



Université Constantine 1 Frères Mentouri

Faculté des Sciences de la Technologies

Département de Génie civil

N° de Série :68/D3C/2024

N° d'Ordre :04/GC/2024

VALORISATION DES DECHETS ET SOUS-PRODUITS EN TECHNIQUES ROU-
TIERES : « DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MATERIAUX A VALEUR AJOUTEE
ET ANALYSE CYCLE DE VIE MULTICRITERE »

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat troisième cycle

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux innovants pour la construction durable

Par

Youcef TOUMI

Devant le Jury Composé de :

Khebizi Mourad	Président	Professeur	Université de Constantine 1
Mezhoud Samy	Directeur	Professeur	Université de Constantine 1
Otmane Boukendakdji	Co-Directeur	Professeur	Université de Médéa
Belachia Mouloud	Examineur	Professeur	Université de Guelma
Debieb Farid	Examineur	Professeur	Université de Médéa
Khouadjia Mohamed Lyes Kamel	Examineur	MCA	Université de Constantine 1
Djebien Rachid	Examineur	MCA	Université de Skikda

Soutenue publiquement

Le 18/11/2024

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'Université de Constantine 1, en collaboration avec le Laboratoire de Génie Civil (Hall Technologie) de l'Université de Médéa.

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude envers mon directeur de thèse, **Pr. Mezhoud Samy**, docteur à l'Université de Constantine 1, pour m'avoir confié cette thèse et pour son encadrement attentif. Je souhaite le remercier chaleureusement pour sa disponibilité, son suivi assidu, ses orientations éclairées, ainsi que ses conseils précieux qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail de recherche. La confiance qu'il m'a accordée, sa patience et son humanisme ont été des soutiens essentiels tout au long des défis rencontrés lors de cette thèse. Je souhaite également exprimer mes remerciements à mon co-directeur de thèse, **Pr. Boukendakdji Otmane**, professeur à l'Université de Médéa. Je le remercie sincèrement pour sa disponibilité, ses conseils judicieux et le temps qu'il m'a généreusement accordé tout au long de notre collaboration au cours de ces années.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au **Pr. Khebizi Mourad**, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse ainsi qu'à tous les membres du jury : **Pr. Belachia Mouloud**, **Pr. Debieb Farid**, **Dr. Khouadjia Mohamed Lyes Kamel** et **Dr. Djebien Rachid** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur **Abd el-Kader FERROUDJI**, le directeur du laboratoire EPTRC à Berouaghia, wilaya de Médéa, pour avoir accepté de mener une partie de ma recherche dans ce laboratoire. J'exprime mes remerciements **aux ingénieurs de laboratoire de l'Université de Médéa** ainsi **qu'aux ingénieurs de laboratoire de l'EPTRC** pour leur assistance et leurs conseils. Je souhaite également exprimer ma gratitude envers **le Dr. Boukhelkhal**, chef du département de Génie civil à l'Université de Médéa, pour ses conseils et son soutien tout au long de cette thèse, ainsi que pour avoir facilité mon engagement dans une vacation au sein de l'Université de Médéa. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon collègue **Hadjadj Moussa**, doctorant à l'Université de Médéa, pour sa disponibilité pendant la partie expérimentale. Sa précieuse assistance a grandement contribué à la réalisation de ce modeste travail de doctorat. Je tiens à remercier également **Youcef, Marouane, Amine, Oussama et tous mes collègues de doctorat**.

Enfin, ce travail de thèse ne serait rien sans exprimer ma gratitude envers mes parents. Que Dieu manifeste sa gratitude envers eux et les accueille dans ses vastes jardins. De plus, je remercie mon frère et mes sœurs pour leur dévouement, qui m'ont toujours donné du soutien et encouragé à donner le meilleur de moi-même.

DEDICACE

À la mémoire de ma chère mère et de mon cher père, que Dieu ait leurs âmes.
À mon frère et à mes sœurs pour leur aide et leurs encouragements continus tout au long de
cette période.

I. TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

RESUME

Introduction générale **1**

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE **4**

Chapitre I Généralité sur les MGLTH routiers **0**

Sommaire partiel 0

I.1 Généralités sur les chaussées 4

I.1.1 Définition 4

I.1.2 Description fonctionnelle des couches de chaussée 5

I.1.3 Classement des structures de chaussée 6

I.2 Matériaux de chaussées **9**

I.2.1 Matériaux naturels 9

I.2.2 Matériaux traités au liant hydrocarboné 9

I.2.3 Matériaux traités au liant hydraulique : 10

I.3 Matériaux routiers traités aux liants hydrauliques (MTLH) ou (GC) **10**

I.3.1 Définition 10

I.3.2 Historique des MGLTH 11

I.3.3 Constitution des MGLTH 11

I.3.4 Performances des graves ciments 12

I.3.5 Cadre normatif des MGLTH 13

I.3.6 Avantages et inconvénients d'incorporation des MGLTH 14

I.4 Conclusion **16**

II. Chapitre II Emploi des déchets dans les MGLTH **17**

Sommaire partiel 17

II.1 DIFFERENTS TYPES DES DECHETS **18**

II.2 GRANULATS DE BRIQUE RECYCLE **19**

II.2.1 Source de brique 19

II.2.2 Recyclage des déchets de brique dans le monde 20

II.2.3 Propriétés des agrégats de briques recyclées 20

II.2.4	Influence du granulats de brique recyclé sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires	23
II.2.5	Effet du granulats de brique recyclé sur la durabilité des matériaux cimentaires	36
II.2.6	Récapitulatif sur l'emploi des briques recyclées	42
II.3	GRANULATS DE BETON RECYCLE	42
II.3.1	Source du granulats de béton recyclé	42
II.3.2	Recyclage des déchets de béton dans le monde	43
II.3.3	Recyclage des déchets de béton en Algérie	44
II.3.4	Propriétés des granulats de béton recyclé	44
II.3.5	Influence du RAC sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires	48
II.3.6	Effet du RAC sur la durabilité des matériaux cimentaires	61
II.4	Récapitulatif sur l'évaluation des performances des RAC	66
II.5	Granulats de déchet de béton bitumineux	67
II.5.1	Source du granulats de déchet de béton bitumineux	68
II.5.2	Recyclage du granulats de déchet de béton bitumineux	68
II.5.3	Propriétés du granulats de déchet de béton bitumineux	68
II.5.4	Influence du granulats de RAP sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires	70
II.5.5	Effet du granulats RAP sur la durabilité des matériaux cimentaires	78
II.5.6	Récapitulatif sur l'évaluation des performances des RAP	83
II.6	Conclusion partielle	83
III.	Chapitre III : Analyse cycle de vie et développement durable	85
	Sommaire partiel	85
III.1	IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DECHETS	86
III.2	ANALYSE CYCLE DE VIE (ACV)	88
III.2.1	Bref historique de l'ACV	88
III.2.2	Définition de l'ACV	89
III.2.3	Standardisation de l'ACV	90
III.2.4	La méthodologie de l'ACV	92
III.2.5	Evaluation des impacts environnementaux	92
III.2.6	Avantages et inconvénients	93
III.2.7	Application de l'ACV dans les matériaux cimentaires	94
III.2.8	Application de l'ACV en technique routière	95
III.3	Conclusion partielle	99
	Synthèse bibliographique	101

