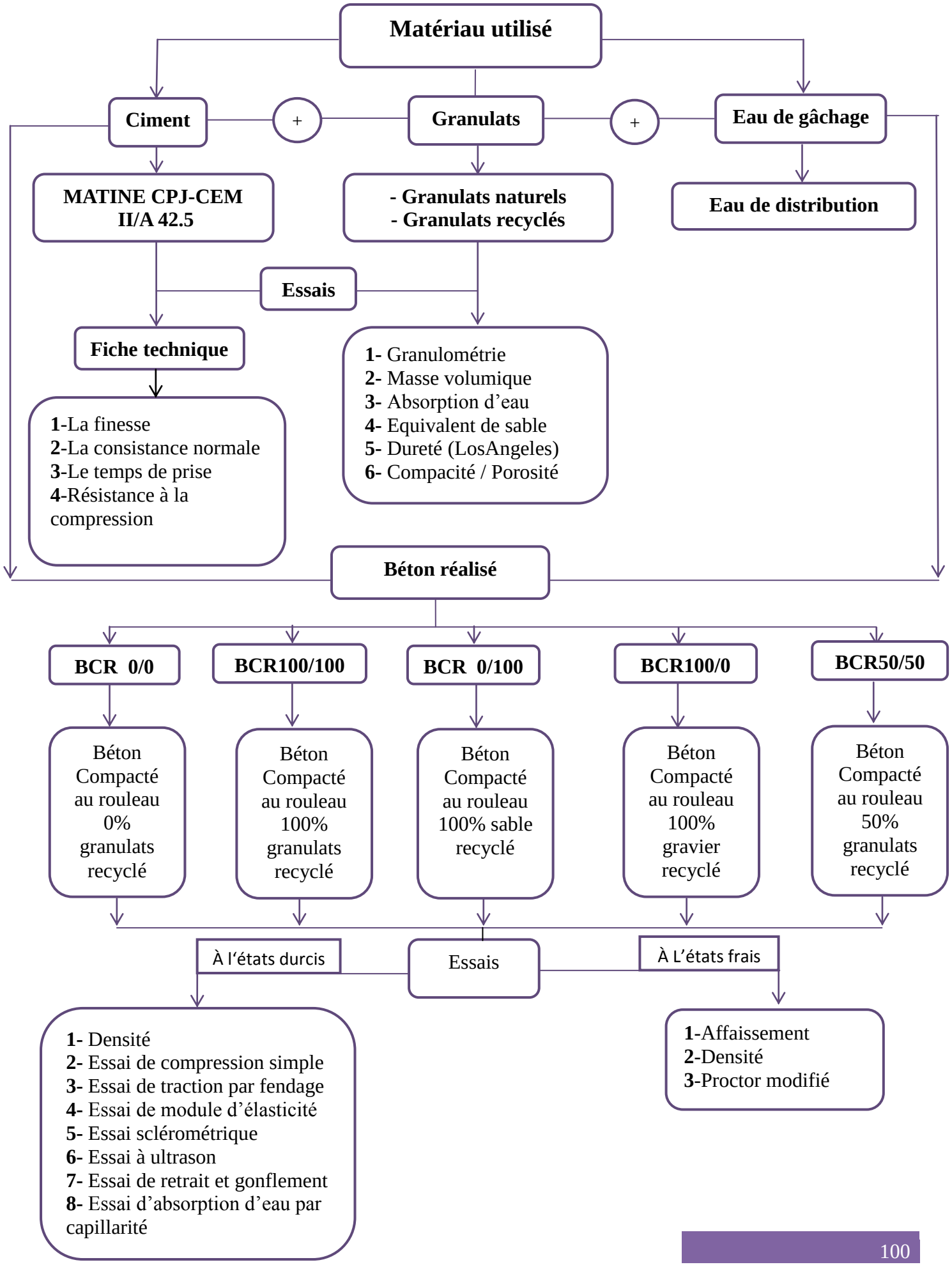
$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad \text{.....EquII.11}$$

La variation relative de longueur est généralement désignée parexpression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad \text{.....EquII.12}$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3éprouvettes issues du mêmemoule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air,Δl(t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservéedans l'eau ou le froid, Δl(t) peutêtre positif: il y a alors gonflement.

II.9.Variables étudiés



II.10. Conclusion

Dans toutes les recherches faites dans le domaine de Génie Civil. Les granulats et le béton, doivent subir des essais à fin de pouvoir interpréter les résultats par la suite.

Chapitre III

Résultats et interprétation



III.1. Introduction

Les résultats des différents essais qu'on a faits sur les granulats, le béton frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques de trois résultats d'essais.

III.2.Granulats

Les granulats sont soumis à différents essais afin d'assurer qu'ils sont conforme aux normes en vigueurs. Les résultats de ses essais sont récapitulés dans les tableaux suivants :

III.2.1. Analyse granulométrique

Afin de tracer la courbe granulométrique des sables, ils sont soumis au tamisage et les résultats trouvés des tamisât et leurs module de finesse (MF) sont récapitulés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1 : Analyse granulométriques des différents sables.

Diamètre (mm)	SN $_{0/3}$	SR $_{0/4}$	S $_{roulé}$	SN $_{corr}$	SR $_{corr}$
5	99,56	100	100	99,43	99,98
4	98,49	98,8	100	98,3	99,91
3,15	94,02	90,15	100	94,71	93,86
2	77,24	66	99,99	81,72	79
1,25	52,23	41,75	99,98	65,54	67,11
0,63	27,2	22,4	99,97	63,58	61,18
0,315	13,32	11	98,52	36,57	48,78
0,2	8,46	6,85	60,02	26,93	37,25
0,16	4,41	2,6	30,25	20,17	22,72
0,1	1,09	0,8	0,77	2,22	1,32
0,063	0,14	0,15	0,04	0,42	0,44
MF	**3,18**	**3,99**	**0,71**	**2,5**	**2,5**

A travers ces résultats trouvés, les courbes granulométriques des sables utilisés sont illustrées dans la figure III.1 suivante :

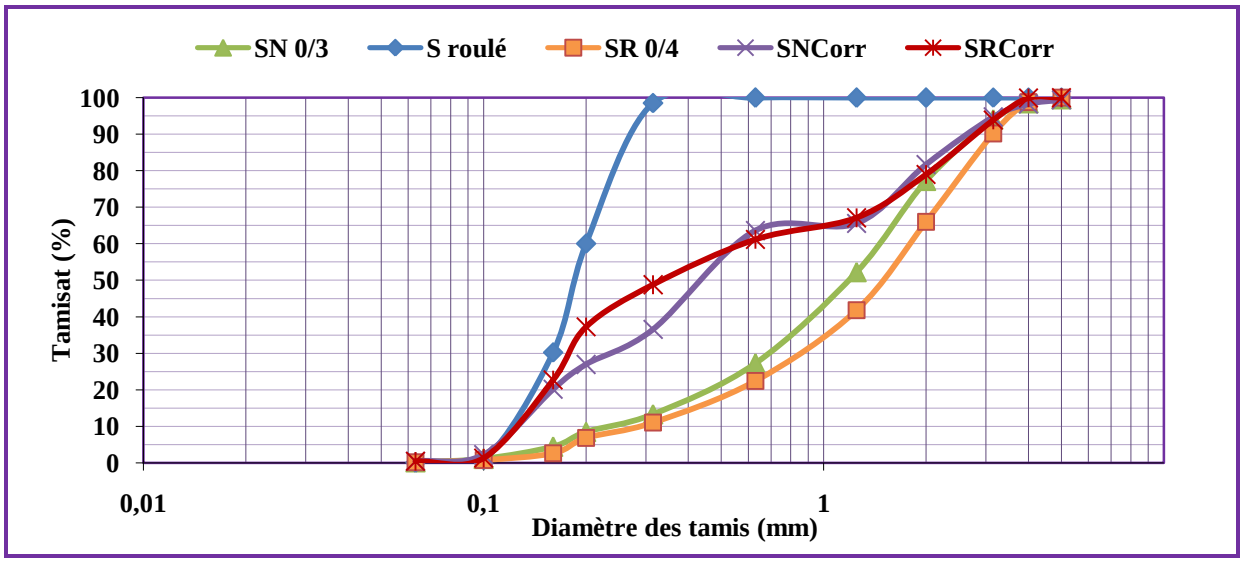


Figure III.1 : Courbe granulométriques des sables naturels et recyclés utilisés.

A travers ces résultats trouvés, on a trouvé que les sables concassée naturel et recyclé bitumineux ayant un module de finesse élevé donc ces deux sables sont grossier et bien étalé mais d'après le module de finesse du sable roulé, on peut dire que c'est un sable très fin et uniforme.

Puisque les sables utilisés sont grossiers on doit faire la correction des sables selon la méthode d'ABRAMS **[76]**, le module de finesse souhaité pour chacun des sables est de 2,5. On calcul les paramètres suivants :

1. Sable concassé naturel :

   S1 = 3,18-2,5=0,68

   S2 = 2,5-0,71=1,79

   S = S1 + S2 = 2, 47

   SN 0/3 = 72, 46 %

   $S_{roulé}$ = 27, 54 %

2. Sable recycle bitumineux:

   S1 = 3,99 - 2,5=1,49

   S2 = 2,5-0,71=1,79

   S = S1 + S2 = 3, 28

   SR 0/4 = 54, 57 %

   $S_{roulé}$ = 45, 43 %

Le sable recyclé est plus grossier que le sable naturel, le module de finesse du sable recyclé (MF = 3,99) est nettement plus élevé que celui du sable naturel utilisé (MF = 3,18).

D'après la figure III.2, il apparait que les granulats bitumineux recyclés sont peut comparables aux granulats naturels.

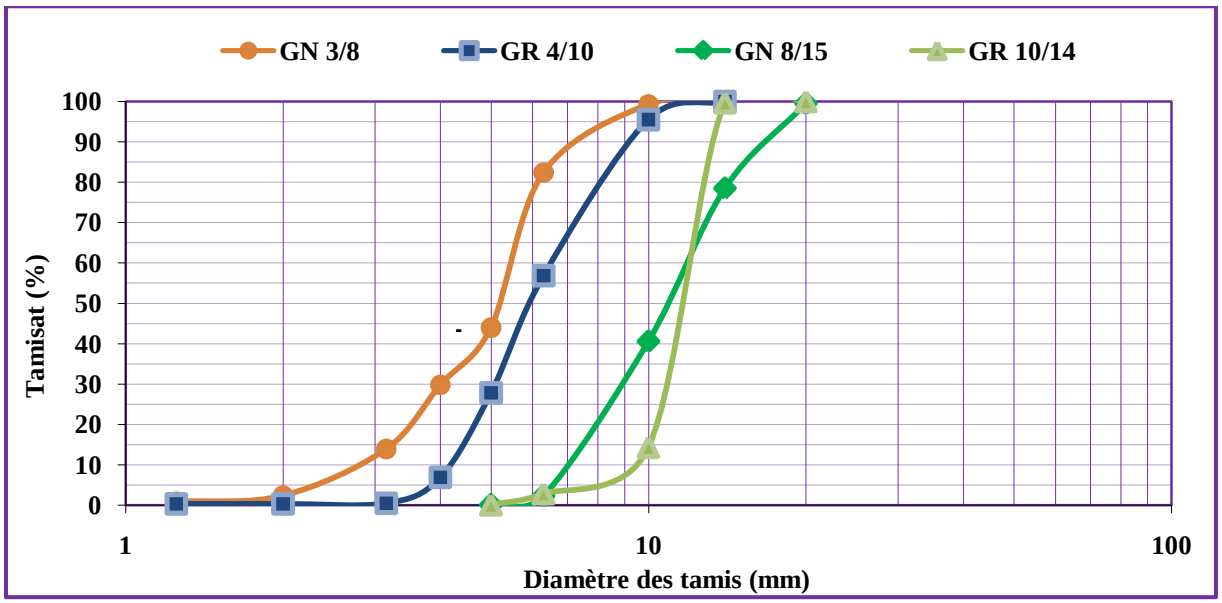


Figure III.2 : Courbe granulométriques des graviers naturels et recyclés utilisés.

III.2.2. Masse volumique

Les résultats trouvés sont résumés dans le tableau III.2 suivant :

Tableau III.2 : Masses volumiques des granulats utilisés.

Constituants	γ_{app} (kg/m^3)	γ_{abs} (kg/m^3)	Compacité $C = \gamma_{app}/\gamma_{abs}$	Porosité $P = 1 - C$
SN $_{0/3}$	1530	2631	0,581	0,419
SN$_{roulé}$	1435	2613	0,549	0,451
GN $_{3/8}$	1373	2666	0,515	0,485
GN $_{8/15}$	1336	2668	0,500	0,500
SR $_{0/4}$	1389	1818	0,764	0,236
GR $_{4/10}$	1157	2140	0,540	0,459
GR $_{10/14}$	1386	2300	0,602	0,397

On remarque que les masses volumiques des granulats recyclés bitumineux sont plus faibles que celles des granulats naturels utilisés. Une diminution d'environ 5 % pour les graviers et jusqu'à 10 % pour le sable. Cette diminution est comparable aux résultats d'autres recherches **[77, 78, 79, 80, 81].**

III.2.3. Absorption d'eau

Les résultats sont récapitulés dans le tableau III.3.

Tableau III.3: Pourcentage d'absorption d'eau des granulats utilisés.

Constituants	Absorption (%)
$SN_{0/3}$	0,38
$S_{roulé}$	0,02
$GN_{3/8}$	0,19
$GN_{8/15}$	0,52
$SR_{0/4}$	0,91
$GR_{4/10}$	0,99
$GR_{10/14}$	0,74

On remarque que ces granulats recyclés absorbent une très faible quantité d'eau en comparant avec les granulats naturels, le coefficient d'absorption d'eau dépend de la granulométrie et il est plus élevée pour le petit gravier et le sable par rapport aux gros gravier.Fumoto et al[82], concluaient que l'absorption élevée du sable recyclé, diminue la résistance du béton recyclé et augmente son retrait.

III.2.4. Equivalant de sable

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Equivalant de sable.

Constituants	Propreté	
	ESP (%)	**ESV (%)**
$SN_{0/3}$	88,34	96,11
$S_{roulé}$	61,73	90,54
$SR_{0/4}$	76,54	78,21

On remarque une diminution de l'équivalent de sable d'environ 16 % pour le sable recyclé par rapport à celui du sable naturel, ceci est due sans doute à la poussière de fraisage collée aux particules de grains recyclés. La valeur de l'équivalent de sable dépasse les 70% pour le sable naturel et recyclé, selon la même norme utilisée, ces sables sont considérés comme propres.

III.2.5. Dureté (Los – Angeles)

Les résultats obtenus sont dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Dureté des granulats utilisés.

Constituants	Los - Angeles (%)
GN 3/8	27,92
GN 8/15	24,60
GR 4/10	28,06
GR 10/14	27,58

On remarque une augmentation de dureté par rapport aux granulats naturels environ 5,50 %. La couche du bitume qui recouvre la surface des granulats recyclés peut être à l'origine de cette différence de dureté. Les granulats recyclés bitumineux utilisés sont plus durs que les granulats naturels (27 % en moyenne).

III.3. Compacité des granulats et de ciment selon René LCPC

III.3.1. Compacité du ciment

Pour le ciment la compacité trouvée est donnée dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Compacité du ciment.

d (kg/m^3)	**3100**	**C = 0,493**
Pe (g)	165,4	
Pp (g)	500	

III.3.2. Compacité des granulats

Les valeurs de compacités trouvées (C_{exp}) sur deux échantillons sont récapitulées dans le tableau III.1, puis on fait la comparaison entre ces valeurs par les compacités trouvées théoriquement ($C_{théo}$):

Tableau III.7 : Compacité des granulats.

	S roulé	**SN 0/3**	**SR 0/4**	**SN corr**	**SR corr**	**GN 3/8**	**GN 8/15**	**GR 4/10**	**GR 10/14**
Masse(kg)	3	3	3	3	3	7,5	7,5	7,5	7,5
S (m^2)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
h (cm)	9,1	8,25	9,60	8,05	8,30	23,05	23,75	28,2	30,1
V_{fin}(m^3) .10^{-3}	1,82	1,65	1,92	1,61	1,66	4,61	4,75	5,64	6,02
ρ_s (kg/m^2)	2613	2631	1818	2678	2040	2660	2668	2140	2300
C_{exp}	0,630	0,770	0,859	0,695	0,886	0,611	0,591	0,621	0,541
$C_{théo}$	0,549	0,581	0,764	/	/	0,515	0,500	0,540	0,602

Les valeurs de compacité (C_{exp} et $C_{théo}$) sont proches mais reste toujours les compacités trouvés par la méthode RENE sont plus précis puisque les granulats sont bien compacté, cela est confirmé par **[28, 83]**.

III.4. Identification des paramètres du logiciel René LCPC

III.4.1. Constituants

Si on ouvre le logiciel René - LCPC, il apparait la fenêtre principale suivante :

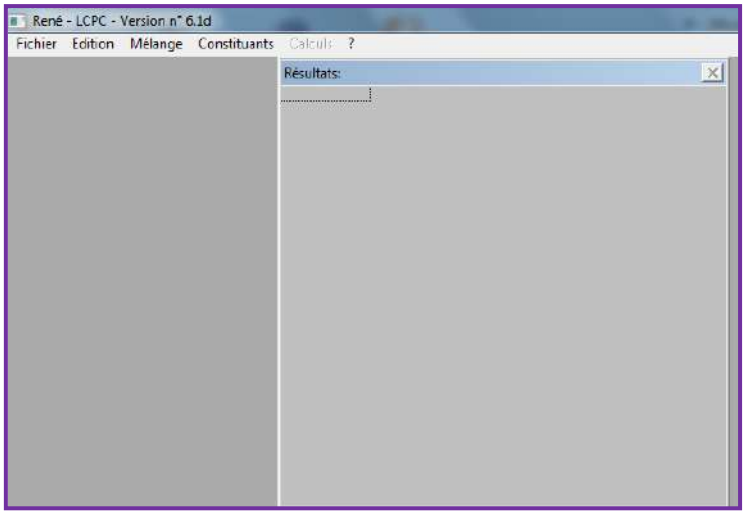


Figure III.3: Fenêtre principale du logiciel RENE - LCPC.