Partie expérimental	104
IV. Chapitre VI MATERIAUX ET ESSAIS	105
Sommaire partiel	105
IV.1 Identification des matériaux utilisés	106
IV.1.1 Ciment	106
IV.1.2 Granulats	106
IV.2 Etude de formulation des GC	114
IV.2.1 Plan d'essais du mélange	115
IV.2.2 Formulation des mélanges	116
IV.2.3 Conception des mélanges	119
IV.2.4 Procédure de malaxage et cure	119
IV.3 Cadre normatif du plan expérimental	121
IV.3.1 Essais effectués sur les GC à l'état frais	121
IV.3.2 Essais effectués sur les GC à l'état durci	122
IV.4 Variables étudiées	129
IV.5 Conclusion	131
V. Chapitre V Résultats expérimentaux	132
Sommaire partiel	132
V.1 Effet de l'emploi de brique recyclé sur le comportement des GC	133
V.1.1 Essai Proctor modifié	133
V.1.2 Résistance à la compression	134
V.1.3 Résistance à la traction	135
V.1.4 Indice de CBR	136
V.1.5 Module d'élasticité	138
V.1.6 Auscultation dynamique	139
V.1.7 Absorption par immersion	139
V.1.8 Résistance à l'abrasion	140
V.1.9 Porosité	141
V.1.10 Conductivité thermique	142
V.1.11 Gel/dégel	144
V.1.12 Corrélation entre les propriétés du GC	146
V.1.13 Microstructure	149
V.2 Effet de l'emploi du béton recyclé sur le comportement des GC	151
V.2.1 Essai Proctor modifié	151

V.2.2	Résistance à la compression	152
V.2.3	Résistance à la traction	153
V.2.4	Indice de CBR	154
V.2.5	Module d'élasticité	155
V.2.6	Auscultation dynamique	156
V.2.7	Absorption par immersion	157
V.2.8	Porosité	158
V.2.9	Conductivité thermique	158
V.2.10	Résistance à l'abrasion	159
V.2.11	Gel/dégel	161
V.2.12	Corrélation entre les propriétés du GC à base des RAC	163
V.2.13	La microstructure	165
V.3	Effet de l'emploi de RAP sur le comportement des GC	166
V.3.1	Essai Proctor modifié	166
V.3.2	Résistance à la compression	167
V.3.3	Résistance à la traction	168
V.3.4	Indice de CBR	169
V.3.5	Module d'élasticité	171
V.3.6	Vitesse d'auscultation sonique (VAS)	172
V.3.7	Porosité	173
V.3.8	Conductivité thermique	173
V.3.9	Absorption par immersion	174
V.3.10	Résistance à l'abrasion	175
V.3.11	Gel/dégel	176
V.3.12	Corrélation entre les propriétés du GC	178
V.3.13	La microstructure	181
V.4	Étude comparative des performances de GC à base des trois types de granulats recyclés	182
V.5	Conclusion	184
	RESULATS D'ANALYSE CYCLE DE VIE	186
VI.	Chapitre VI Analyse cycle de vie des GC	187
	Sommaire partiel	187
VI.1	Analyse cycle de vie des GC	188
VI.1.1	Description du système	188
VI.1.2	Champ de l'étude	188

VI.1.3	Unité fonctionnelle	189
VI.1.4	L'inventaire du cycle de vie	189
VI.2	Interprétation des résultats	190
VI.2.1	Analyse cycle de vie des GC à base de RAB	190
VI.2.2	Analyse cycle de vie des GC à base de RAC	194
VI.2.3	Analyse cycle de vie des GC à base de RAP	197
VI.2.4	Comparaison des résultats environnementale du GC	200
VI.3	Conclusion partielle	201
VI.4	Synthèse des Performances des Granulats Recyclés dans les GC	202
	<i>CONCLUSION GENERALE</i>	205
	<i>PERSPECTIVES</i>	208

LISTE DES FIGURES

Chapitre I Généralité sur les MGTLH routiers

Figure I.1: Structure de chaussées	5
Figure I.2: coup type chaussée	6
Figure I.3 : Composantes d'une chaussée.....	8
Figure I.4 : Structure des chaussées non stabilisées et stabilisées au ciment	15

Chapitre II : Emploi des déchets dans les MGTLH

Figure I.5 : Répartition de la charge du CTB par rapport à la base granulaire non stabilisée ...	15
Figure II.1: Brique recyclée sous forme de granulats fins et grossiers.....	21
Figure II.2: Résultat de l'essai Proctor modifié	23
Figure II.3 : Résultat de l'essai Proctor modifié	24
Figure II.4 : Résistance à la compression à 28 jours des échantillons	26
Figure II.5 : Effet de la teneur en CB sur la résistance à la compression.....	27
Figure II.6 : Évolution de la résistance à la compression du béton avec de la brique concassée fine et grossier taux de substitution des agrégats	27
Figure II.7 : Résistance à la compression du béton étudié à 7,28 et 91 jours	28
Figure II.8 : Résistance à la compression du béton étudié à 7,28 et 91 jours	29
Figure II.9 : Effet du niveau de remplacement des granulats de brique sur la résistance à la compression du béton	31
Figure II.10 : Résistance à la traction du béton étudié à 7, 28 et 91 jours.....	32
Figure II.11 : Module d'élasticité du béton étudié à 7, 28 et 91 jours	34
Figure II.12 : Module d'élasticité du béton en fonction du taux de GR de brique et tuile	35
Figure II.13 : Indice de CBR des mélanges étudiés	35
Figure II.14 : Image MEB de (CSCBA).....	36
Figure II.15 : Résistance gel/dégel des mélanges étudiés	37
Figure II.16 : Résistance gel/dégel des mélanges étudiés	38
Figure II.17 : L'absorption par immersion des mélanges étudiés.....	38
Figure II.18 : Effet de la teneur en granulats recyclés grossiers et fins sur l'absorption d'eau ...	39
Figure II.19 : Porosité des mélanges étudiés	40
Figure II.20 : Effet de la teneur en granulats recyclés grossiers et fins sur la porosité du béton	40
Figure II.21 : Effet de la teneur en granulats recyclés grossiers et fins sur la VAS du béton	41
Figure II.22 : Nombre d'articles sur le sujet « béton de granulats recyclés	42
Figure II.23 : Production totale de déchets de construction et de démolition	43
Figure II.24 : Production de déchets de construction et de démolition par population	44
Figure II.25 : Schéma de l'ancien et du nouveau ITZ en béton.....	46
Figure II.26 : Moyenne en pourcentage de la composition chimique de RCA et NA.....	47

Figure II.27 : Analyse granulométrique des granulats	48
Figure II.28 : Courbe de compactage pour RCA	49
Figure II.29 : Résultat du test CBR pour les mélanges	51
Figure II.30 : Résistance à la compression Influence de la teneur en ciment sur la Résistance à la compression	52
Figure II.31 : Influence de la quantité de matière fine sur la Résistance à la compression	52
Figure II.32 : Résistance à la compression du béton en fonction du taux de GR	54
Figure II.33 : Résultats de résistance à la compression.....	55
Figure II.34 : Variation de la résistance à la compression du béton avec le taux de GR pour différentes conditions d'humidité initiales	55
Figure II.35 : les résultats de résistance à la compression à partir de nombreuses études	56
Figure II.36 : Evolution de la résistance au fendage en fonction du taux de GR	58
Figure II.37 : Résultats de résistance à la traction à partir de nombreuses études	58
Figure II.38 : Résultats de résistance à la traction par flexion à partir de nombreuses études	59
Figure II.39 : Absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés	62
Figure II.40 : Evolution du taux d'absorption en fonction du taux de GR à 28 jours	63
Figure II.41 : Coefficient d'absorption en fonction du rapport eau/ciment des différents degrés de substitutions après 28 jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c)	63
Figure II.42 : Coefficient porosité en fonction du rapport eau/ciment des différents degrés de substitution après 28 jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c).....	64
Figure II.43 : Micromorphologie de l'interface du nouveau ciment hydraté et (a) RCA, (b) NA 65	
Figure II.44 : Micrographie de la structure du RAC	66
Figure II.45 : Variation de la résistance à la compression avec différente tenue en RAP fin	71
Figure II.46 : Variation de la résistance à la compression avec différent tenue en RAP grossiers	71
Figure II.47 : Variation de la résistance à la compression avec différente tenue en RAP	72
Figure II.48 : Variation de la résistance à la flexion avec différentes teneurs en RAP fin	73
Figure II.49 : Variation de la résistance à la flexion avec différentes teneurs en RAP grossiers	74
Figure II.50 : Variation de la résistance à la traction avec différente teneur en RAP	74
Figure II.51 : Variation de module d'élasticité dynamique avec différente tenue en RAP grossier	76
Figure II.52 : Variation de module d'élasticité dynamique avec différent tenue en RAP	77
Figure II.53 : Variation de l'indice de CBR avec différente tenue en RAP	77
Figure II.54 : Image MEB d'un béton : (A). Béton avec granulats naturels ; (b). Béton avec RAP grossier ; (c). Béton avec RAP fin.....	78
Figure II.55 : Corrélation entre perte de poids et résistance à la compression avec RAP fin et grossier	79

Figure II.56 : Absorption d'eau des mélanges à 28 et 91 jours	80
Figure II.57 : Absorption d'eau des mélanges	80
Figure II.58 : Absorption d'eau des mélanges	81
Figure II.59 : Perte de masse due à l'abrasion	82
Figure II.60 : Perte de masse due à l'abrasion	82

CH III : Analyse du cycle de vie et du développement durable

Figure III.1 : Production de granulats 2018 (en millions de tonnes par pays et par type)	86
Figure III.2 : L'impact de l'extraction intensive de sable et du dragage sur le canal qui relie le lac Poyang au fleuve Yangtze	87
Figure III.3 : Les étapes de processus d'analyse cycle de vie	92
Figure III.4 : Structure générale des catégories d'évaluation des impacts environnementaux	93

Chapitre IV : MATERIAUX ET ESSAIS

Figure IV.1 : Composition chimique de ciment.....	106
Figure IV.2 : Déchet de brique.....	107
Figure IV.3 : Déchet d'asphalte recyclé.	107
Figure IV.4 : Courbes granulométriques des sables utilisés.....	109
Figure IV.5 : Photo MEB des sables utilisés.....	109
Figure IV.6 : Courbes granulométriques des graviers 3/8 utilisées.	110
Figure IV.7 : Courbes granulométriques des graviers 8/15 utilisées.....	111
Figure IV.8 : Courbes granulométriques des graviers 15/20 utilisées.....	112
Figure IV.9 : Composition chimique des granulats par FRX.....	113
Figure IV.10 : Photo MEB des graviers utilisés.	114
Figure IV.11 : Organigramme des plans des essais de formulation du MGTLH.....	115
Figure IV.12 : Spécification normative (NF EN 14227-1)	116
Figure IV.13 : Courbes granulométriques des mélanges (sables variables).....	117
Figure IV.14 : Courbes granulométriques des mélanges (gravier 3/8 variable).....	117
Figure IV.15 : Courbes granulométriques des mélanges recyclé.	118
Figure IV.16 : Séquence de malaxage du MGTLH.....	120
Figure IV.17 : Confection des éprouvettes des GC.....	120
Figure IV.18 : Conservation des éprouvettes des GC.	121
Figure IV.19 : Essai Proctor modifié.....	121
Figure IV.20 : Mesure de la résistance à la compression.	122
Figure IV.21 : Mesure de la résistance à la traction par flexion.	123
Figure IV.22 : Mesure du module d'élasticité.	123
Figure IV.23 : Mesure de l'indice de CBR.	124
Figure IV.24 : Appareil de mesure de la vitesse d'auscultation sonore.	125

Figure IV.25 : Essai de porosité.	126
Figure IV.26 : Absorption d'eau par immersion.	126
Figure IV.27 : Essai de conductivité thermique par CT mètre.	127
Figure IV.28 : Mesure de la résistance à l'abrasion.	127
Figure IV.29 : Eprouvettes pendant les cycles gel-dégel.	128
Figure IV.30 : Cycle de température de gel-dégel.	128
Figure IV.31 : Microscopie électronique à balayage (MEB).	129