On passe à la case **« constituants »**, on peut créer un nouveau dossier **« settari.mat »** contenants tous les constituants disponibles pour nos mélanges.

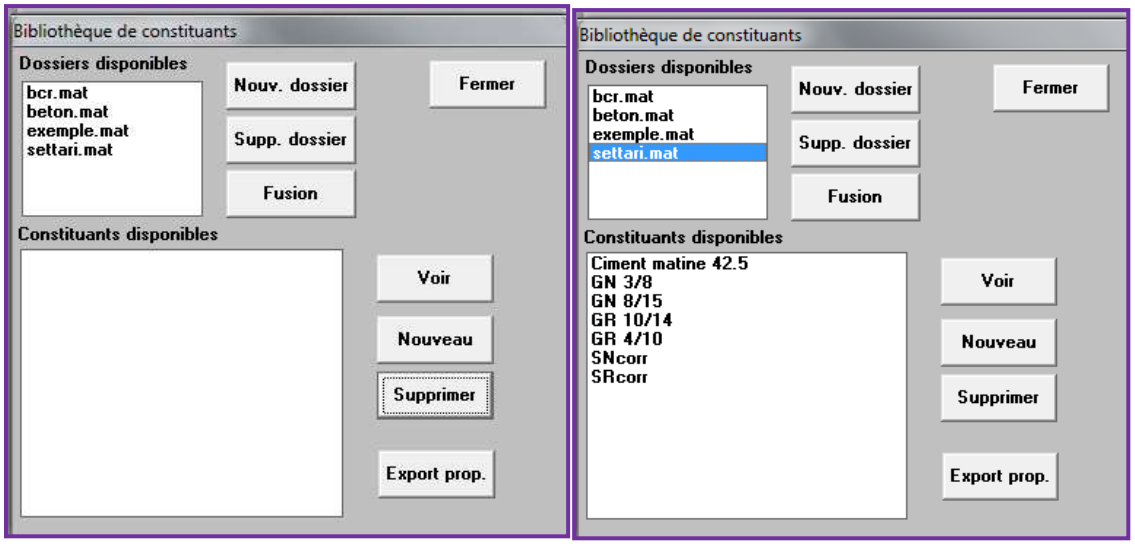


Figure III.4 : Fenêtre bibliothèque des constituants.

Alorspour faire entrer ces constituants, il suffit de cliquer sur **« nouveau »**, pour entrer les propriétés des constituants (tamisat, masse volumique) puis on clique sur **« ok »** pour enter la compacité (granulats, ciment) trouvé par RENE.

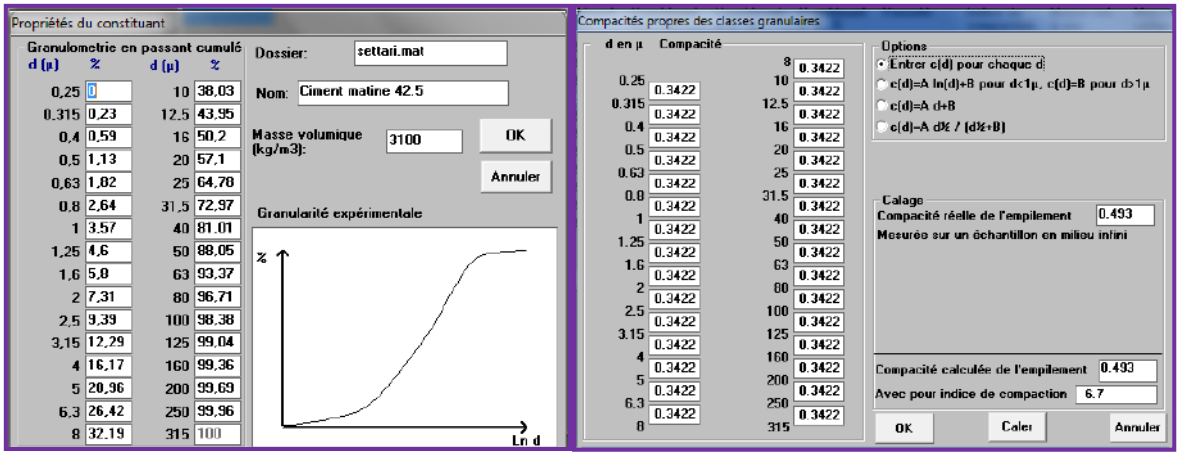


Figure III.5 : Fenêtres propriété et compacité du ciment.

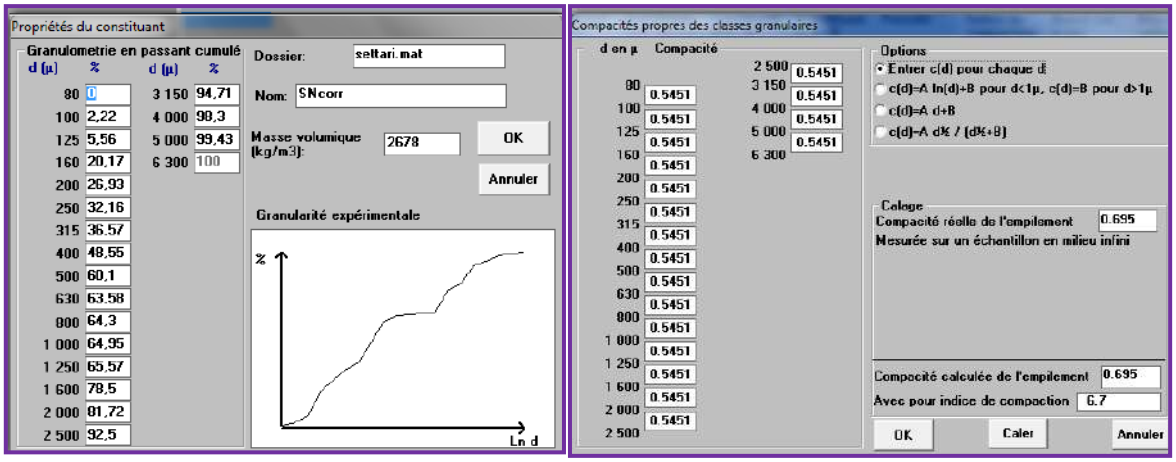


Figure III.6: Fenêtres propriété et compacité du sable naturel corrigé.

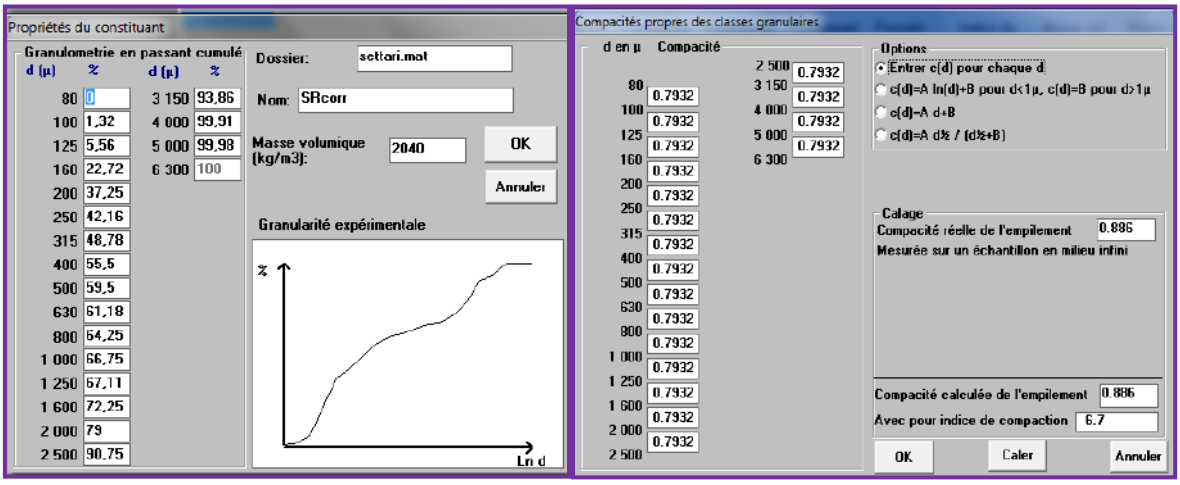


Figure III.7: Fenêtres propriété et compacité du sable recyclé corrigé.

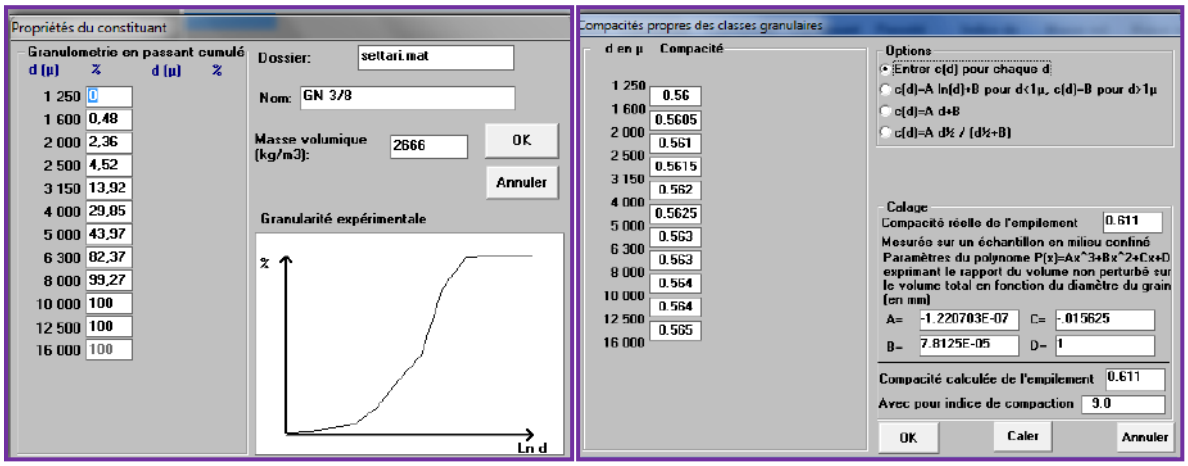


Figure III.8: Fenêtres propriété et compacité du gravier naturel 3/8.

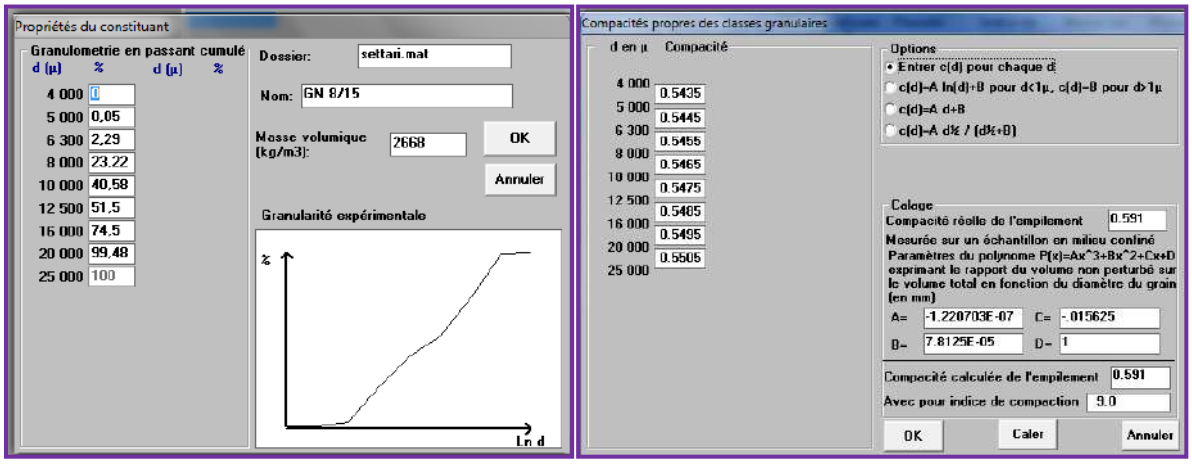


Figure III.9: Fenêtres propriété et compacité du gravier naturel 8/15.

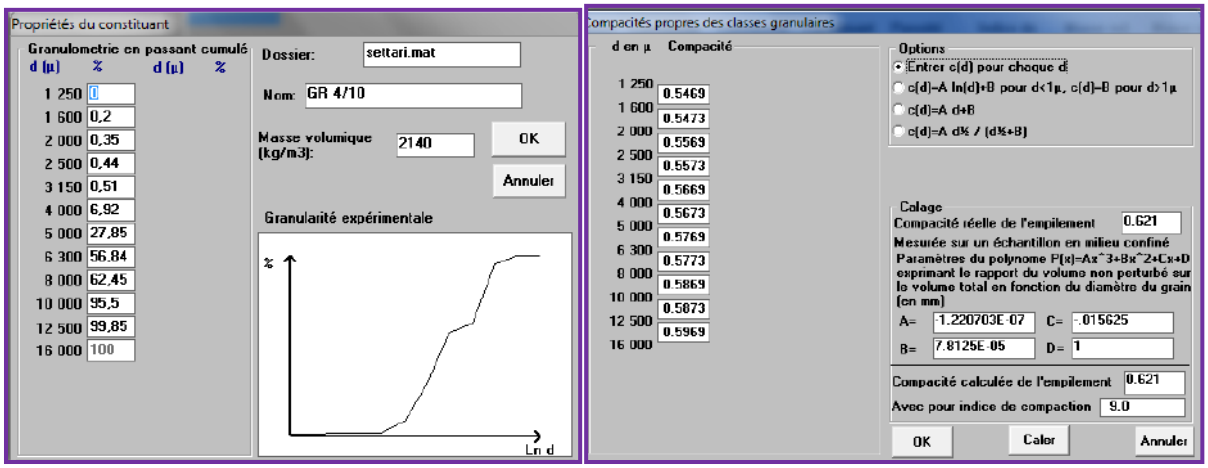


Figure III.10: Fenêtres propriété et compacité du gravier recyclé 4/10.

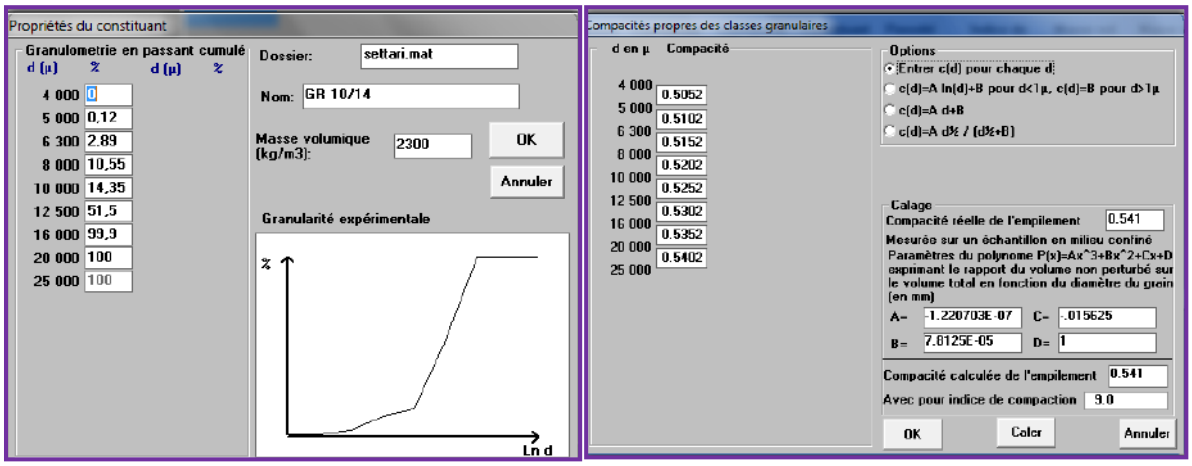


Figure III.11: Fenêtres propriété et compacité du gravier recyclé 10/14.

III.4.2. Mélange

Si on termine d'entrer tous les constituants nécessaire, on passe à déterminer les mélanges. On doit choisir notre dossier (settari.mat) qui contient tous les constituants, puis il suffit de sélectionner les constituants de chaque mélange et on clique sur **« ok »**.

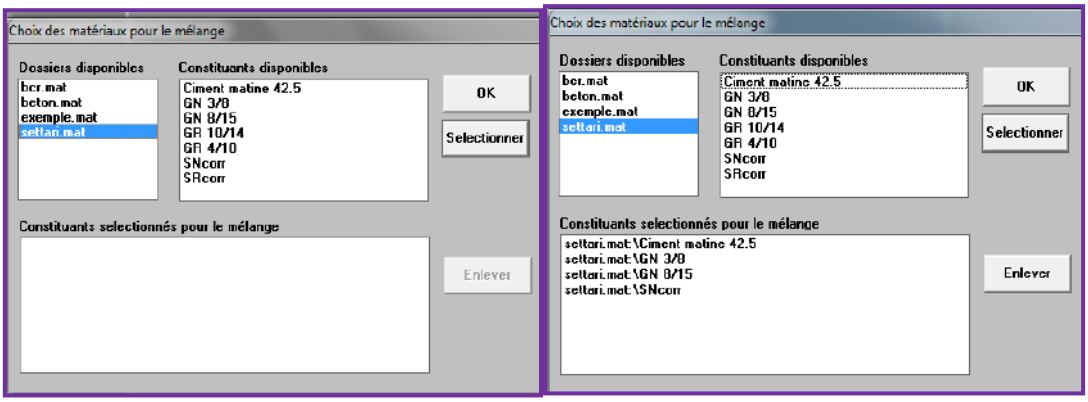


Figure III.12: Fenêtre choix des matériaux pour le mélange.

Automatiquement la fenêtre **« calcul »** sera activée maintenant, qui a été initialement désactivée :

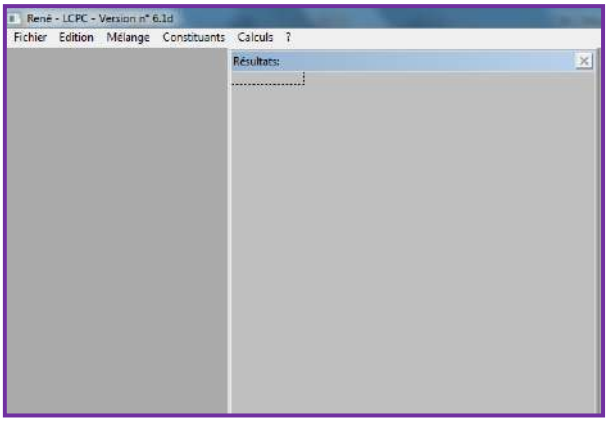


Figure III.13: Activation du calcul dans la fenêtre principale.