Chapitre V : Analyse des résultats expérimentaux

Figure V.1 : Optimisation de la teneur en eau optimale des GC.	133
Figure V.2 : Résistance à la compression des GC.	134
Figure V.3 : Résistance à la traction des GC.	135
Figure V.4 : Indice de CBR des GC.	137
Figure V.5 : Module d'élasticité des GC.	138
Figure V.6 : Auscultation dynamique des GC.	139
Figure V.7 : Absorption de l'eau des GC.	140
Figure V.8 : Résistance à l'abrasion des GC à base de granulats de RAB.	141
Figure V.9 : Porosité des GC à base de granulats de RAB.	142
Figure V.10 : Conductivité thermique des GC à base de granulats de RAB.	143
Figure V.11 : Perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAB.	144
Figure V.12 : Aspect des éprouvettes avant cycle de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAB.	145
Figure V.13 : Aspect des éprouvettes après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAB.	145
Figure V.14 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et VAS des GC à base de granulats de RAB.	147
Figure V.15 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la porosité des GC à base de granulats de RAB.	148
Figure V.16 : Corrélation établie entre la conductivité thermique et la porosité des GC à base de granulats de RAB.	149
Figure V.17 : Examen au MEB des mélanges GC.	150
Figure V.18 : Optimisation de la teneur en eau optimale des GC.	151
Figure V.19 : Résistance à la compression des GC.	152
Figure V.20 : Résistance à la traction des GC.	153
Figure V.21 : Indice de CBR des GC.	154
Figure V.22 : Module d'élasticité des GC.	155

Figure V.23 : Auscultation dynamique des GC.	156
Figure V.24 : Absorption de l'eau des GC.	157
Figure V.25 : la porosité des GC à base de granulats de RAC.	158
Figure V.26 : Conductivité thermique des GC à base de granulats de RAC.	159
Figure V.27 : la résistance à l'abrasion des GC à base de granulats de RAC.	160
Figure V.28 : Perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAC.	161
Figure V.29 : Aspect des éprouvettes avant cycle de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAC.	162
Figure V.30 : Aspect des éprouvettes après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAC.	162
Figure V.31 : Corrélation établie entre le module d'élasticité et la résistance à la compression des GC à base de granulats de RAC.	163
Figure V.32 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et le VAS des GC à base de granulats de RAC.	164
Figure V.33 : Corrélation établie entre la conductivité thermique et la porosité des GC à base de granulats de RAC.	165
Figure V.34 : Examen au MEB des mélanges GC.	165
Figure V.35 : Optimisation de la teneur en eau optimale des GC.	166
Figure V.36 : Résistance à la compression des GC.	167
Figure V.37 : Résistance à la traction des GC.	169
Figure V.38 : Indice de CBR des GC.	170
Figure V.39 : Module d'élasticité des GC.	171
Figure V.40 : Auscultation dynamique des GC.	172
Figure V.41 : la porosité des GC à base de granulats de RAP.	173
Figure V.42 : Conductivité thermique des GC à base de granulats de RAP.	174
Figure V.43 : Absorption d'eau des GC.	175
Figure V.44 : La résistance à l'abrasion des GC à base de granulats de RAP.	176
Figure V.45 : Perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAP.	177
Figure V.46 : Aspect des éprouvettes avant cycle de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAP.	178
Figure V.47 : Aspect des éprouvettes après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAP.	178
Figure V.48 : Corrélation établie entre le module d'élasticité et la résistance à la compression des GC à base de granulats de RAP.	179

Figure V.49 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et les VAS des GC à base de granulats de RAP.	180
Figure V.50 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la porosité des GC à base de granulats de RAP.....	181
Figure V.51 : Examen au MEB des mélanges GC.	181
Figure 0.1 : Comparaison des propriétés mécaniques des GC : (a) le variable le sable ; (b) le variable le gravier 3/8 ; (c) le variable la nature des granulats	181
Figure 0.2 : Comparaison des propriétés de durabilité des GC : (a) le variable le sable ; (b) le variable le gravier 3/8 ; (c) le variable la nature des granulats.	

Chapitre VI : Analyse du cycle de vie des GC

Figure VI.1 : Cycle de vie des échantillons étudiés.	189
Figure VI.2 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre GC à base des RAB, selon IMPACT 2002+.	192
Figure VI.3 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC à base de RAB, selon IMPACT 2002+.	193
Figure VI.4 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre GC à base des RAC, selon IMPACT 2002+.	196
Figure VI.5 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC à base de RAC, selon IMPACT 2002+.	197
Figure VI.6 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre GC à base des RAP, selon IMPACT 2002+.....	199
Figure VI.7 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC à base de RAC, selon IMPACT 2002+.	200
Figure VI.8 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC.	200

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I Généralité sur les MGTLH routiers

Tableau I.1 : matériaux spécifiques pour les chaussées bitumineuses épaisses.	6
Tableau I.2 : Matériaux spécifiques pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques. .	7
Tableau I.3 : matériaux spécifiques pour les chaussées souples.	8
Tableau I.4 : Propriétés du grave ciment	12

Chapitre II : Emploi des déchets dans les MGTLH

Tableau II.1 : Différents types de déchets utilisés dans le domaine de construction	18
Tableau II.2 : Propriétés physiques des agrégats de briques recyclées.	21
Tableau II.3 : composition chimique des agrégats de briques recyclées.	22
Tableau II.4 : Résultats de Proctor modifier	25
Tableau II.5 : Résultats de la teneur en eau et la densité séchée maximale	25
Tableau II.6 : Résistance à la compression à partir de nombreuses études.	30
Tableau II.7 : Résistance à la traction à partir de nombreuses études.	32
Tableau II.8 : composition des mélanges étudiés	37
Tableau II.9 : Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés issues de la littérature.	45
Tableau II.10 : Composition chimiques des granulats recyclés.	46
Tableau II.11 : Résultat du test de compactage pour les mélanges	48
Tableau II.12 : Résultat du test de compactage pour les mélanges	49
Tableau II.13 : Résultat du test de compactage pour les mélanges	50
Tableau II.14 : Valeur de CBR des mélanges étudiés	50
Tableau II.15 : la résistance à la compression du béton étudié.....	53
Tableau II.16 : Variation de la résistance à la compression à partir de nombreuses études.....	56
Tableau II.17 : la résistance à la flexion du béton étudiée	57
Tableau II.18 : Variation de la résistance à la traction à partir de nombreuses études.	59
Tableau II.19 : Module d'élasticité du béton étudié.....	60
Tableau II.20 : Méthodes de test de performance pour évaluer le RCA pour les sous-couches de diverses études	66
Tableau II.21 : Propriété physique des RAP.	69
Tableau II.22 : Composition chimique des RAP.	70
Tableau II.23 : Résultats du test Proctor modifié pour tous les mélanges	70
Tableau II.24 : Résumé de la littérature sur l'effet de l'incorporation de RAP sur la résistance à la compression des mélanges de béton.	72
Tableau II.25 : Résumé de la littérature sur l'effet de l'incorporation de RAP sur la résistance à la traction des mélanges de béton.....	75

Tableau II.26 : Utilisation du RAP dans différents domaines et principaux résultats de la recherche	83
---	----

CH III : Analyse du cycle de vie et du développement durable

Tableau III.1 : Document normatif relatif à l'ACV	91
Tableau III.2 : Résultat ACV	96
Tableau III.3 : Résultat ACV	99

Chapitre VI : MATERIAUX ET ESSAIS

Tableau IV.1 : Exigences normatives pour les granulats (XP P18 545).....	108
Tableau IV.2 : Propriétés physiques d'identification des sables utilisés.	108
Tableau IV.3 : Propriétés physiques d'identification des graviers (3/8) utilisés.	110
Tableau IV.4 : Propriétés physiques d'identification des graviers classe (8/15) utilisés.	110
Tableau IV.5 : Propriétés physiques d'identification des graviers classe (15/20) utilisés.	111
Tableau IV.6 : Reconstitution granulaire du grave classe (0/20) utilisé.....	116
Tableau IV.7 : Quantité d'eau nécessaire pour chaque mélange.	118
Tableau IV.8 : Reconstitution granulaire des mélanges.	119

Chapitre VI : Analyse du cycle de vie des GC

Tableau VI.1 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des GC à base de substitution des RAB, selon IMPACT 2002+.....	191
Tableau VI.2 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des GC à base de substitution des RAC, selon IMPACT 2002+.....	194
Tableau VI.3 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des GC à base de substitution des RAP, selon IMPACT 2002+.....	198
Tableau VI.4 Comparaison des propriétés des GC Sachant que la variable est la nature du sable.	203
Tableau VI.5 : Comparaison des propriétés des GC Sachant que la variable est la nature du gravier (3/8).....	203
Tableau VI.6 : Comparaison des propriétés des GC Sachant que la variable est st la nature des granulats	204

LISTE DES ABREVIATIONS

ACV : Analyse cycle de vie
BB : Béton bitumineux
BC : Brique concassée
BCR : Bétons compactés au rouleau
BGN : Bétons à granulats nature
BGR : Bétons à granulats recyclés
BFS : Laitier de haut fourneau
BHP : Bétons à haute performance
C&DW : Déchet de la Construction et de Démolition.
CBA : Briques concassées
CBA : Mâchefer de charbon
CBR : California Bearing Ratio
CB : Brique concassée
CDW : Déchets de construction et de démolition
CSCBA : Granulats de briques concassées stabilisés au ciment
CSM : Matériaux stabilisés au ciment
CTRB : Recyclage Base traitée au ciment
EME : Enrobé à Module Élevé
ES : Équivalent de sable
FHWA: Federal Highway Administration
FL: Coefficient d'aplatissement
FRAP : Granulats fins d'asphalte récupéré
GB : Grave bitume
GC : Grave ciment
GCR : GC recyclés
GCT : Grave non traitée
GES : Gaz à effet de serre
GGBFS : Laitier de haut fourneau granulé broyé
GL : Graves latéritiques
GR : Granulats recyclés
ITZ : Zone de transition interfaciale
LA : Los Angeles

MDD : Densité sèche maximale
MEB : Microscope Électronique à Balayage
MB : Bleu de méthylène
MDE : Micro Deval
MGTLH : Mélange Granulaire Traité aux Liants Hydrauliques
NA : Granulats naturels
NAPA : National Asphalt Pavement Association
OMC : Teneur en eau optimale
RAB : Granulats de brique recyclé
RAC : Granulats de béton recyclé
RAP : Granulats de déchet de béton bitumineux
RBCA : Agrégats de brique-béton recyclé
RCBA : Granulat de béton recyclé et de briques d'argile
RCCP : Béton compacté au rouleau
RCM : Maçonnerie d'argile concassée recyclée
STLH : Sables Traités aux Liants Hydrauliques
UCS : Résistance à la compression non confinée
VAS : Vitesse d'auscultation sonique
VBS : Valeur de bleu méthylène

ملخص

يشهد العالم تقدماً نوعياً في مجال البناء والطرق مما يساهم في تحسين جودة البنية التحتية هذا التقدم يصاحبه الاهتمام بالاستدامة البيئية التي تتطلب البحث عن مواد بناء صديقة للبيئة. تحتاج صناعة الطرق والبناء إلى مصادر كبيرة من المواد الطبيعية وفي نفس الوقت تولد كميات كبيرة من النفايات لذلك يعتبر استخدام نفايات البناء والطرق حلاً مستداماً.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير نفايات الخرسانة (RAC)، نفايات بقايا صناعة الاجر (RAB) وبقايا الخرسانة الاسفلتية الناتجة عن تقشير طبقات الطرق (RAP) كبديل كلي للرمل (3/0 مم) والحصى (8/3 مم) وبديل كلي للركام الطبيعي في طبقة الأساس للطرق من اجل الحصول على حصى اسمنتية ايكولوجية واقتصادية. كما قمنا بتحليل دورة الحياة لبعض العينات.

أظهرت النتائج أن استعمال نفايات الاجر ونفايات الخرسانة كبديل للرمل يعطي نتائج جيدة للخصائص الميكانيكية في طبقة الأساس للطرق على المدى الطويل مقارنة مع بقايا الخرسانة الاسفلتية الناتجة عن تقشير طبقات الطرق التي أدى استعمالها إلى تناقص للخصائص الميكانيكية في طبقة الأساس للطرق خاصة عند استعمالها في شكل رمال. أما بخصوص ديمومة طبقة الأساس للطرق، فقد تحسنت خصائص هذا الأخير عند استعمال نفايات صناعة الاجر مثل: مقاومة التآكل، التوصيل الحراري مقارنة مع النفايات الأخرى، في حين أدى استعمال بقايا الخرسانة الاسفلتية الناتجة عن تقشير طبقات الطرق في طبقة الأساس للطرق إلى تحسن مقاومة الصقيع مقارنة مع النفايات الأخرى. أظهر التقييم البيئي من خلال تحليل دورة الحياة أن استخدام الركام المعاد تدويره (RAB) و (RAC) و (RAP) في الركام المعالج يوفر أداءً بيئياً متفوقاً، خاصة في مجالات حماية صحة الإنسان وجودة النظم البيئية واستخدام الموارد مقارنة باستخدام الركام الطبيعي. نجحت نتائج هذه الرسالة في تطوير مواد بناء مستدامة وصديقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية: حصى اسمنتية، نفايات الاجر، نفايات الخرسانة، بقايا الخرسانة الاسفلتية الناتجة عن تقشير طبقات الطرق، الخصائص الميكانيكية، الديمومة، تحليل دورة الحياة.