III.4.3. Calcul

Pour lancer le calcul d'un mélange, il faut choisir le milieu où on doit travailler (milieu confiné) dans un cylindre (ϕ16x32).

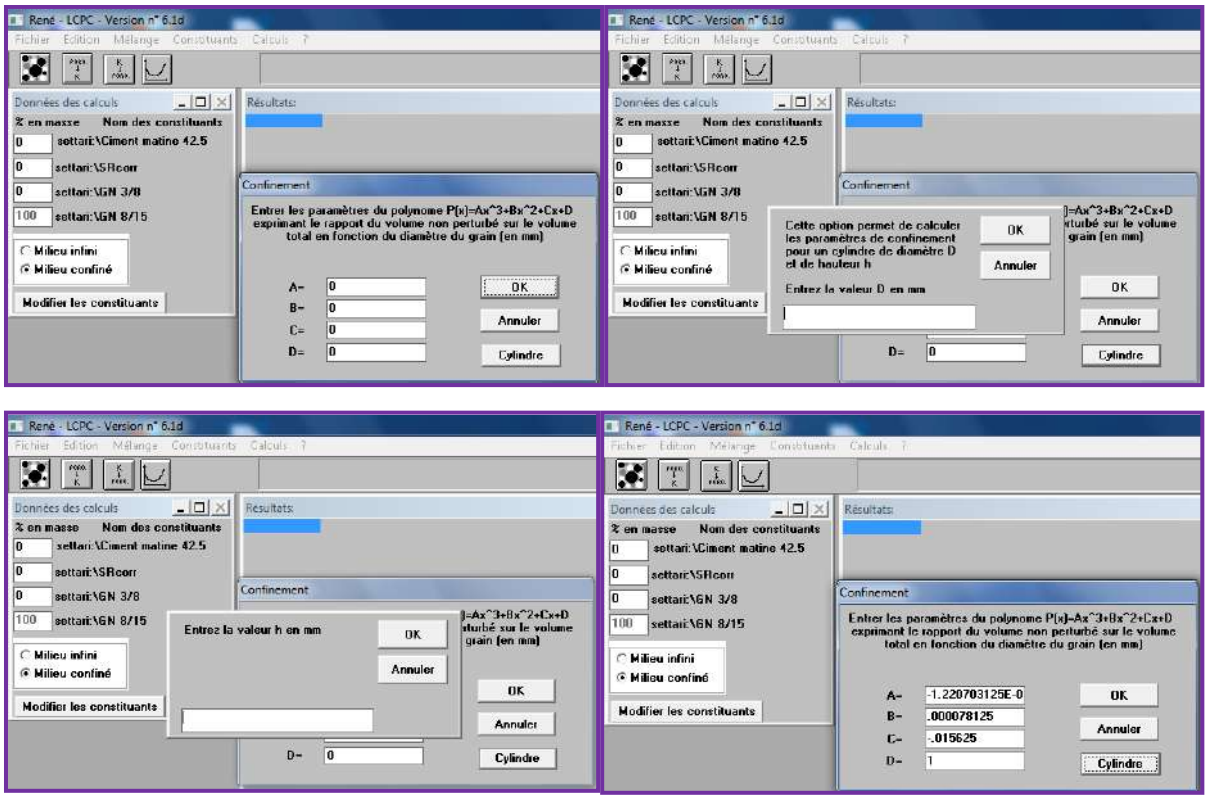


Figure III.14: Fenêtre de choix du milieu confiné.

Donc il suffit d'entrer le diamètre et la hauteur du cylindre, puis cliqué sur **« ok »**. Ensuite on choisit le 4ème Bouton « Optimisation d'un mélange binaire » (voir figure III.15)et faire varier le pourcentage de l'un des constituants en valeur croissante avec un indice de compacité égale à 9, et à chaque fois on note la porosité minimale, à la fin on choisit le mélange qui nous a donné l'optimum des porosités minimal.

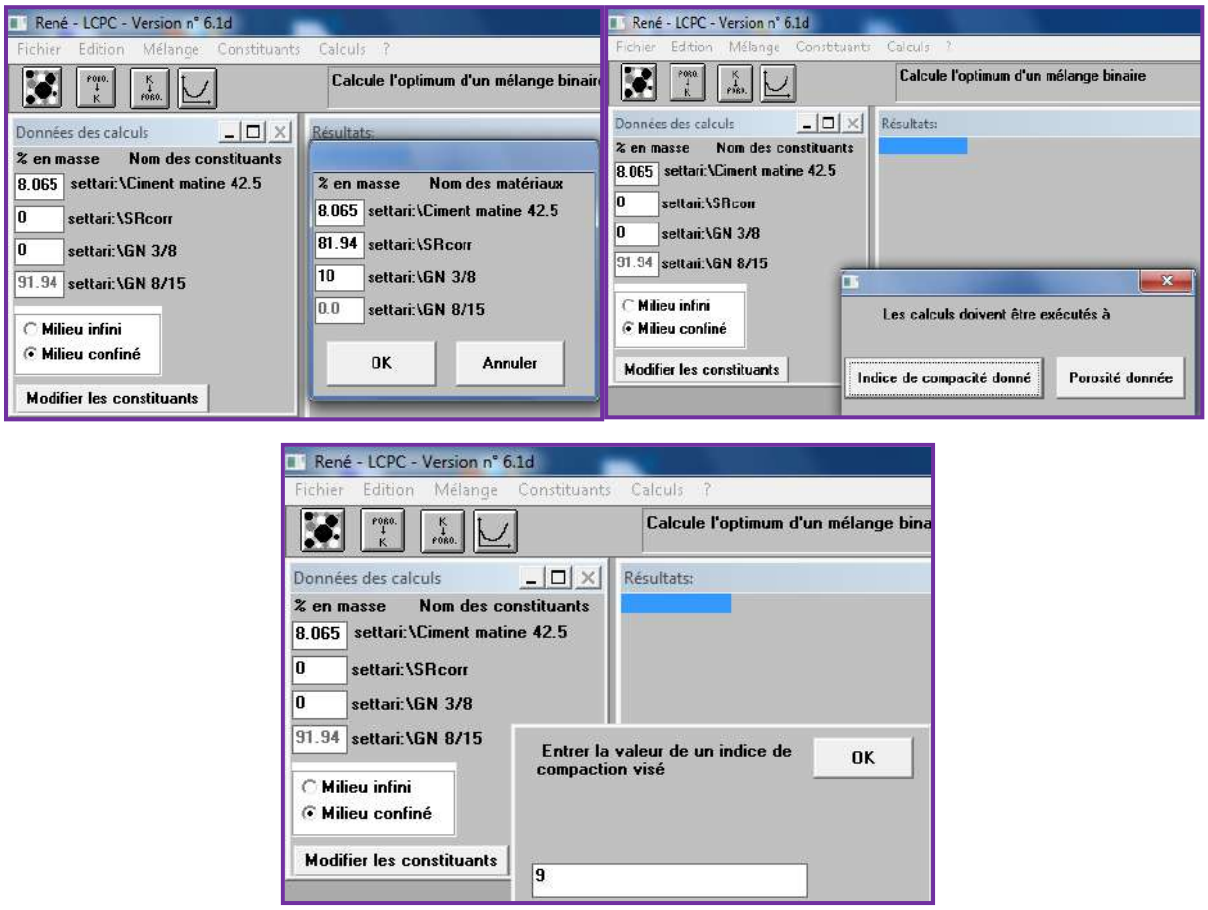


Figure III.15: Fenêtre calcule de l'optimum d'un mélange binaire.

III.5. Optimisation de la porosité minimale des mélanges

Après plusieurs propositions faites sur la variation en pourcentage de l'un des constituants d'un mélange, dans notre cas on a pris les résultats de la variation du gravier 3/8 et on a choisis ensuite le minimum des porosités trouvées entre plusieurs mélanges, comme dans plusieurs recherches faites sur la porosité minimale des mélanges **[28, 29],** les résultats trouvés sont donnés par les figures III.16 à III.25.

III.5.1. Optimisation de la porosité minimale du BCR 0/0

La figure III.16 résume la porosité minimale trouvée avec les différents pourcentages des constituants d'un BCR 0/0.

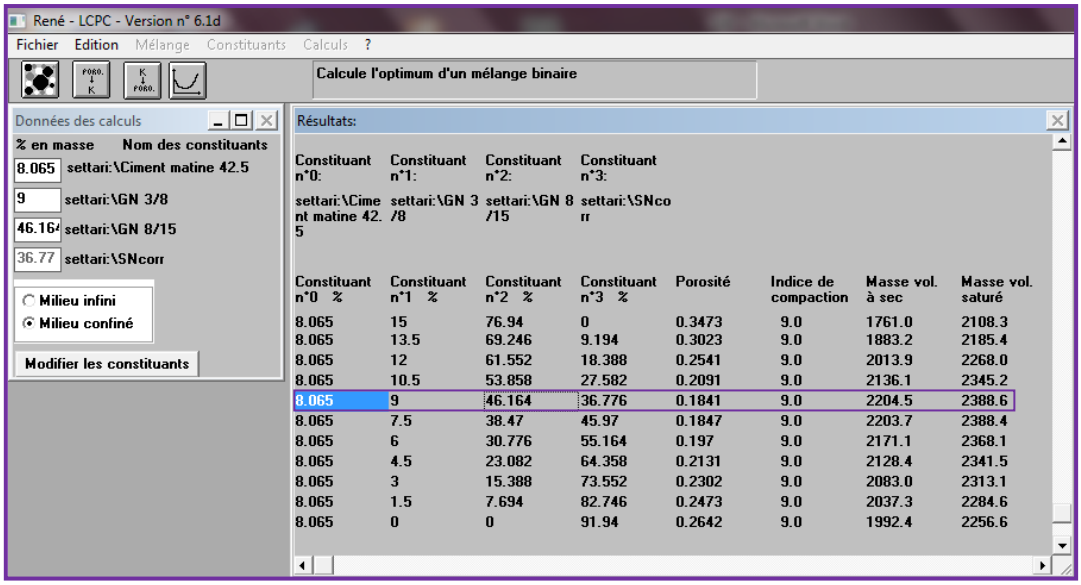


Figure III.16: Optimisation de la porosité minimale du BCR0/0 par René - LCPC.

La porosité minimale du mélange BCR 0/0 (BCR avec 100% granulats naturels) est de 0,1841correspond aux pourcentages volumiques suivants :

Ciment = 8,065 %

Gravier 3/8 = 9 %

Gravier 8/15 = 46,164 %

Sable naturel corrigé = 36,776 %

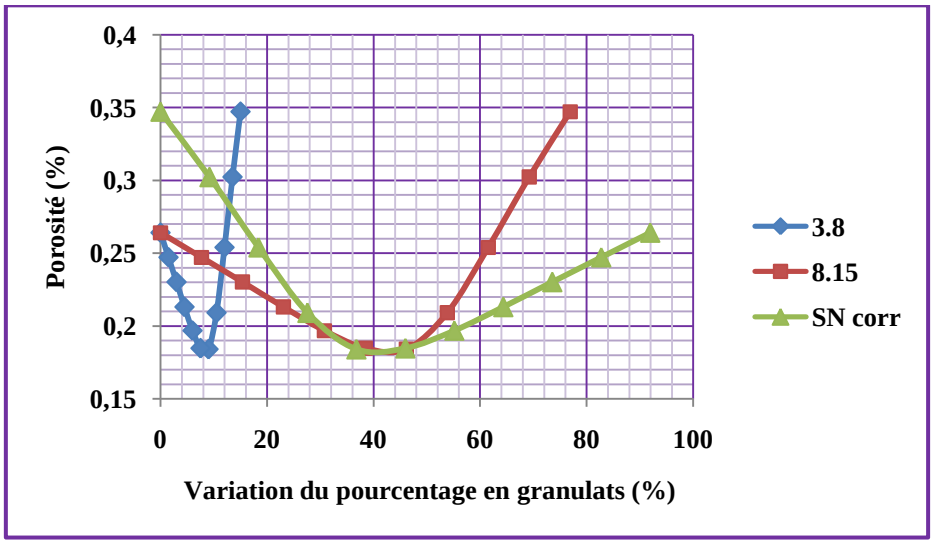


Figure III.17: Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR0/0.

III.5.2. Optimisation de la porosité minimale du BCR 50/50

La figure III.18 résume la porosité minimale trouvée avec les différents pourcentages des constituants d'un BCR 50/50.

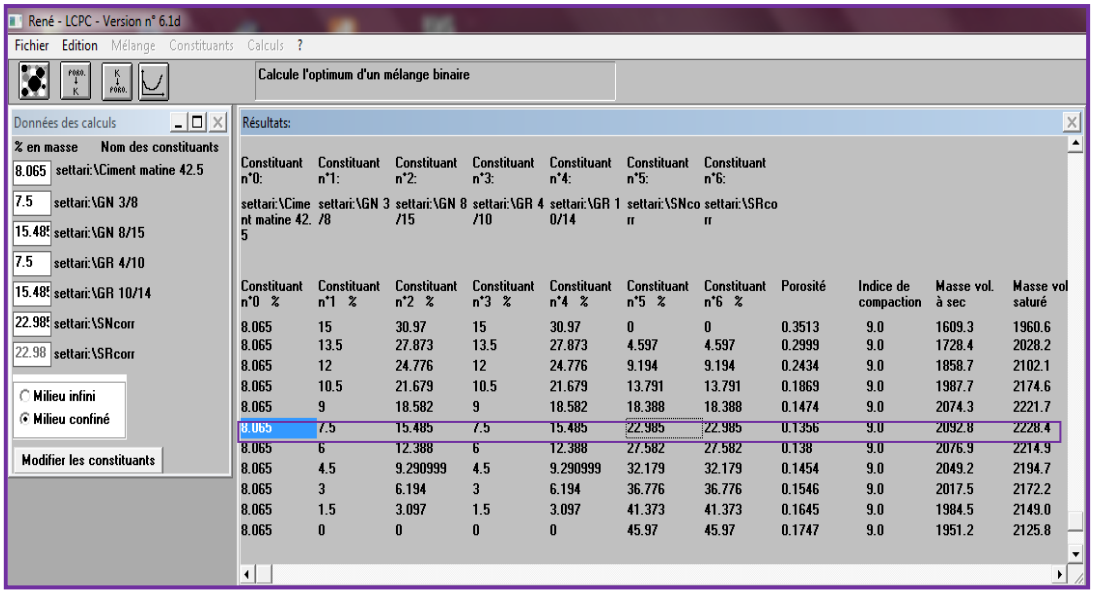


Figure III.18: Optimisation de la porosité minimale du BCR50/50 par René - LCPC.

La porosité minimale du mélange BCR 0/100 (BCR avec 50% granulats recyclé bitumineux) est de 0,0932 correspond aux pourcentages volumiques suivants :

Ciment = 8,065 %

Gravier 3/8 et 4/10 = 7,50 %

Gravier 8/15 et 10/14 = 15,485 %

Sable naturel et recyclé corrigés = 22,985 %

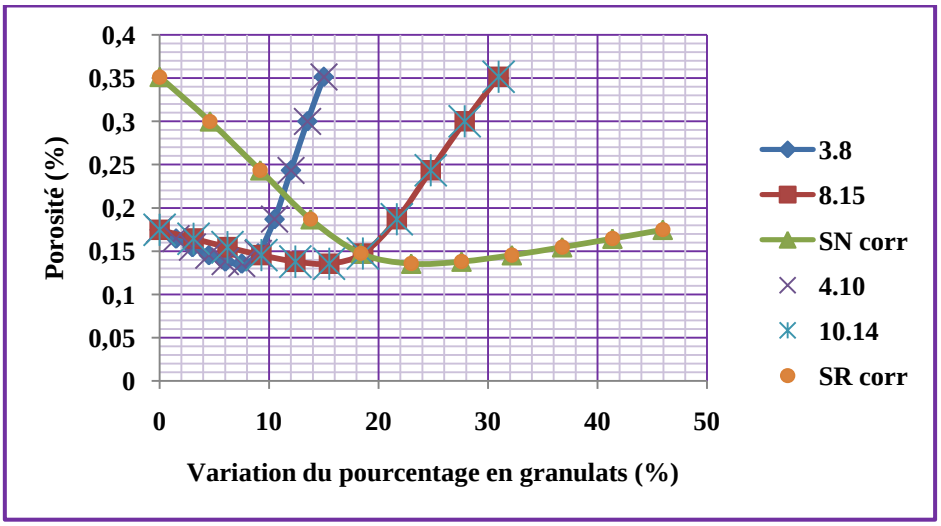


Figure III.19: Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR50/50.

III.5.3. Optimisation de la porosité minimale du BCR 100/100

La figure III.20 résume la porosité minimale trouvée avec les différents pourcentages des constituants d'un BCR 100/100.

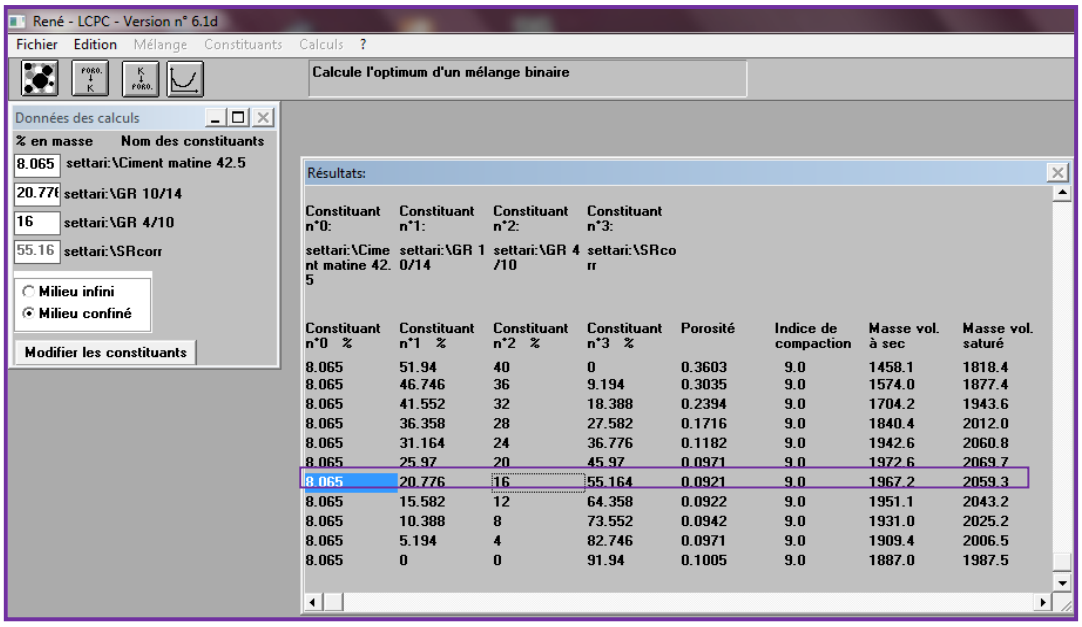


Figure III.20: Optimisation de la porosité minimale du BCR100/100 par René - LCPC.