RESUME

Le monde assiste à des avancées qualitatives dans le domaine de la construction et des routes, contribuant à l'amélioration de la qualité des infrastructures. Ces progrès s'accompagnent d'une attention particulière à la durabilité environnementale, nécessitant la recherche de matériaux de construction respectueux de l'environnement. L'industrie des routes et de la construction nécessite d'importantes sources de matériaux naturels, générant simultanément d'importantes quantités de déchets. Ainsi, l'utilisation des déchets de construction et de voirie est considérée comme une solution durable. L'objectif de cette thèse est d'examiner l'emploi des déchets de briques recyclées (RAB), les déchets de béton recyclé (RAC), et les déchets de béton bitumineux (RAP), en tant que substitution complète au sable concassé (0/3 mm) et aux graviers (3/8 mm), ainsi qu'en tant que graves concassées (GC) 0/20 reconstituées, largement utilisées dans la couche de base et/ou de fondation des routes. Ceci vise à obtenir des graves ciment (GC) écologiques et économiques. Dans cette optique, nous avons analysé le cycle de vie des mélanges confectionnés. Les résultats montrent que l'utilisation des RAB et des RAC en remplacement du sable donne des résultats satisfaisants pour les propriétés mécaniques requises de la couche de base traitée aux liants hydrauliques des routes à long terme. En revanche, l'emploi des RAP conduit à une diminution des propriétés mécaniques de la couche de base des routes, notamment lorsqu'ils sont utilisés sous forme de sable. Concernant la durabilité de la couche de base traitée, les propriétés ont été améliorées lors de l'utilisation des RAB, telles que la résistance à l'abrasion et la conductivité thermique, en comparaison avec les autres types de déchets. En revanche, l'utilisation des RAP a amélioré la résistance au gel par rapport aux autres types de déchets. L'évaluation environnementale à travers l'analyse du cycle de vie a démontré que l'utilisation de granulats recyclés (RAB, RAC, et RAP) dans les graves traitées offre des performances environnementales supérieures, notamment dans les domaines de la protection de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes, et de l'utilisation des ressources, par rapport à l'utilisation de granulats naturels. Les résultats obtenus de cette thèse nous permettent d'aboutir à des matériaux de construction respectueux de l'environnement à travers l'emploi d'une évaluation environnementale quantitative, tout en présentant des propriétés mécaniques acceptables.

Mots-clés : Grave Ciment, Déchets de Briques Recyclés, Déchets de Béton Recyclé, Déchets de béton bitumineux, Propriétés Mécaniques, Durabilité, Analyse du Cycle de Vie.

ABSTRACT

The world is witnessing qualitative advancements in the construction and road sector, contributing to the enhancement of infrastructure quality. These advancements are coupled with a particular focus on environmental sustainability, necessitating the exploration of environmentally friendly construction materials. The road and construction industry necessitates significant sources of natural materials, simultaneously generating substantial amounts of waste. Thus, the utilization of construction and roadway waste is deemed a sustainable solution. The aim of this thesis is to examine the use of recycled brick waste (RAB), recycled concrete waste (RAC), and recycled asphalt pavement (RAP), as a complete substitute for crushed sand (0/3 mm) and gravel (3/8 mm), as well as reconstituted crushed aggregates (GC) 0/20, widely used in the base and/or foundation layers of roads. This aims to obtain environmentally friendly and cost-effective crushed aggregates (GC). In this context, we analyzed the life cycle of the prepared mixtures. The results indicate that the use of RAB and RAC as replacements for sand yields satisfactory results for the required mechanical properties of the base layer treated with hydraulic binders in long-term road applications. Conversely, the use of RAP leads to a decrease in the mechanical properties of road base layers, particularly when it was as sand form. Regarding the durability of the treated base layer, properties were enhanced with the use of RAB, such as abrasion resistance and thermal conductivity, compared to other types of waste. However, the use of RAP improved resistance to freezing compared to other types of waste. Environmental assessment through life cycle analysis has demonstrated that the use of recycled aggregates (RAB, RAC, and RAP) in treated aggregates offers superior environmental performance, especially in the areas of human health protection, ecosystem quality, and resource utilization compared to the use of natural aggregates. The results obtained from this thesis enable us to achieve environmentally friendly construction materials through the use of quantitative environmental assessment, while still maintaining acceptable mechanical properties.

Keywords: Cement-treated Aggregate (GC), Recycled Brick Waste, Recycled Concrete Waste, recycled asphalt pavement, Mechanical Properties, Durability, Life Cycle Analysis

Introduction générale

Le monde actuel est témoin d'un développement considérable dans le domaine de la construction et des travaux publics, entraînant une forte demande en matériaux de construction naturels non renouvelables. Cette tendance est en contradiction avec les principes du développement durable et engendre des dommages environnementaux ainsi que des pénuries de ressources, préjudiciables aux générations futures. En plus de l'épuisement des ressources naturelles telles que les granulats, le processus de fabrication nécessite une quantité importante d'énergie, entraînant une pollution significative de l'environnement. Ainsi, l'industrie routière est confrontée depuis quelques années à la nécessité de promouvoir une sensibilisation écologique et de développer des pratiques durables afin de respecter l'environnement.

L'utilisation de déchets solides tels que les déchets de construction et de briques est l'une des solutions proposées pour contrer l'épuisement des ressources naturelles, préserver l'environnement et promouvoir le développement durable. Dans ce contexte, le recyclage des déchets en tant que technique routière a connu un développement notable en raison de ses bons résultats tant sur le plan mécanique qu'environnemental. Le recyclage des déchets est souvent considéré comme une alternative à l'épuisement des ressources. Les produits issus de ce processus peuvent éventuellement remplacer partiellement ou totalement ceux issus de ressources non renouvelables telles que le pétrole ou les minéraux. Cependant, pour que les avantages environnementaux du recyclage se concrétisent, les produits recyclés doivent présenter un avantage global par rapport à leurs équivalents non recyclés. Cela souligne l'importance d'évaluer rigoureusement et quantitativement les performances environnementales des produits recyclés à l'aide d'outils et de méthodes appropriés afin de garantir la durabilité du processus de recyclage et de réduire la dépendance aux ressources naturelles non renouvelables.

Dans ce contexte, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) se distingue comme une méthode fondamentale. Elle offre deux avantages majeurs : elle vise à évaluer de manière exhaustive les impacts environnementaux et repose sur une approche globale du cycle de vie, prenant en compte les étapes de fabrication, d'utilisation et de fin de vie du système étudié. Ainsi, elle permet d'identifier les points faibles d'un système et de proposer des améliorations pour favoriser une conception écologique.

Notre travail s'inscrit dans cette optique, en mettant l'accent sur l'exploration des opportunités de valorisation des déchets tels que la brique (RAB), le béton (RAC) et les déchets de béton bitumineux (RAP) dans le contexte de la construction routière, notamment dans les couches de base et de fondation. L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'amélioration de la durabilité, de l'efficacité et de la rentabilité des projets de construction routière en se concentrant sur l'exploration des opportunités de valorisation de ces déchets dans les couches de base et de fondation. Cette recherche peut avoir un impact significatif sur l'industrie de la construction routière et sur la protection de l'environnement. Dans cette vision, la première phase de notre plan expérimental consiste à caractériser les sous-produits qui seront utilisés, puis à étudier les caractéristiques physiques et mécaniques des mélanges de grave ciment (GC) avec l'incorporation de ces déchets (RAB, RAC et RAP), que ce soit sous forme de granulats par substitution totale de certains agrégats ou par remplacement total de la grave 0/20. Ensuite, nous procéderons à une évaluation environnementale des GC naturelles et à base de granulats recyclés afin de contribuer au développement d'un matériau de construction à impact environnemental limité.

Cette thèse est structurée en deux parties (A et B) comme suit :

Partie A : Synthèse bibliographique et Cadre théorique

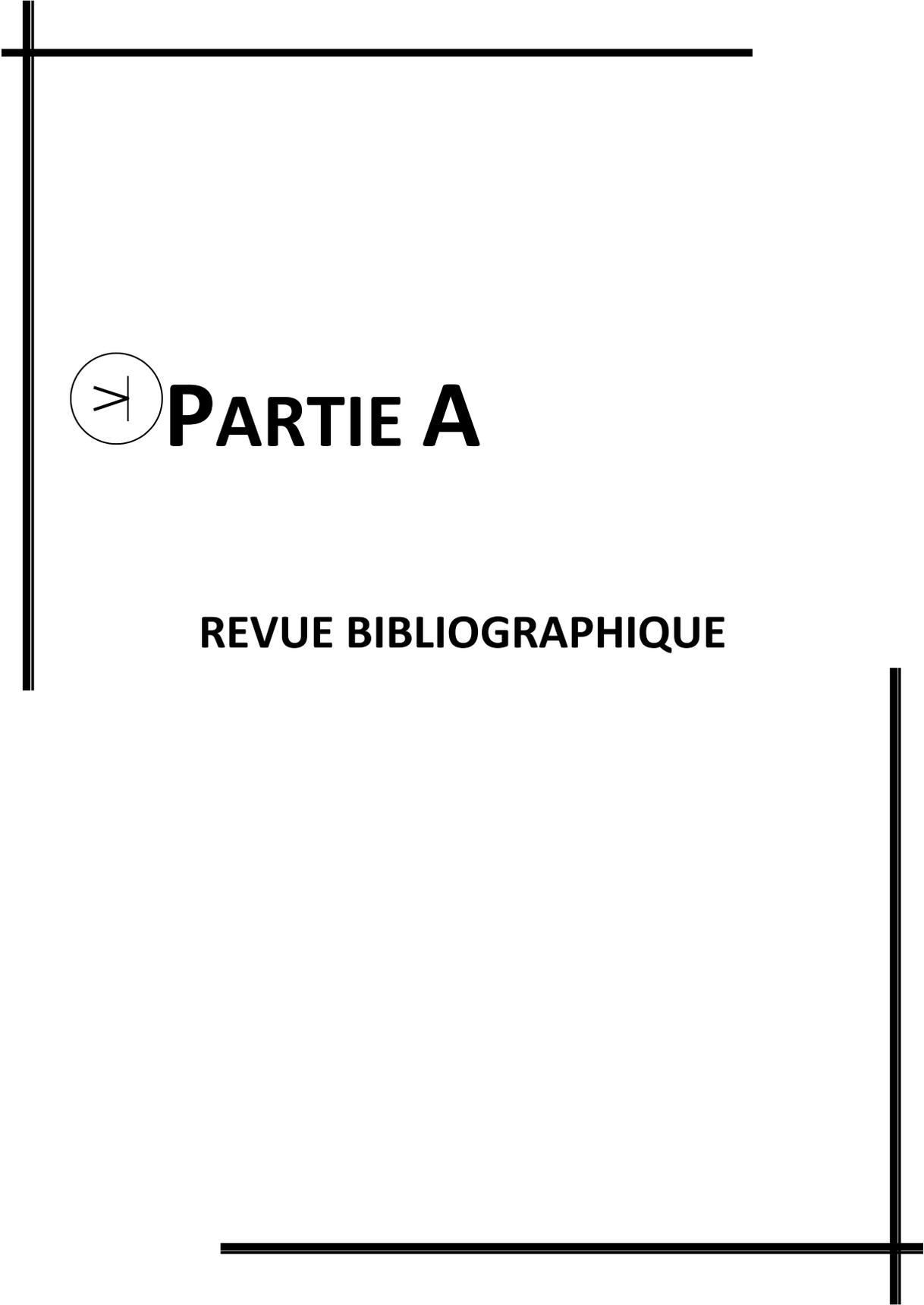
- Le premier chapitre aborde une synthèse bibliographique sur les chaussées, comprenant une introduction générale, une revue de la littérature sur les matériaux utilisés dans la construction des chaussées, et une synthèse bibliographique sur les mélanges granulaires traités aux liants hydrauliques (MGTLH).
- Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'utilisation des déchets dans les MGTLH, incluant une revue de la littérature sur l'utilisation des déchets (RAB, RAC et RAP) sous forme de granulats dans les matériaux cimentaires.
- Le troisième chapitre traite de l'ACV et de son application dans les matériaux cimentaires.

Partie B : Étude expérimentale et résultats

- Le quatrième chapitre décrit la caractérisation des matériaux utilisés dans la préparation des divers mélanges de GC (MGTLH), ainsi que la méthodologie de formulation du GC et les détails des essais mécaniques, de durabilité et de microstructure.
- Le cinquième chapitre présente les résultats des différents essais sur les mélanges de GC avec leurs interprétations.

- Le dernier chapitre expose les résultats de l'analyse du cycle de vie.

Ce travail se conclut par une synthèse générale des résultats obtenus, suivie de recommandations et de perspectives pour les travaux futurs.



 **PARTIE A**

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I Généralité sur les MGTLH routiers

Ce chapitre s'articule autour de la présentation des éléments constitutifs d'une chaussée, de ses différents types et des fonctions primordiales des couches qui la composent. En outre, une synthèse bibliographique sur les Mélanges Granulaires Traités aux Liants Hydrauliques (MGTLH) sera proposée, visant à apporter une compréhension théorique approfondie de ces mélanges et de leur importance dans le domaine de la construction routière.