La porosité minimale du mélange BCR 100/100 (BCR avec 100% granulats recyclés bitumineux) est de 0,0921 correspond aux pourcentages volumiques suivants :

Ciment = 8,065 %

Gravier 4/10 = 16 %

Gravier 10/14 = 20,776 %

Sable recyclé corrigé = 55,164 %

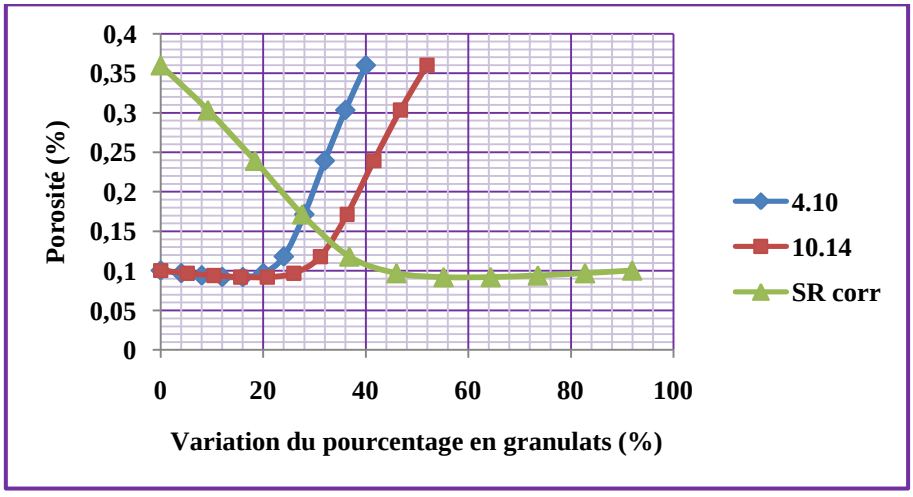


Figure III.21: Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR100/100.

III.5.4. Optimisation de la porosité minimale du BCR 0/100

La figure III.22 résume la porosité minimale trouvée avec les différents pourcentages des constituants d'un BCR 0/100.

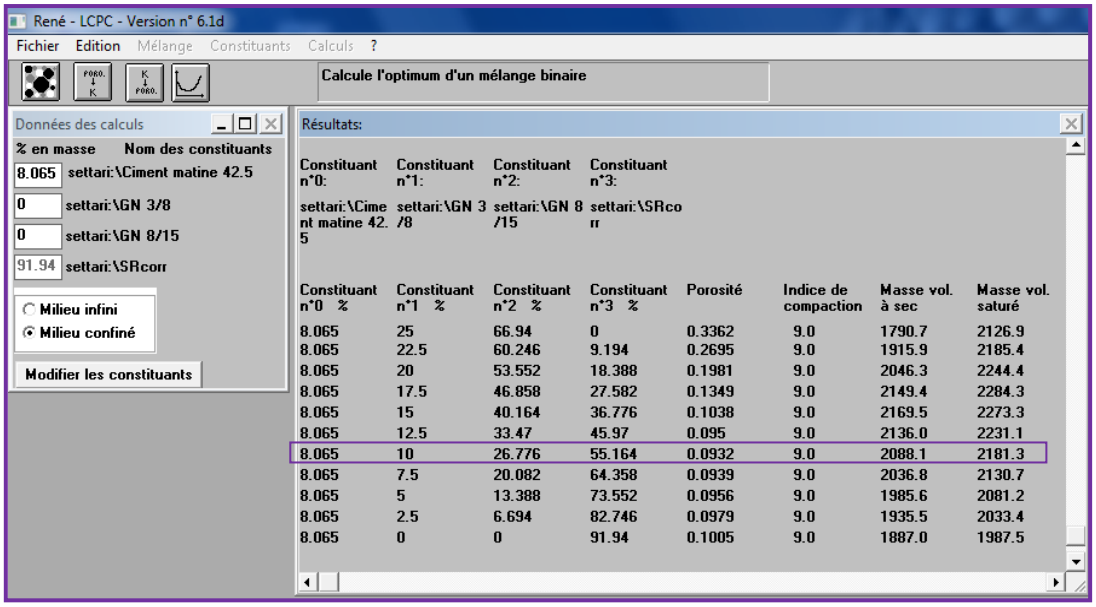


Figure III.22: Optimisation de la porosité minimale du BCR0/100 par René - LCPC.

La porosité minimale du mélange BCR 0/100 (BCR avec 100% sable recyclé bitumineux) est de 0,0932 correspond aux pourcentages volumiques suivants :

Ciment = 8,065 %

Gravier 3/8 = 10 %

Gravier 8/15 = 26,776 %

Sable recyclé corrigé = 55,164 %

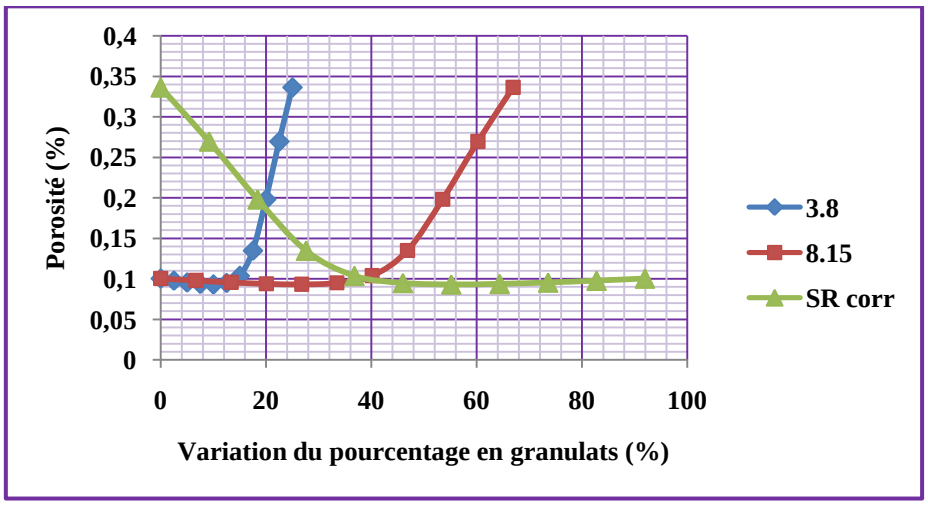


Figure III.23: Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR0/100.

III.5.5. Optimisation de la porosité minimale du BCR 100/0

La figure III.24 résume la porosité minimale trouvée avec les différents pourcentages des constituants d'un BCR 100/0.

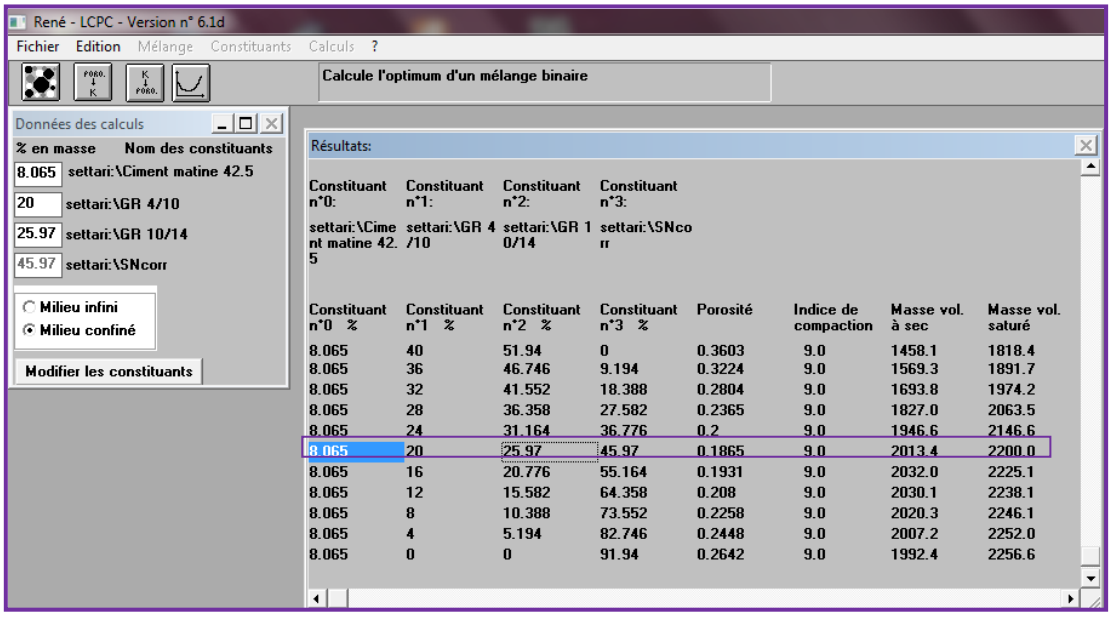


Figure III.24: Optimisation de la porosité minimale du BCR100/0 par René - LCPC.

La porosité minimale du mélange BCR 0/100 (BCR avec 100% sable recyclé bitumineux) est de 0,1865 correspond aux pourcentages volumiques suivants :

Ciment = 8,065 %

Gravier 4/10 = 20 %

Gravier 10/14 = 25,97 %

Sable recyclé corrigé = 45,97 %

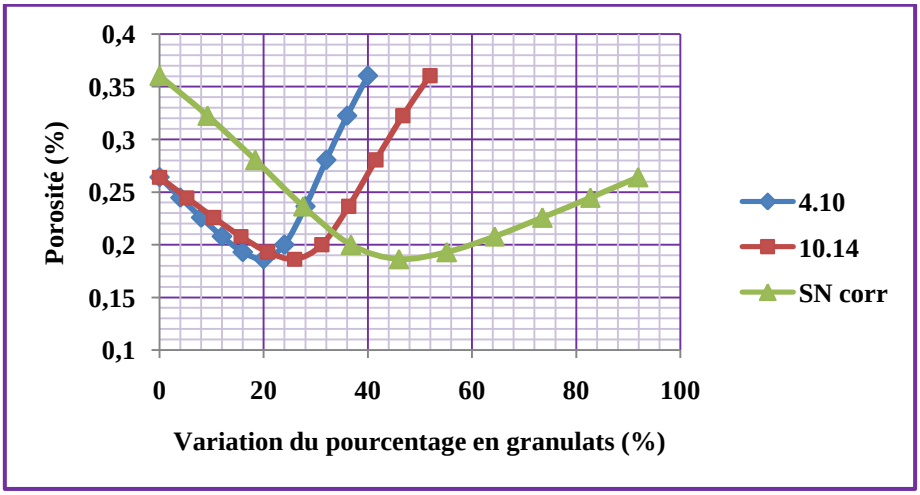


Figure III.25: Variation de la porosité minimale en fonction du pourcentage en granulats du BCR100/0.

III.6. Formulation du BCR par René LCPC

Après la fixation de tous les pourcentages en granulats (naturels et recyclés), on calcul les volumes nécessaires pour avoir 1 m^3 d'un béton compacté au rouleau. Le tableau III.8 résume les quantités de chaque type de BCR.

Tableau III.8: Composition pour 1 m^3 des différents BCR.

Quantité (kg/m^3)	Ciment	SN_{Corr}	$GN_{3/8}$	$GN_{8/15}$	SR_{Corr}	$GN_{4/10}$	$GN_{10/14}$	E_{ini}	E/C_{ini}
BCR 0/0		709,91	176,40	905,57	/	/	/		
BCR 50/50		473,054	156,707	323,788	392,531	125,789	279,128		
BCR 100/100	250	/	/	/	994,069	283,250	395,298	87,5	0,35
BCR 0/100		/	220,252	590,188	993,127	/	/		
BCR 100/0		858,55	/	/	/	313,66	437,73		

Puisquela composition de chaque mélange est obtenue, il faut fixer maintenant la quantité d'eau efficace pour le vrai compactage, donc on a besoin de faire l'essai Proctor modifié.

$$E_{eff} = E_{ini} + E_{Abs\ gr} + E_{ajouter} \quad \text{……Equ.III.1}$$

E_{eff} : Eau total pour le mélange ;

E_{ini} : Eau initialement calculé pour un rapport E/C fixe et égale à 0,35 ;

$E_{Abs\ gr}$: Eau absorbé par les granulats ;

$E_{ajouter}$: Eau à ajouter nécessaire pour faire le compactage ;

III.7. Proctor modifié

La figure III.26 présente l'optimum de chaque mélange, et on remarque bien qu'il y a une chute de densité entre un BCR naturel et un BCR recyclé environ 7,50 %.

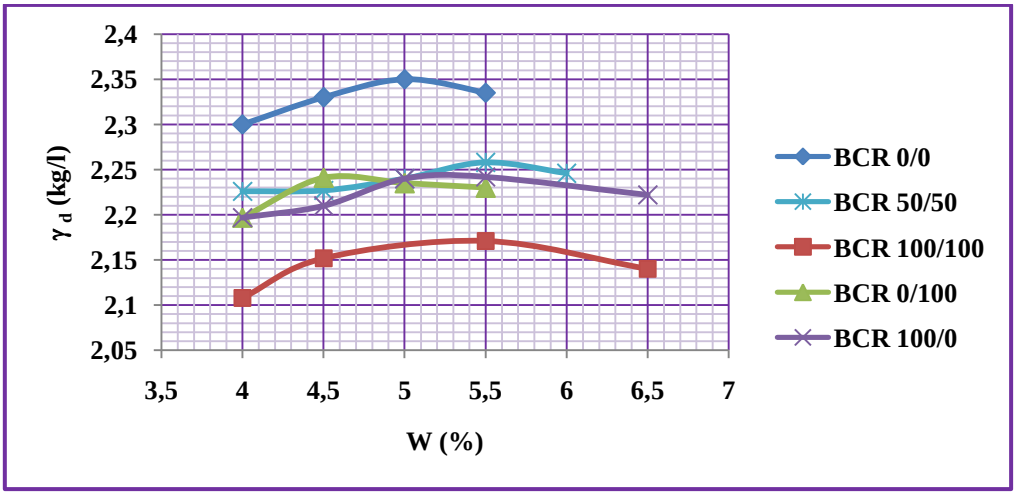


Figure III.26 : Résultats de l'essai Proctor modifié.

D'après la même figure, on peut lire les valeurs de W_{opt}qui correspond à la densité sèche maximale, ces optimums sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.9: Teneur en eau optimale.

	BCR 0/0	BCR 50/50	BCR 100/100	BCR 0/100	BCR 100/0
W_{opt} (%)	5,00	5,50	5,40	4,60	5,25
$\gamma_{d\ max}$ (kg/m^3)	2350	2258	2172	2243	2244

Alors on calcul la quantité d'eau efficace pour effectuer le compactage, un BCR optimal devrait comporter à peu près la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides du squelette granulaire et pour obtenir la maniabilité désirée, sachant que notre teneur en eau varie entre 4 % à 6,5%, Saadi [28] a montré qu'il faut une teneur en eau qui varie entre 3,5 % à 7 % pour la fabrication d'un BCR par des granulats naturels de différents carrières.

Tableau III.10: Le rapport E/C_{eff} pour chaque type BCR.

Quantité (kg/m^3)	E_{eff}	E/C_{eff}	G/S
BCR 0/0	102,094	0,40	1,52
BCR 50/50	110,054	0,44	1,02
BCR 100/100	103,821	0,41	0,68
BCR 0/100	94,464	0,37	0,81
BCR 100/0	97,646	0,39	0,87

Notre E/C_{eff} vari donc entre 0,37 à 0,44, DELHEZ Pascal **[38]** a trouvé un rapport qui vari entre 0,32 à 0,56. D'après COURARD et al [40] on trouvé un E/C optimal de 0,34.

- ***Vérification de la composition d'un BCR pour pavage :***

Dans le domaine des routes, on doit respecter les conditions suivantes **[27]:**

1. Ciment ϵ [200 à 350 kg/m^3] ;
2. E/C ϵ [0,25 à 0,50] ;
3. Ciment ϵ [12 à 16%] de la masse totale en constituants secs ;
4. Eau ϵ [4,5 à 6%] de la masse totale en constituants secs ;
5. Granulats ϵ [75 à 85 %] du volume total ;

La première et la deuxième condition sont vérifiées d'après les tableaux III.8 et III.10 pour les cinq mélanges à préparer et les autres conditions sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.11: Vérification nécessaire pour un BCR routier.

	Ciment (%)	Eau (%)	Granulats (%)	Vérification
BCR 0/0	12,24	5,00	80,75	Oui
BCR 50/50	12,49	5,50	81,62	Oui
BCR 100/100	13,00	5,40	82,28	Oui
BCR 0/100	12,17	4,60	82,44	Oui
BCR 100/0	13,44	5,25	80,54	Oui

III.8. Béton a l'état frais

III.8.1. Affaissement

Pour tous les types du BCR qu'on a préparé on a eu un affaissement nul et constant, c'est une condition principale qui caractérise un BCR **[25].**



Figure III.27 : Affaissement nul d'un BCR.

III.8.2. Densité

Les différentes mesures de densité faites sur le BCR à l'état frais sont données sur l'histogramme suivant :

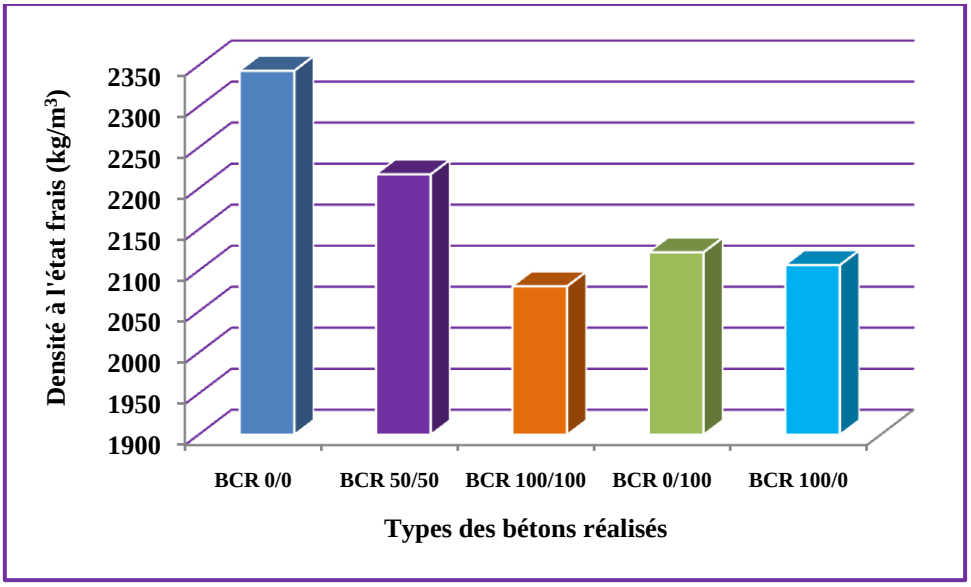


Figure III.28: Densité du BCRà l'état frais.

On remarque d'après la figure III.28 que la densité du BCR recyclé à l'état frais est nettement inférieure à la densité du BCR naturel. Une chute environ 11 % pour le BCR totalement fabriqué par des granulats recyclés, et environ 9,50 % pour les deux BCR fabriqués soit par un gravier recyclé ou par un sable recyclé seulement.

Mais la chute est de 5 % seulement pour le BCR réalisé par 50% granulats naturels et 50% granulats recyclés.

Donc cette chute en densité ayant une relation directe avec la masse volumique des granulats, et puisque la masse volumique des granulats recyclés sont inférieures aux masse volumiques des granulats naturels, alors la densité diminue avec l'augmentation du pourcentage en granulats recyclés. C'est le résultat trouvé par Debieb**[39].** Mais d'autres chercheurs **[41]** ont mesuré la densité d'un BCR à l'état frais par le même procédé Proctor modifié mais par l'introduction de 20% de cendre volante et remarquons qu'il y a une chute aussi.

III.9. Béton a l'état durci

III.9.1. Densité

Les résultats trouvés sur le BCR à l'état durci sont données sur l'histogramme de la figure III.29.

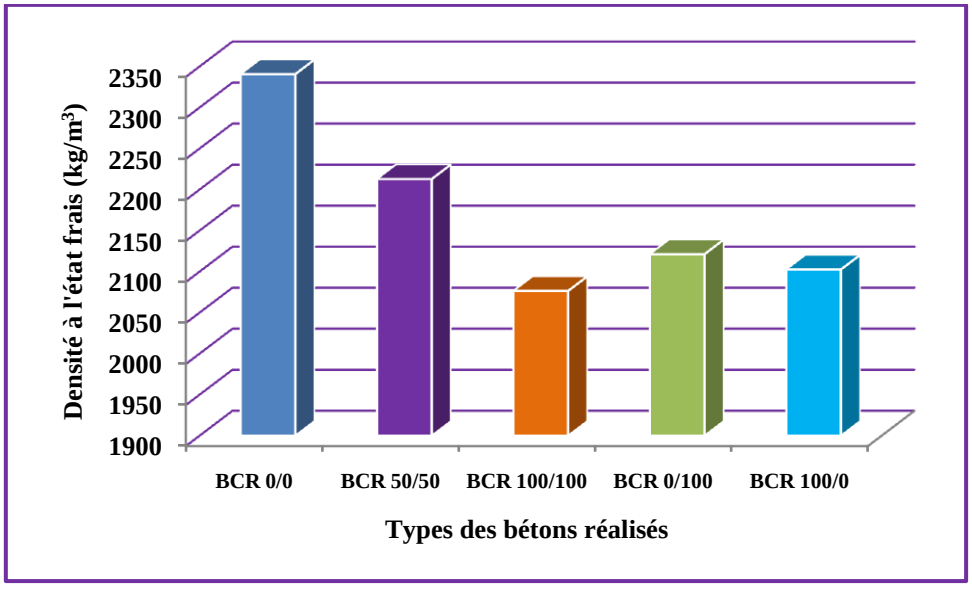


Figure III.29 : Densité du béton a l'état durci.

La même remarque sur la densité du BCR à l'état durci que la densité du BCR à l'état frais, i.e. la densité du BCR recyclé reste inférieure à la densité du BCR naturel. La chute est par les mêmes pourcentages trouvés à l'état frais.

Donc la densité diminue avec l'augmentation du pourcentage en granulats recyclés. C'est le même résultat trouvé par **[84,85, 86].**

III.9.2. Comportement mécanique

III.9.2.1. Résistance à la compression

La résistance moyenne en compression à 28 jours des bétons compactés au rouleau recyclés ne dépasse pas 9MPa en comparaison de leur béton de référence est de 13,37MPa sur des cylindres (ϕ16x32), à l'âge de 90 jours la résistance du BCR témoin augmente jusqu'à 16 MPa, mais concernant les bétons compactés au rouleau recyclés, il n'y a aucune amélioration (presque reste stable).

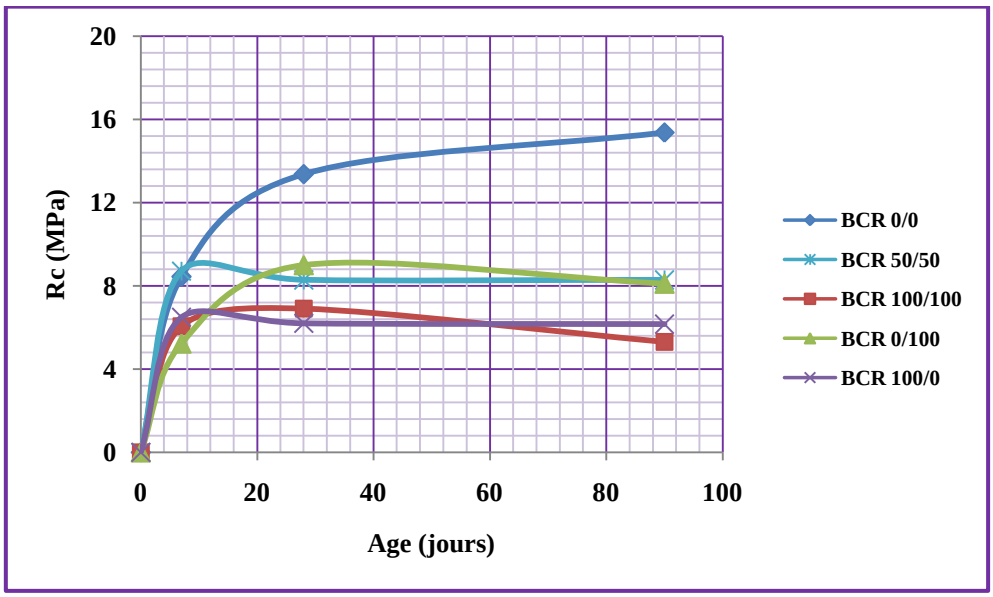


Figure III.30 : Résistance à la compression.

La chute de résistance en compression est d'environ 48 % à 28 jours pour le BCR réalisé avec 100% de granulats recyclés (sable et gravier). Ce résultat se rapproche des résultats trouvés ailleurs. En effets, une diminution de résistance serait de l'ordre de 61% **[87, 88].**

Si on remplace 100 % sable naturel par 100% sable recyclé, la chute est de l'ordre de 32% à 28 jours. C'est presque le même cas si on remplace les graviers naturels par des graviers recyclés bitumineux (remplacement à 100%), la chute de résistance en compression est de 53 %.

Ceci s'expliquent que l'effet du gravier recyclé sur la chute de résistance est important par rapport à l'effet du sable bitumineux recyclé.

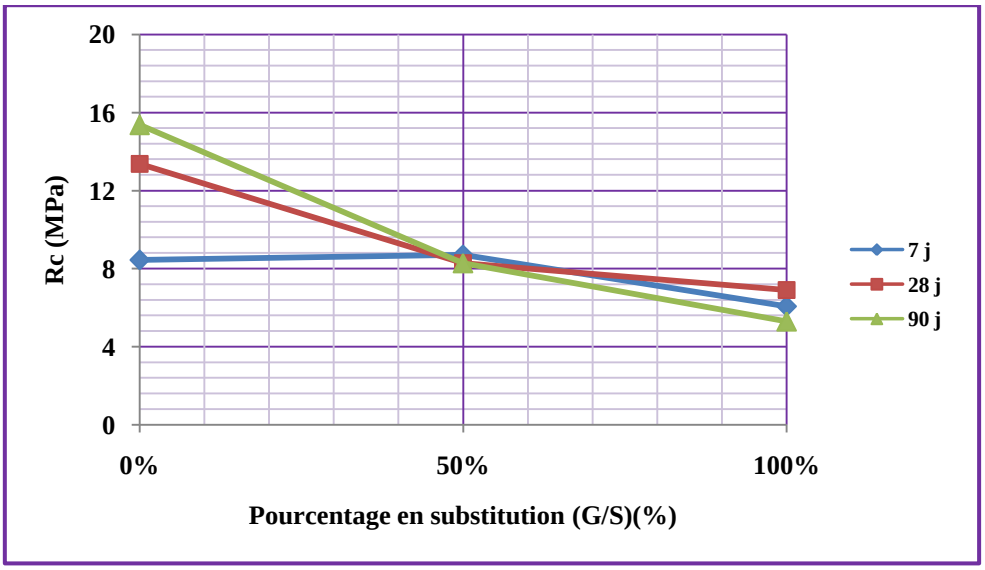


Figure III.31 : Variation de la résistance a la compression en fonction du pourcentage en substitution.

Et d'après la figure III.31, on remarque que jusqu'à 50% de remplacement la chute de résistance en compression est 38 %, cette chute commence à partir de 15% de substitution en gravier et sable recyclé, d'autres **[38]** ont trouvé une chute en résistance de 40 % sur des BCR recyclé à 7 jours.

Alors l'effet combiné de la substitution en gros et fins granulats recyclés semble être très néfaste sur la résistance en compression du béton compacté au rouleau recyclé. Cette chute de résistance a été observée aussi par **[28]** telle que pour deux types de BCR a trouvé seulement 10 MPa en 90 jours de conservation, et pour les 2autres types la résistance n'atteint que 20 MPa, donc la chute est de 50% pour la fabrication d'un BCR de différents carrières en Algérie.

III.9.2.2. Résistance à la traction par fendage

La résistance à la traction par fendage sur deux éprouvettes cylindriques (ϕ16x32) est présentée dans la figure III.32suivente :

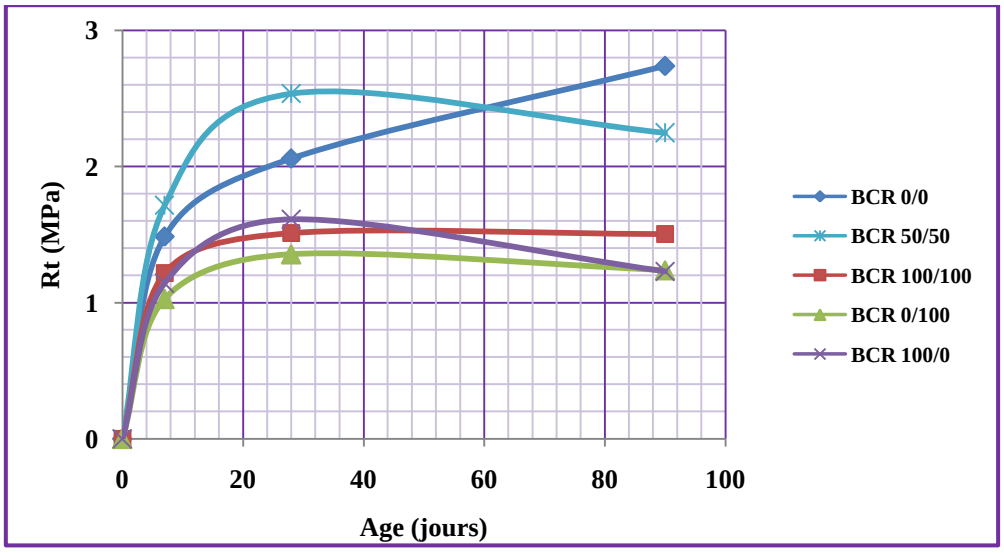


Figure III.32 : Résistance à la traction par fendage.

La résistance à la traction par fendage à 28 jours des bétons compactés au rouleau recyclés ne dépasse pas 1,6MPa et reste stable à long terme (90jours) en comparaison de leur béton de référence qui est de l'ordre de 2 MPa à 28 jours et atteint 3 MPa à 90 jours. Selon **[28]** la résistance à la traction par fendage trouvé ne dépasse pas 2,5 MPa à l'âge de 28 jours.

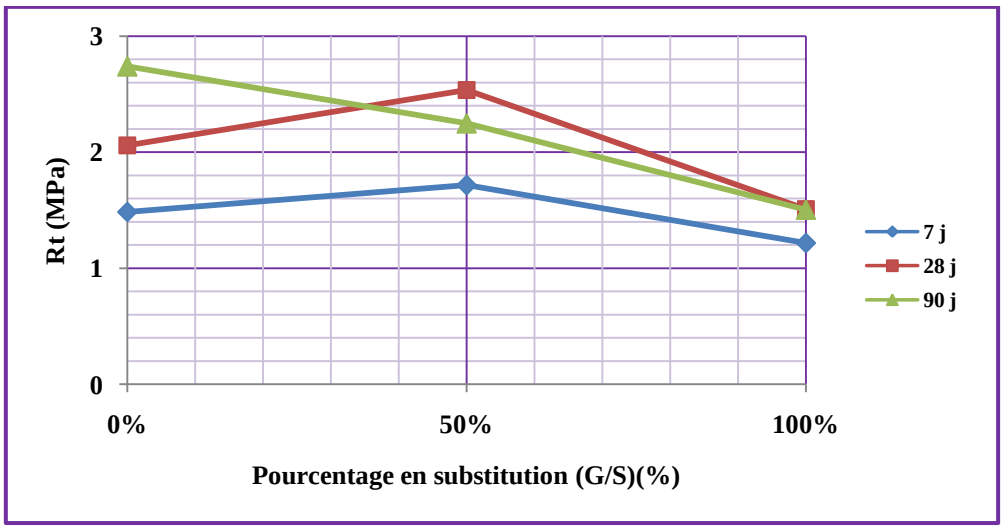


Figure III.33 : Variation de la résistance à la traction en fonction du pourcentage en substitution.

La résistance à la traction par fendage des BCR recyclés présente une chute d'environ 26% pour le type BCR à base de 100 % granulats recyclésparr apport à leur béton de référence (BCR 0/0). Mais pour les BCR 50/50 à base de 50 % granulats recyclés bitumineux, on remarque bien qu'il y a une amélioration de la résistance à la traction par fendage, cette amélioration est de l'ordre de 23 % à l'âge de 28 jours.

En effet de l'ancienne quantité du bitume qui enrobe les granulats est la cause principale de cette différence de résistance en traction. Ce résultat est confirmé par Quellet [36] qui avait conclu que, la résistance en traction par flexion n'est pas sensible aux variations de rapport E/C mais plutôt à la nature des granulats.

III.9.2.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité trouvé sur des éprouvettes cylindriques (ϕ16x32) est la lecture de la pente du droiteσ = f (ε), cette droite est la courbe de tendance qui passe par l'origine et l'un ou plusieurs points sur le graphe.

A. Méthode de calcul du module d'élasticité du BCR 0/0

La valeur du module d'élasticité expérimentale trouvé sur le BCR témoin (à base de 100% granulats naturels) est de 29,833 GPa.

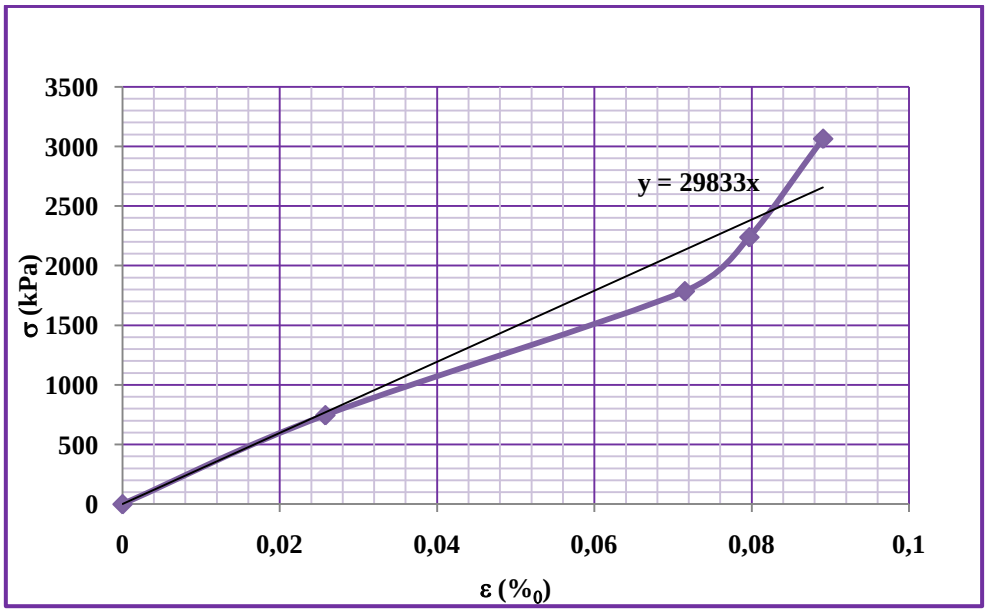


Figure III.34 : Module d'élasticité pour le BCR 0/0.

B. Méthode de calcul du module d'élasticité du BCR 50/50

La valeur du module d'élasticité expérimentale trouvé sur le BCR 50/50 (à base de 50% granulats naturels et 50% granulats recyclés bitumineux) est de 20,877 GPa.

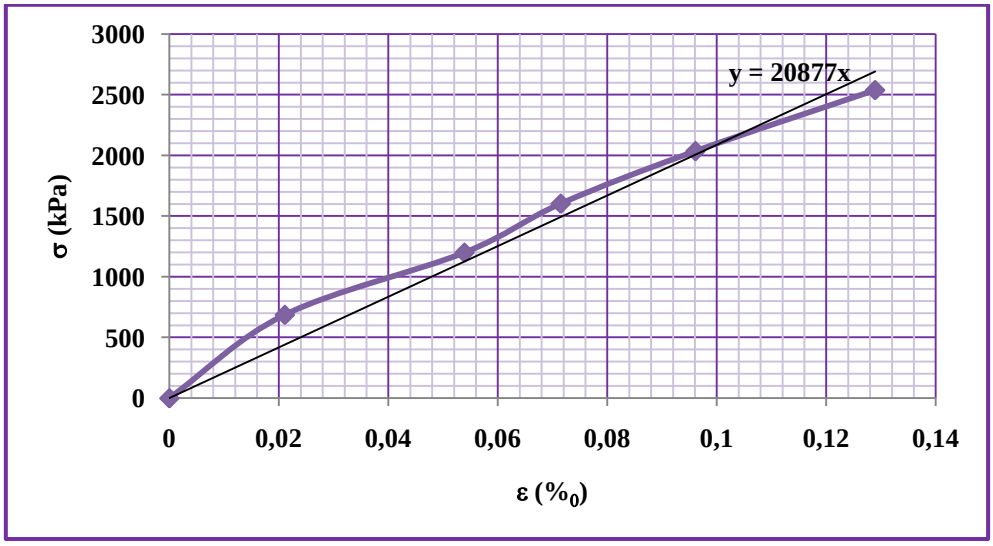


Figure III.35 : Module d'élasticité pourle BCR 50/50.

C. Méthode de calcul du module d'élasticité du BCR 100/100

La valeur du module d'élasticité expérimentale trouvé sur le BCR 100/100 (à base de 100% granulats recyclés bitumineux) est de 16,587 GPa.

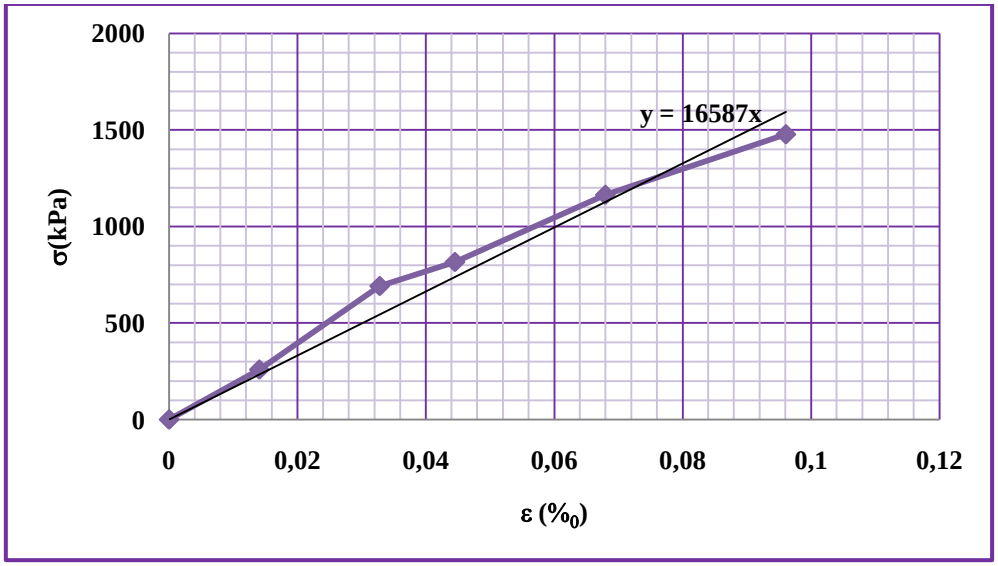


Figure III.36 : Module d'élasticité pour le BCR 100/100.

D. Méthode de calcul du module d'élasticité du BCR 0/100

La valeur du module d'élasticité expérimentale trouvé sur le BCR 0/100 (à base de 100% de sable recyclés bitumineux) est de 17,322GPa.

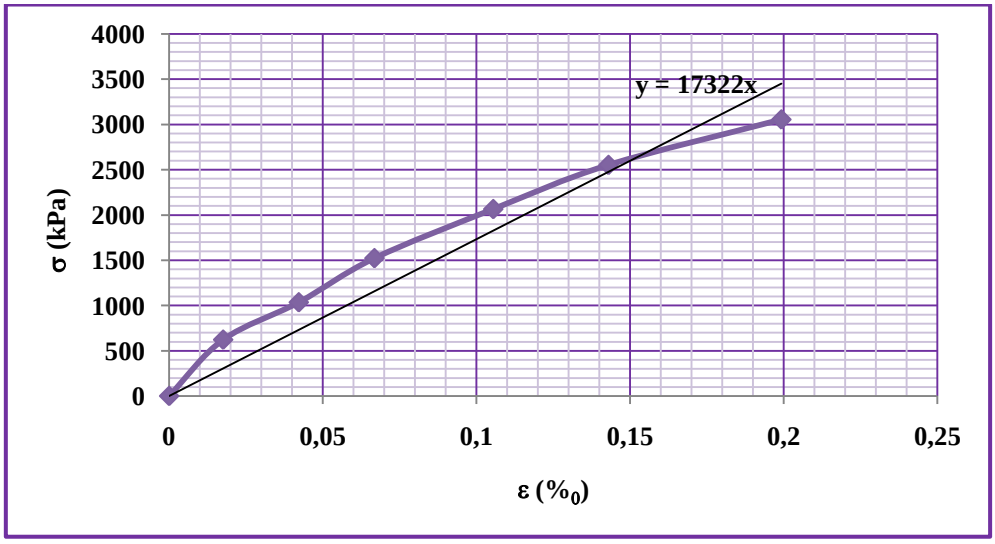


Figure III.37 : Module d'élasticité pour le BCR 0/100.

E. Méthode de calcul du module d'élasticité du BCR 100/0

La valeur du module d'élasticité expérimentale trouvé sur le BCR 100/0 (à base de 100% graviers recyclés bitumineux) est de 13,921 GPa.

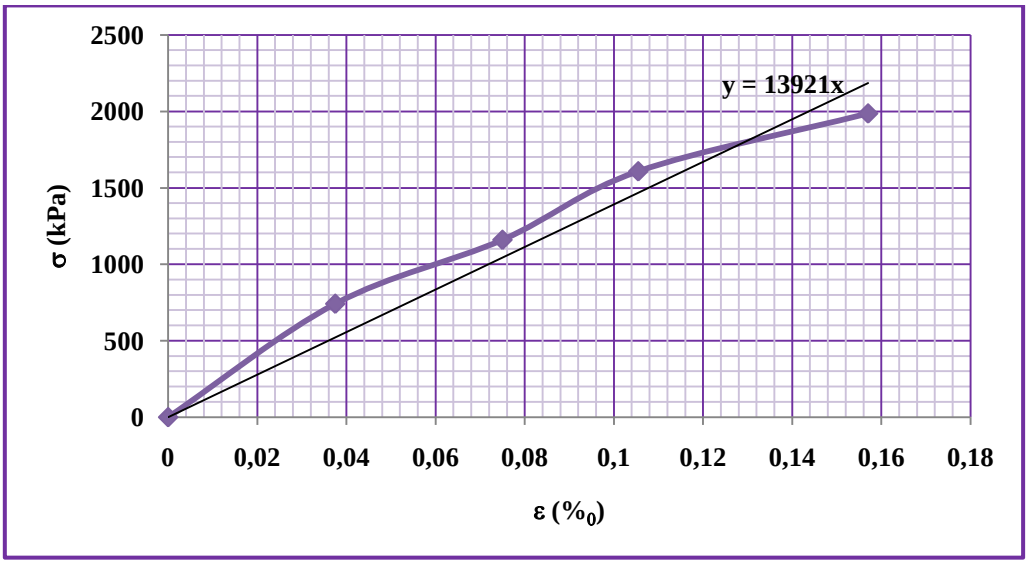


Figure III.38 : Module d'élasticité pour le BCR 100/0.

On remarque qu'il y a une diminution en module d'élasticité lorsqu'on remplace des granulats naturels par des granulats recyclés bitumineux.

Cette diminution est influencée beaucoup plus par le gravier recyclé par rapport au sable recyclé.La chute est de l'ordre de 30 % pour que la moitié de granulats naturels sont remplacé par des granulats recyclés, et augmente jusqu'à 44 % pour un remplacement totale par des granulats recyclés.

Le remplacement du sable naturel par 100% sable recyclé cause une chute de 41 %, et le remplacement du gravier naturel par un 100 % graviers recyclé bitumineux aussi présente une chute considérable de l'ordre de 53 %.

Cette chute en module d'élasticité est comparable avec la chute en résistance à la compression pour les BCR recyclés, ce résultat a été confirmé par **[39].**

Alors le module d'élasticité est influencé par la nature des granulats, si ces granulats sont naturels donc notre béton est plus dur, mais si ces granulats sont recyclés alors notre béton est plus élastique (présente un faible module d'élasticité).

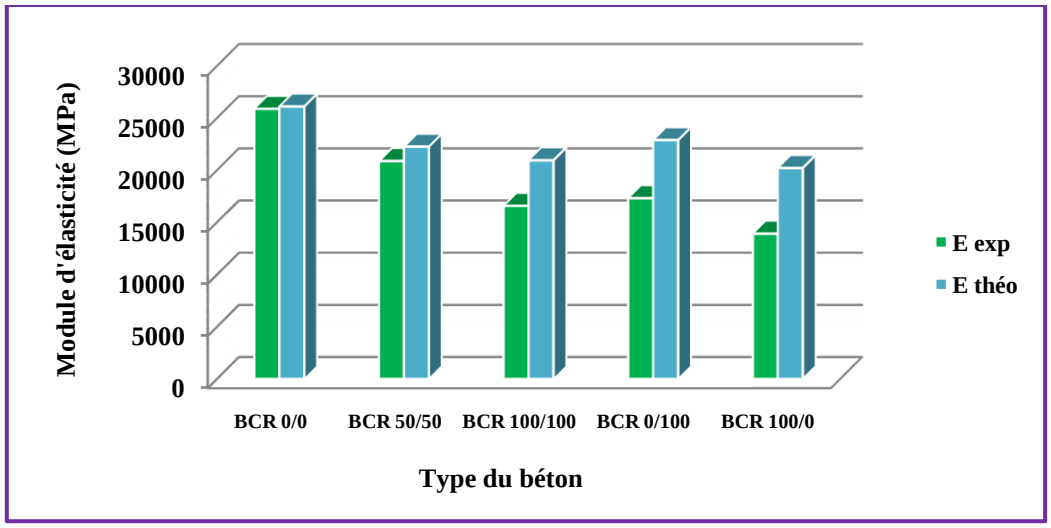


Figure III.39 : Histogramme de comparaison entre le module d'élasticité théorique et expérimental.

D'après la figure III.39, on compare notre module d'élasticité expérimentale par le module d'élasticité théorique calculé par l'expression du BAEL, on remarque que la différence entre ces deux modules d'élasticité augmente lorsqu'on augmente le pourcentage en substitution. Donc on peut conclure que l'expression du BAEL n'est pas applicable pour les bétons recyclés.

D'autres chercheurs ont développé des expressions pour le calcul du module d'élasticité des bétons recyclés, parmi ces expressions est celle de Corinaldesi**[89]** :

$$E = 22\sqrt[3]{0{,}83\ fcu/10} \text{.....Equ.III.2}$$

III.9.3. Essais non destructif

III.9.3.1. Dureté superficiel (Indice de rebondissement)

Les résultats sont présentés sur la figure III.40 suivante :

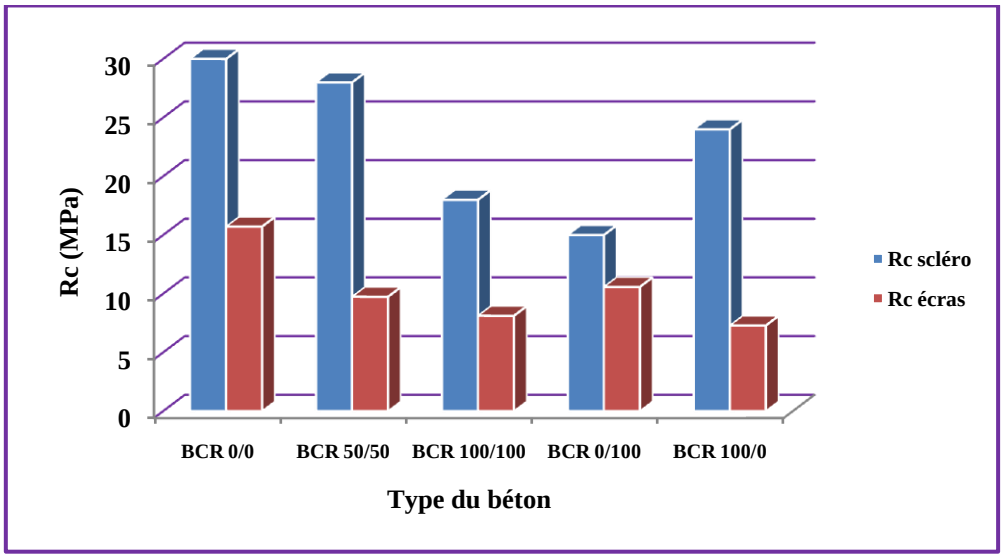


Figure III.40 : Histogramme de comparaison entre la résistance à la compression donné Par scléromètre et par écrasement.

La comparaison entre la résistance à la compression des différents bétons trouvés par écrasement des éprouvettes cylindriques et la valeur de résistance lue par le graphe à partir de l'indice scléromètrique (Indice de rebondissement). On observe bien qu'il y a une grande différence entre ces deux valeurs de résistance, donc on peut dire que la dureté superficiel ne peut être calculé par l'indice de rebondissement sur des BCR que se soit naturels ou recyclés.

III.9.3.2. Auscultation dynamique (Vitesse du son)

Les différentes valeurs de la vitesse du son sur les mélanges réalisés sont présentées sur la figure III.41.

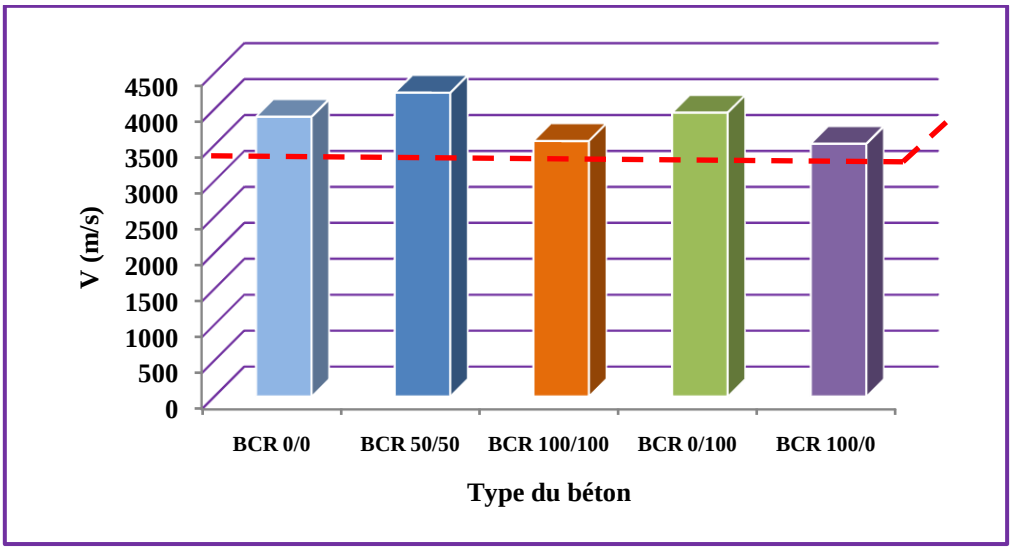


Figure III.41 : La vitesse du son des différents bétons réalisés.

On remarque que tous les bétons compactés au rouleau recyclés ayant une vitesse du son qui dépasse 3500 (m/s), donc sont considérés comme des bons bétons.

III.9.4. Variation dimensionnelles et durabilité

III.9.4.1 Retrait et perte en masse

L'évolution du retrait à l'air libre et les détailles des 28 premiers jours et 90 jours de retrait, sont repris dans les figuresIII.42 et III.43.

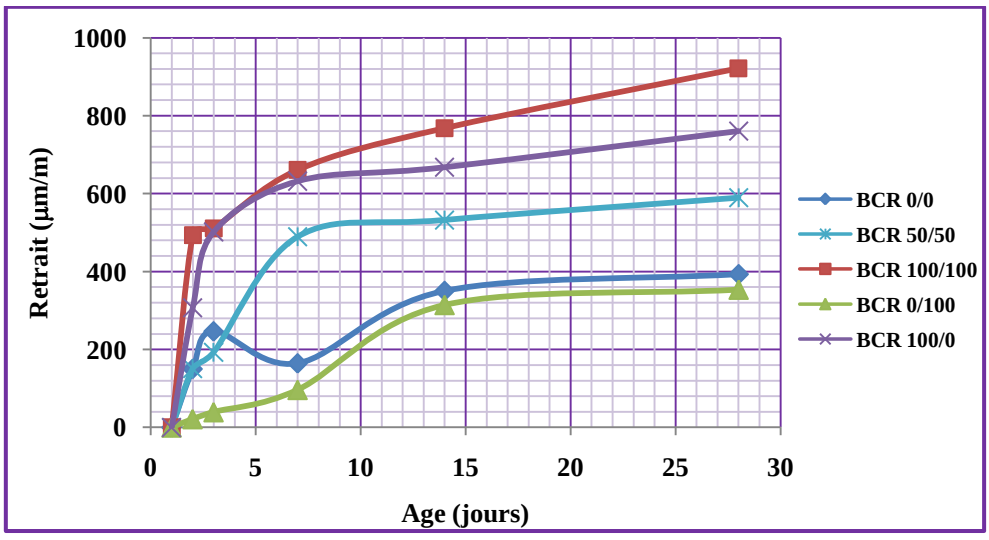


Figure III.42 : Evolution du retrait à l'air libre pendant les 28 premiers jours.

D'une façon générale, on remarque que le retrait à l'air libre des bétons recyclés est nettement plus important que celui du béton compacté au rouleau témoin à base de 100% de granulats naturels (environ 200 µm/m, ce résultat a été observé par **[28]**). L'augmentation est d'environ de 2 fois après 28 jours d'exposition à l'air libre à l'intérieur du laboratoire (15°C et 65% H.R).

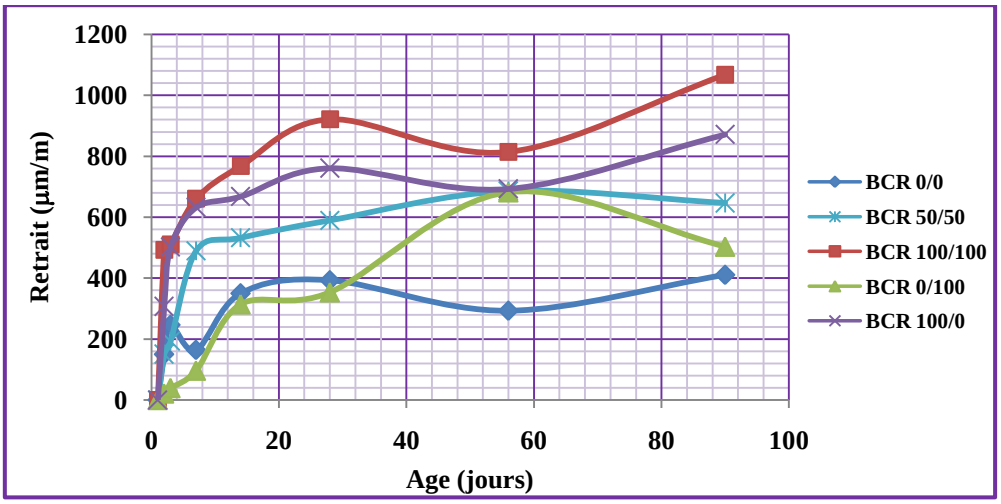


Figure III.43 : Evolution du retrait à l'air libre pendant les 90 jours.

Le retrait à partir de 28 jours commence à stabiliser pour tous les bétons, sauf pour le BCR 0/100 (à base de 100 % sable recyclé) et on sait que le sable recyclé tend à augmenter le retrait, mais le BCR 100/100 continu son augmentation.

Cette augmentation du retrait est confirmée par d'autres chercheurs **[90]** et peut résulter de l'augmentation de la teneur en eau ainsi que du faible module d'élasticité du béton recyclé durci.

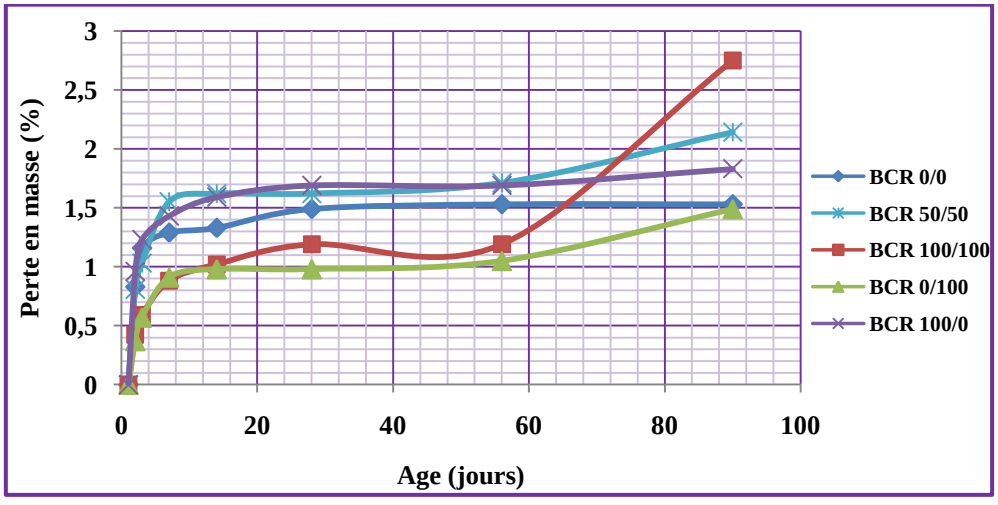


Figure III.44 : Perte en masse en fonction de l'âge.

La figure III.44 résume les résultats de la perte en masse lors des essais de retrait. On constate que la perte en masse est proportionnelle au temps et commence à se stabiliser après 28 jours de conservation dans l'air pour le BCR 0/0, mais pour les autres BCR recyclés, ils prennent un temps plus long pour sestabiliser en masse, peut être plus de 90 jours pour le BCR 100/100, cette perte atteint 3%.

III.9.4.2. Gonflement et gain en masse

L'évolution du gonflement dans l'eau et les détailles des 28 premiers jours et 90 jours de gonflement, sont résumé dans les figures III.45 et III.46.

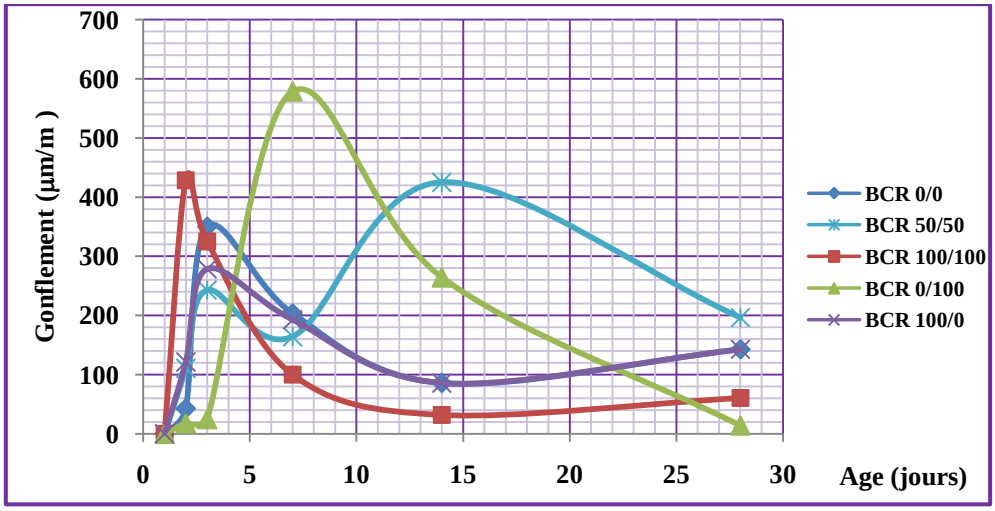


Figure III.45 : Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 28 premiers jours.

On remarque des variations importantes tout au long des courbes.

La figureIII.45montre l'effet du type de béton sur le gonflement dans l'eau.Pendant les 7 premiers jours nous avons observé un gonflement important pour tous les types de BCR mais à partir de 14 jours jusqu'à 90 jours (voir figure III) ce gonflement commence à se diminuer et remarquons bien qu'il n'y a pas de gonflement où presque négligeable à long terme pour les BCR recyclés en comparons avec le BCR réalisé par les granulats naturels. Ce résultat a été confirmé par **[39]** qui a trouvé un gonflement trop faible et ne dépasse pas 100 µm/m à l'âge de 300 jours, **[28]** aussi a observé un gonflement qui ne dépasse pas 30 µm/m à l'âge de 35 jours.

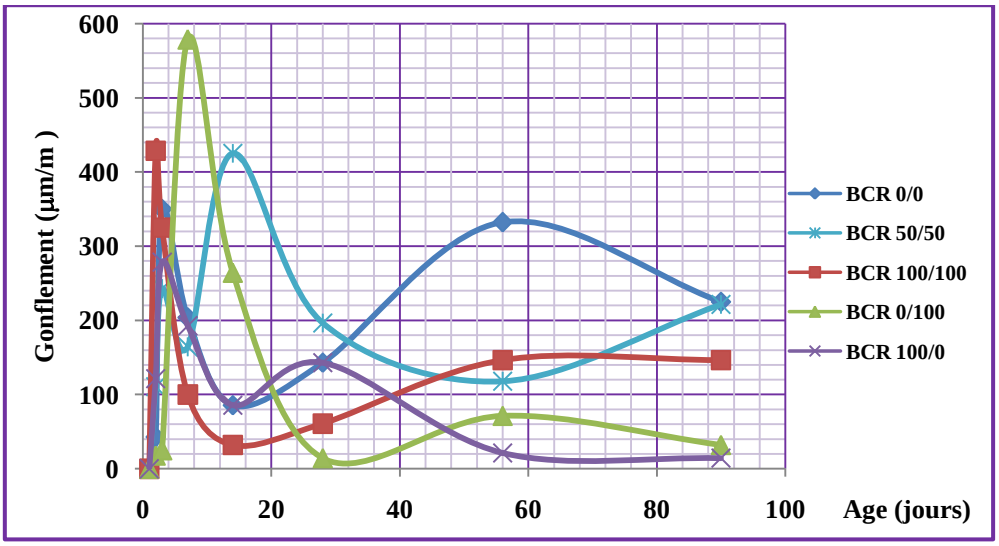


Figure III.46 : Evolution du gonflement dans l'eau pendant les 90 jours.

D'après la figure III.47, on remarque qu'il y a un gain en masse, dépasse le 5% pour tous les BCR mais pour le BCR 50/50 le pourcentage de gonflement n'est que 4 %.

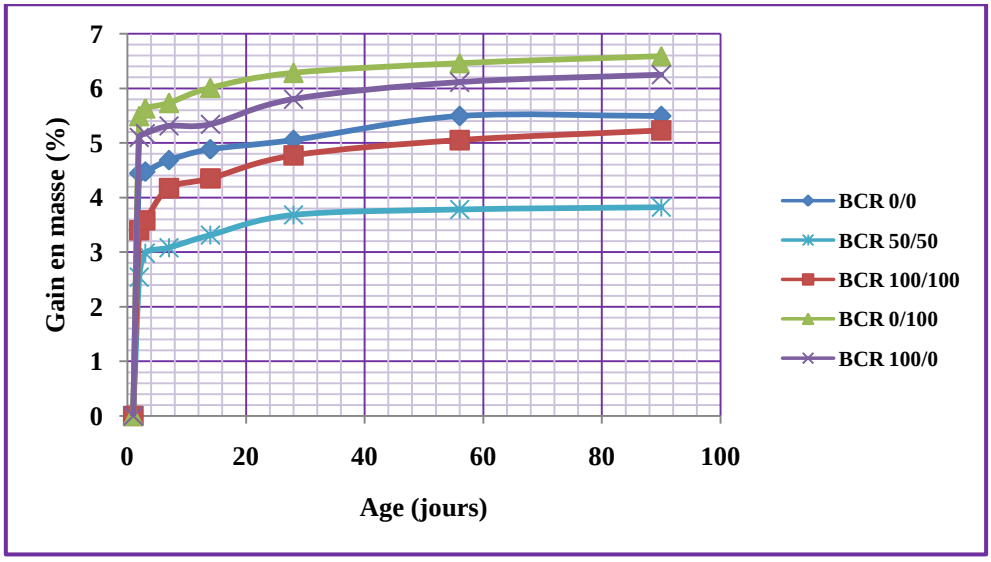


Figure III.47 : Gain en masse en fonction de l'âge.

Ces valeurs de gain en masse peuvent nous renseigner aussi d'une façon indirecte sur la prise et la maturité des bétons réalisés. En fait, comme pour le béton témoin, on constate que tous les bétons recyclés semblent terminer leur prise après 1 jour et commencent à ce stabilisé en maturité à partir des28 jours.

III.9.4.3. Absorption d'eau

L'évolution de l'absorption d'eau par capillarité dans le temps des différents bétons réalisés, est représentée dans la figureIII.48.

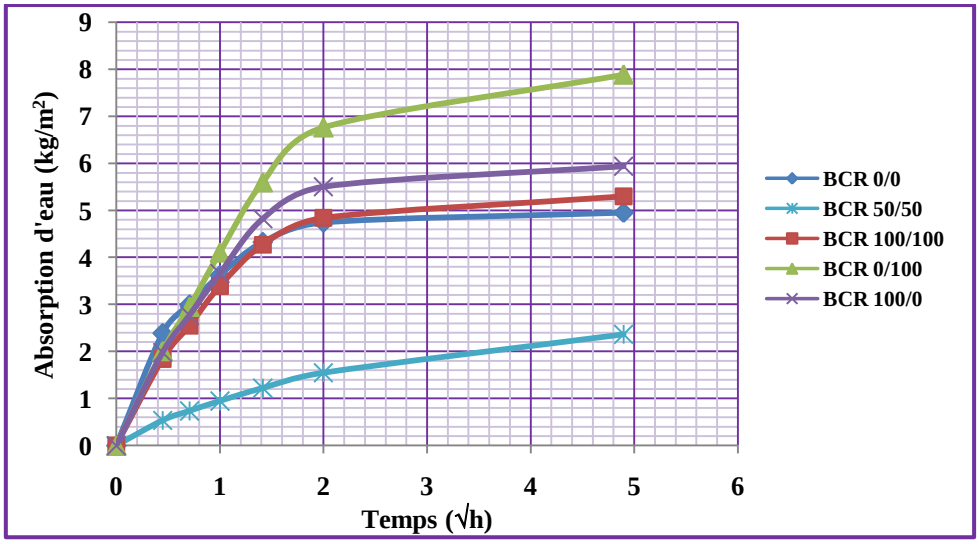


Figure III.48 : Absorption d'eau des bétons réalisés.

Les résultats d'absorption qui sont présenté ici, obtenus sur des demi-disques des éprouvettes cylindrique (ϕ16x32) en contact avec une nappe d'eau de 5 mm, représentent effectivement l'état porométrique des premiers millimètres de l'éprouvette, sachant que la porosité du béton est proportionnelle à la vitesse d'absorption d'eau.

On constate en premier lieu que l'absorption initiale estnettement plus grande pour l'ensemble des bétons recyclés sauf pour le béton BCR 50/50 qui n'a rien absorbé. Ce résultat confirme aussi l'importance de l'absorption d'eau durant les premiers instants pour évaluer la porosité de surface du béton compacté au rouleau recyclé par rapport au béton naturel.

L'absorption du BCR à base de 100% granulats recyclés est de l'ordre de 7 % seulement par rapport au béton naturel malgré la porosité du mélange BCR 100/100 est presque la moitié (0,0921) de la porosité de mélange BCR 0/0 (0,1841) cela confirme que si on a la même porosité donc l'absorption sera 2 fois le pourcentage obtenu. Pour le BCR 0/100 qui a aussi la même porosité que le BCR 100/100 mais le taux d'absorption est de 59%. Donc on peut conclure que le compactage du BCR

influe significativement sur la porosité du surface du béton et donc sur l'absorption d'eau pendant le premier jour.

Olorunsogo et all **[91]**, ont constaté une augmentation de 29% de l'absorptiond'eau du béton à base de 100% de granulats recyclés par rapport à celle d'un béton naturel. Debieb **[39]** a trouvé un taux d'absorption du BCR témoin comparable avec les BCR recyclés.

Conclusions générales

A la lumière des résultats obtenus on peut conclure que :

- Les granulats recyclés bitumineux sont peut différents en forme par rapport aux granulats naturels ;
- Le sable recyclé bitumineux semble d'être un sable propre ;
- La compacité du BCR contenant que des granulats recyclés bitumineux est plus grande que le BCR à base de granulats naturels ;
- Les différents essais réalisés sur le BCR à base de granulats recyclés bitumineux, montrent qu'il faut faire une amélioration en résistance pour avoir un comportement acceptable dans le temps et surtout dans les travaux routiers ;
- L'utilisation du logiciel René – LCPC est une méthode aussi fiable pour la formulation d'un BCR à base de granulats recyclés bitumineux avec un faible dosage en ciment et permet de réduire énormément le nombre d'essais de façon à réaliser qu'un nombre limité de gâchés correspondants à la valeur de la compacité optimale ;
- La résistance mécanique du BCR est fortement influencée par la quantité de bitume qui entoure les granulats recyclés ;
- A la lumière des résultats optimum obtenus, il est possible d'utiliser jusqu'à 50% de granulats recyclés bitumineux dans un mélange de BCR.

Recommandations

Malgré le travail colossal effectué et les résultats fructueux obtenus, il reste à poursuivre cette recherche par :

- Réalisation des BCR avec d'autre pourcentage de substitution en granulats bitumineux (entre 0 et 50%) ;
- Augmentation du dosage en ciment pour améliorer la résistance mécanique du BCR recyclé ;
- Introduction des fibres en acier ou en plastique pour améliorer la résistance à la traction du BCR recyclé ;
- Utilisation des ajouts minéraux comme la fumée de silice ou le laitier pour améliorer la résistance à la compression du BCR recyclé (BCRHR) ;
- Utilisation des adjuvants pour améliorer la qualité de surface et diminuer la ségrégation dans le BCR recyclé ;
- Des études restent à mener sur d'autre type de béton (béton vibré, BAP, BHP,…) avec ces granulats recyclés bitumineuse ;
- Les essais de durabilité à savoir le gel dégel, doit être vérifié sur ces BCR recyclés;
- Afin d'encourager l'utilisation d'autres méthodes de composition de BCR, des essais à l'échelle industrielle sont indispensables et des études technico-économiques restent à faire.

Références bibliographiques

[1] Fayçal LOUDJANI., « Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimiles », Ministère de l'Aménagement du Territoire de l'Environnement et du Tourisme, Alger, 2011.

[2] Mlle SAADANI Sabrina., « Comportement des bétons a base de granulats recycles », mémoire de magister, Constantine Alger 2008.

[3] SETRA ED., « Enrobés bitumineux renforcés par addition de déchets plastiques », Note d'information n°28, Collection Chaussées, dépendances, CETE de l'EST France 2000.

[4] journal officiel de république française.,« Décret n°20002-450 relative a la classification des déchets », ministère de l'emménagement du territoire et de l'environnement, 18 avril 2002.

[5] Annexes au rapport d'études., « Plan départemental de gestion des déchets du bâtiment et des travaux publics du Bas Rhin » Avril 2005.

[6] dossier de presse., « Une solution innovante de granulats recyclés et de services », Paris. Le 3 juillet 2013.

[7] Bulletin officiel du ministère de l'environnement n° 2000/4., « L'aménagement du territoire et de l'environnement dans les domaines de la chasse **»,** complément de la circulaire DNP n° 98-1 du 3 février 1998 »,20 avril 2000.

[8] BONNOT J., « Le réemploi des matériaux bitumineux », Bulletin de liaison des ponts et chaussées, n° 182, novembre-décembre 1992.

[9] Journal Officiel., « Classification des déchets », Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie France 17-03-2002.

[10] MONERON., « Retraitement à chaud des matériaux bitumineux en centrale », « Note d'information SETRA n° 98 » 1997.

[11] LEFORT M., « Retraitement en place à froid des anciennes chaussées avec un liant hydraulique », Note d'information SETRA n° 99, 1997.

[12] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., « Guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes », 20, Avenue de Ségur 75302 Paris 07 SP, avril 2001.

[13] Document setra-lcpc., « Guide technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme (GTR) », France, septembre 1992.

[14] ODIE L., « Caractérisation environnementale de fraisât d'enrobés », « Laboratoire régional de Saint Brieuc », 2002.

[15] Claire BRAZILLET- Jérémie DOMAS., « Caractérisation des déchets », Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement , Unité Déchets et Sites Pollués Direction des Risques Chroniques, France 31 décembre 2001.

[16] Le président de la communauté de communes Tarn et Dadou., « Règlement communautaire de collecte de déchets ménagers et assimilés » la loi n°75-633,service environnement/règlement de collecte 2001.

[17] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., « LOI no 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement »**,** France 14.07.1992.

[18] Article L2213-25 du code de collectivités territoriales., « Loi relative au renforcement de la protection de l'environnement loi n°95-101 du 02/02/1995,05 2005.

[19] Le ministre de l'équipement, des transports et du logement., « Circulaire n° 2001-39 du 18/06/01 relative à la gestion des déchets du réseau routier national », France 13 du 25 juillet 2001.

[20] Journal officiel., « Arrêté du 31 juillet 2002 modifiant les conditions de mise en œuvre de la signalisation routière **»**, Le ministre de l'intérieur, de la sécurité intérieure et des libertés locales et le ministre de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer**,** 21 septembre 2002.

[21] Rapport technique - Bâtiments exemplaires., « L'utilisation de granulats issus du recyclage » , France décembre 2010.

[22] Pierre Gauthier., « Conception et réalisation de revêtements en BCR au Québec » Département de génie civil de l'Université Laval.

[23] J-M. DURAND., « La technique du béton compacte au rouleau (BCR.) », possibilités d'application pour les barrages en Afrique, janvier 1998.

[24] Nadia Pouliot.,Thelrry Sedran., Francçois de Larrard., « Bulletin des laboratoires des pontes et des chaussées »,prédiction de la compacité des béton compacté au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire, juillet aout 2001.

[25] **M. Zdiri M. Ben Ouezdou., J. Neji ., «** Les bétons compactes au rouleau a faible dosage en ciment, une solution pour les routes rurales: cas des matériaux de gisements locaux », Revue HTE N°134 Septembre 2006.

[26] Karsten Rendchen et Otmar Hersel., « Revêtements routiers en béton compacté au rouleau: expériences faites en Allemagne », L'actualité des routes en béton, 04/2006.

[27] Diawoye ND1AYE & Aboubakry SALL., « Conception, formulation et mise en œuvre d'un béton compacte au rouleau (BC.R.) Comme revêtement des chaussées »application au tronçon diamniadio-mbour ; projet de fin d'études envide l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception ; 2006/2007.

[28] Abdelghafour SAADI., « Formulation et étude d'un béton de route à base de Matériaux locaux » mémoire de magister en Génie Civil, université de Blida, juin 2010.

[29] Mustapha ZDIRI., « Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux », Thèse en cotutelle entre : L'Université de Tunis El Manar (Tunisie) L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis et L'Université d'Artois (France), 04 Octobre 2008.

[30] RTOUGH SAFE DDAMS., « RCC pavement roller-compacted concrete» the right choice Canada 2012.

[31] Rollroc., « Béton sec compacté », Holcim (Belgique) 2013.

[32] GAGNÉ, R., «Mixture proportioning of roller Compacted concrete – a Review», Concrete Technology Special Publication SP-171-22, 1997.

[33] GAGNÉ, R., « High-performance roller-compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability», International symposium on engineering materials for sustainable development, Okayama, Japan, 2000, 20-21 November.

[34] SEDRAN, T., « Prévision de la compacité de mélanges granulaires par le modèle de suspension solide », Partie I : Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 1994.

[35] ANGOT, D., « Prévision de la compacité de mélanges granulaires par le modèle de suspension solide », Partie 2 : Validation – Cas des mélanges confinés, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 1994.

[36] OUELLET, E., « Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau », Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université Laval, 1998.

[37] Guide Technique., « LCPC-SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussées », 1994.

[38] Delhez Pascal., « Formulation d'un béton compacté au rouleau à partir de granulat «recyclé pour l'utilisation dans le domaine routier », mémoire en vue de l'obtention du grade d'ingénieur civil des constructions,2003/2004.

[39] **Debieb Farid.,** « Performance et durabilité du béton à base des granulas recyclé contaminés par des chlorures et les sulfates », thèse présenté en vue d'obtention du diplôme de DOCTORAT en Génie Civil ,23/10/2007.

[40] Luc Courard, Frédéric Michel,Pascal Delhez., « Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete», construction and building materials 24, 2010.

[41] Ali Mardani –Aghabaglou, kambiz Ramyar., « Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method », construction and building materials 38, 2013.

[42] Mahmoud Nili , M.Zaheri., « Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrains roller compacts concrete pavements », construction and building materials 25, 2011.

[43] Farshid Vahedifard, Mahmoud Nili,Christopher L.Meehan., « Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement », construction and building materials 24,2010.

[44] Saloua El Euch Khay,Djamel Neji, Amara Loulizi., « Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements » construction and building materials 24,2010.

[45] M Najimi, J.Sobhani, A.R.Pourkhorshidi., « A comprehensive study on no-slump concrete :from laboratory towards manufactory »; construction and building materials 30,2012.

[46] F. de LARRARD., « Structures granulaires et formulation des bétons », série Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et chaussées n° OA 34, édité par le LCPC, avril 2000.

[47] T. SEDRAN., « Rheologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », Thèse de l'ENPC, 220 p, Mars, 1999.

[48] SEDRAN T., DE LARRARD F., « RENÉ-LCPC: un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil », Journées des Sciences de l'Ingénieur, presqu'île de Giens, 4-7 octobre 94.

[49] F. de LARRARD and C. F. FERRARIS., « Rhéologie du béton frais remanié. I: plan expérimental et dépouillement des résultats », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 213, pp 73-89, janvier-février, 1998.

[50] F. de LARRARD and C. F. FERRARIS., « Rhéologie du béton frais remanié. II: relations entre composition et paramètres rhéologiques », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 214, pp 69-79, mars-avril, 1998.

[51] NA 442, Normes Algérienne., « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.

[52] EN 197-1, Normes Européenne., « Ciments courants »,1994.

[53] NF P 15-301., « Liants hydrauliques – définitions, classification et spécification des ciments », Juin 1994.

[54] NF P 15-476, Normes AFNOR., « Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse », Aout 1990.

[55] NF P 15-431, Normes AFNOR., « Liants hydrauliques – technique des essais-détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[56] NF P 15-473, Normes AFNOR., « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[57] NF P 15-471, Normes AFNOR., « Méthodes d'essais des ciments -Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.

[58] NF P 18-303, Normes AFNOR., « Eau de gâchage pour béton », Aout 1990.

[59] NF P18-560, Normes AFNOR., «Granulats - Analyse granulométrique par tamisage », Septembre 1990.

[60] NF P 18-554, Normes AFNOR., « Granulats – Mesure des masses volumique, de la porosité du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et caillou », décembre 1990.

[61] NF P 18-555, Normes AFNOR., « Granulats – Mesures des masses volumique, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables » Décembre 1990.

[62] NF P 18-598, Normes AFNOR., « Granulats - Équivalent de sable », octobre 1991.

[63] NF P 18-573, Normes AFNOR., « Granulats – essais los-Angles », décembre 1990.

[64] therry sedran et al., « Manuel d'utilisation de René LCPC version 6.1d logiciel d'optimisation granulaire », septembre 2000.

[65] NF P 94-093, Normes AFNOR., «Sols : Reconnaissance et essais : Détermination des références de compactage d'un matériau :Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié »

[66] NF P 18-451, Normes AFNOR., « Béton - Essais d'affaissement », décembre 1981.

[67] NF P 18-440, Normes AFNOR., « Essai pour béton frais - Masse volumique », décembre 1999.

[68] NF P 18-435, Normes AFNOR., « Essai pour béton durci: Masse volumique du béton », septembre 2001.

[69] NF P 18-455, Normes AFNOR., « Essai pour béton durci : Résistance à la compression des éprouvette », février 2003.

[70] NF P 18-434, Normes AFNOR., « Essai pour béton durci: Résistance en traction par fendage d'éprouvettes », octobre 2001.

[71] NF P 18-417, Normes AFNOR., « Béton – mesure de la dureté des surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre », décembre 1989.

[72] NF P 18-418, Normes AFNOR., « Béton – auscultation sonique, mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton », décembre 1989.

[73] NA 437., « Béton- determination du module d'elasticité statique en compression », aout 1992.

[74] EN 13057., « Produits et systèmes pour la réparation des structures en béton- Méthodes d'essai – Détermination de l'absorption capillaire », norme Belge, 2002.

[75] NF P 18-427, Normes AFNOR., «Béton - Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci », décembre 1989.

[76] GEORGES DREUX, JEAN FESTA., « Nouveau guide du béton et ses constituants, 8ème édition, Eyrolles, 1998.

[77] Hasen T.C., « Recycling of demolished concrete and masonry », RILEM Report 06, Published by E and FN Spon, London, 1992.

[78] Debieb FARID., « Valorisation des déchets de briques et béton de démolition comme agrégats de béton », Thèse de Magister de l'université de Blida, Algérie, Novembre 1999.

[79] Gomez-Sobéron J. M. V., « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – An experimental study », Cement and Concrete Research, 32, 2002.

[80] Sagoe – Centsil K. K., Brown T. and Taylor A. H., « Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate », Cement and Concrete Research, 31, 2001.

[81] Rahal K., « Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate », Building and Environment, 42, 2007.

[82] Fumoto T. and Yamada M., « Strength and durability of concrete used recycled aggregate », Proceeding of ConMat 05, Vancouver, 2005.

[83] Guasti Tayeb., « Caractérisation et formulation d'un béton compacte au rouleau a partir de granulats recycles », mémoire de magister, 2008/2009, Médéa, Algérie.

[84] Farid Debieb, Luc Courard, Said Kenai, Robert Degeimbre., « Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates», Cement & Concrete Composites, 32, 2010.

[85] Gonzalez-Fonteboa B, Martinez-Abella F, Eiras-Lopez J, Seara-Paz S., « Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete », Mater Struct 44(10), 2011.

[86] Soutsos M, Tang K, Millard S., « Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: concrete paving blocks », Constr Build Mater 25(7), 2011.

[87] Tori I., kawamura M., Takemoto K. and Hasaba S., « Applicability of recycled concrete aggregate as an aggregate for concrete pavement », Transaction of the Japan concrete institue, Vol. 6, 1984.

[88] Ravindraradjah R. S. and Tam C. T., « Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregates », Magazine of Concrete research, Vol. 37, N° 130, March 1985.

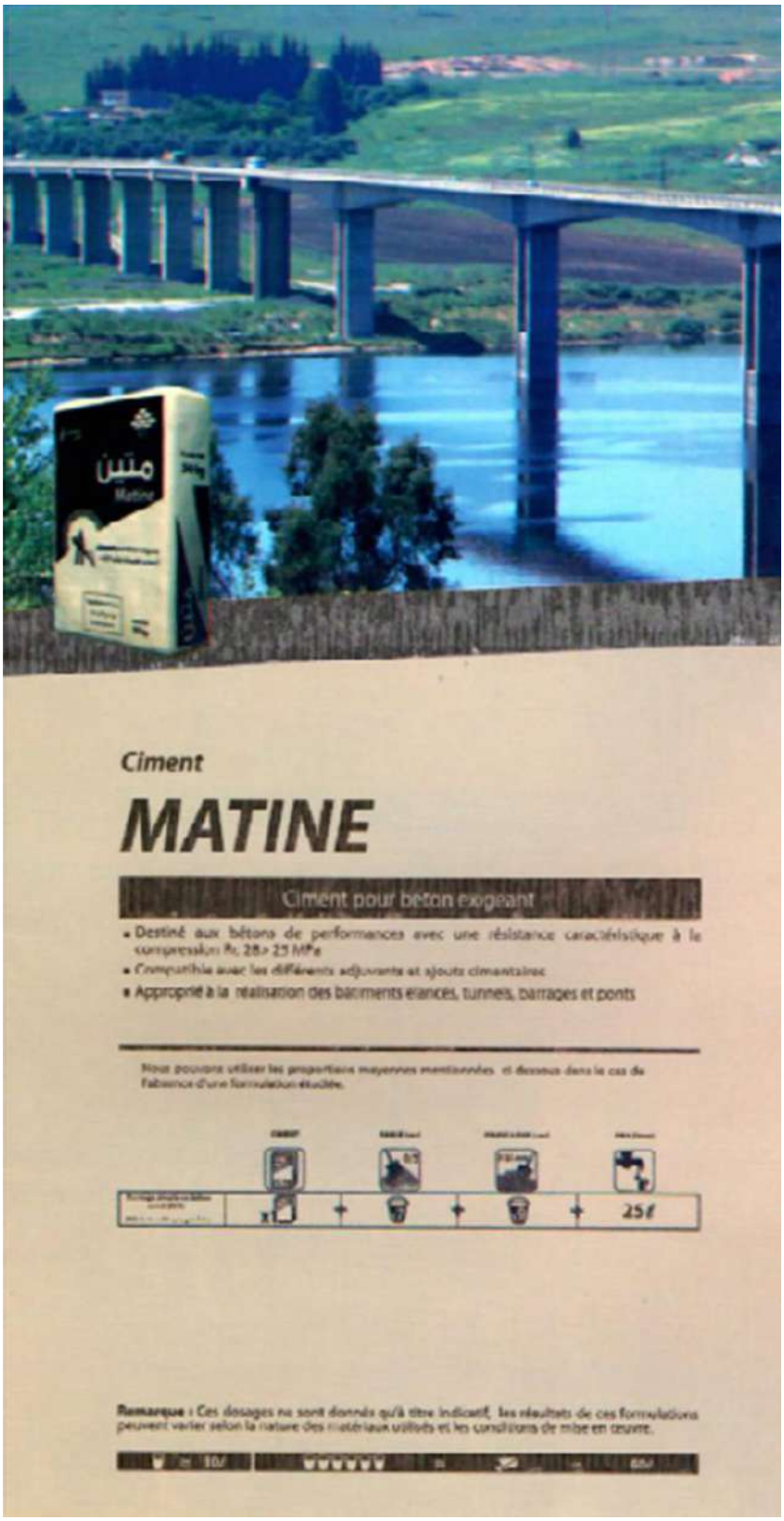
[89] Corinaldesi V, Moriconi G., « Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete », Constr Build Mater 23(8), 2009.

[90] Ravindraradjah R. Loo Y.H. and Tam C. T., « Recycled concrete as fine and coarse aggregate in concrete», Magazine of Concrete research, Vol. 39, 1987.

[91] Olorunsogo F. T. and Padayachee N., « Performance of recycled concrete monitored by durability index », Cement and Concrete research, 32, 2002.

Annexes

Fiche technique Matine



LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42.5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3), ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) :
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A-L 32,5 N - NA 442

FICHE TECHNIQUE

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), **(NA 5042)**:	7.00 – 9.50
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	*1.5– 3.0*
Teneur en sulfates SO_3 (%), **(NA 5042)**:	2.00 – 2.50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.90 – 2,30
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	*0,01 – 0,03*

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58.00 – 64.00
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6,0– 8,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine **(NA 231)**:	4300 – 4 800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,5 – 2.5

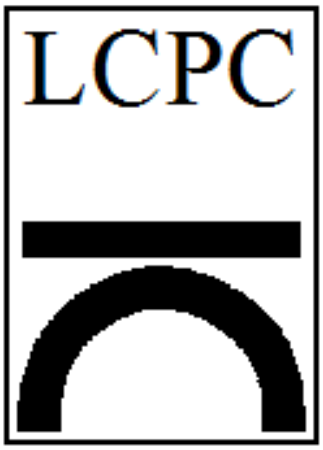
Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	120 - 180
Fin de prise (min)	210 - 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (Mpa)	> 20
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62.5

Algerian Cements Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71



Manuel d'utilisation de René-LCPC

version 6.1d

Logiciel d'optimisation granulaire

Thierry Sedran, François de Larrard
Septembre 2000

Bouton "Compacité virtuelle"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, le logiciel calcule la valeur de la compacité virtuelle du mélange et l'imprime sur la feuille "Résultats". Cette compacité virtuelle est une valeur théorique correspondant à un indice de compaction infini.

Bouton "Porosité à indice de compaction fixé"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, le logiciel vous demande l'indice de compaction souhaité pour la suspension, calcule la porosité correspondante, et imprime les données sur la feuille "Résultats".

Bouton "Indice de compaction à porosité fixée"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, le logiciel vous demande la porosité visée pour la suspension, calcule l'indice de compaction correspondant, et imprime les données sur la feuille "Résultats".

Bouton "Optimisation d'un mélange binaire"



Lorsque vous cliquez sur ce bouton, une seconde feuille de proportions massiques apparait à l'écran. Lorsque vous validez ce second jeu de proportions, le logiciel calcule tous les mélanges binaires, à indice de compaction ou porosité fixé, de ces deux jeux de proportions avec un pas qui se resserre autour du mélange optimal. Ce bouton permet donc de localiser rapidement un mélange binaire optimum (indice de compaction minimal pour une porosité donnée, ou porosité minimale pour un indice de compaction donné).