Sommaire partiel

<u>I.1</u>	<u>Généralités sur les chaussées</u>	4
<u>I.1.1</u>	<u>Définition</u>	4
<u>I.1.2</u>	<u>Description fonctionnelle des couches de chaussée</u>	5
<u>I.1.3</u>	<u>Classement des structures de chaussée</u>	6
<u>I.2</u>	<u>Matériaux de chaussées</u>	9
<u>I.2.1</u>	<u>Matériaux naturels</u>	9
<u>I.2.2</u>	<u>Matériaux traités au liant hydrocarboné</u>	9
<u>I.2.3</u>	<u>Matériaux traités au liant hydraulique :</u>	10
<u>I.3</u>	<u>Matériaux routiers traités aux liants hydrauliques (MTLH) ou (GC)</u>	10
<u>I.3.1</u>	<u>Définition</u>	10
<u>I.3.2</u>	<u>Historique des MGTLH</u>	11
<u>I.3.3</u>	<u>Constitution des MGTLH</u>	11
<u>I.3.4</u>	<u>Performances des graves ciments</u>	12
<u>I.3.5</u>	<u>Cadre normatif des MGTLH</u>	13
<u>I.3.6</u>	<u>Avantages et inconvénients d'incorporation des MGTLH</u>	14
<u>I.4</u>	<u>Conclusion</u>	16

I.1 Généralités sur les chaussées

I.1.1 Définition

Une chaussée est généralement définie comme un ensemble de couches superposées de matériaux reposant sur une plateforme appelée plateforme support. La nature des matériaux de chaque couche peut varier, ce qui entraîne des différences dans les interfaces entre les couches. Ces interfaces peuvent être collées (adhérentes), semi-collées (glissantes) ou décollées en fonction des matériaux utilisés et de la conception de la chaussée.

La structure d'une chaussée, illustrée dans la figure I.1, est composée de trois types de couches, éventuellement avec des sous-couches [5] :

- La couche de surface, qui est en contact direct avec la circulation. Elle peut être composée de deux sous-couches : une couche de liaison et une couche de roulement.
- La couche d'assise, qui constitue l'élément structurel principal de la chaussée. Elle se divise en deux sous-couches : la couche de fondation et la couche de base.
- La couche de forme assure la transition entre la structure de la chaussée et la partie supérieure des terrassements. L'interface entre la couche de forme et la couche d'assise est appelée plateforme de chaussée, et elle a pour fonction de répartir les charges dues

à la circulation des véhicules sur le sol sans dommages. L'interface entre la couche de forme et le sol support est appelée arase de terrassement.

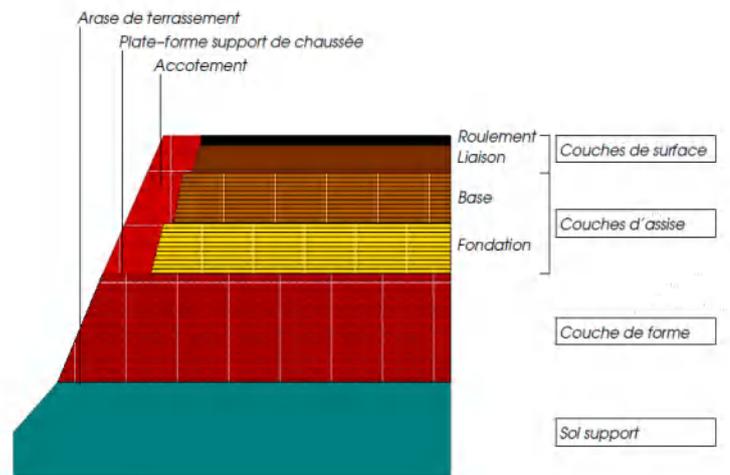


Figure I.1: Structure de chaussées [2].

I.1.2 Description fonctionnelle des couches de chaussée

Dans une structure de chaussée (Figure I.2), on rencontre en général les couches suivantes :

- La couche de forme est une structure, parfois complexe, conçue pour adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises en compte dans la conception de la chaussée. Elle permet ainsi de fournir une surface adaptée pour la construction de la chaussée [6].
- Les couches d'assises se composent de deux couches distinctes : la couche de fondation située en dessous de la couche de base. Ces couches sont généralement constituées de matériaux élaborés, souvent liés, ce qui est particulièrement courant pour les chaussées à trafic intense. Leur rôle est de conférer à la chaussée une résistance mécanique nécessaire pour supporter les charges induites par la circulation. De plus, elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans des limites acceptables [7].

- La couche de surface est composée d'une couche de roulement, qui constitue la couche supérieure de la structure de la chaussée et qui est directement exposée aux agressions conjuguées du trafic et des conditions climatiques. Dans certains cas, on peut également trouver une couche de liaison, positionnée entre les couches d'assise et la couche de roulement. La couche de surface joue un rôle essentiel dans la durabilité de la structure de la chaussée, notamment en assurant l'étanchéité vis-à-vis de la couche d'assise [7].

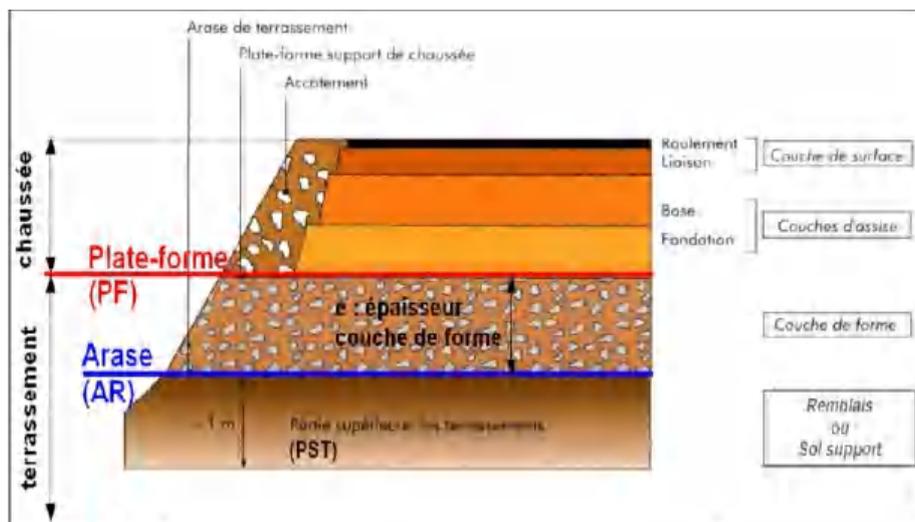


Figure I.2: Coupe type d'une chaussée [8].

I.1.3 Classement des structures de chaussée

Les structures de chaussée sont classées en six familles selon leur composition, comme indiquées par [8]. Ces familles comprennent :

- 1) Les chaussées bitumineuses épaisses se caractérisent par la présence d'une couche de roulement bitumineux reposant sur un corps de chaussée composé de matériaux bitumineux, généralement disposés en une, deux, voire trois couches, avec une épaisseur totale variante de 15 à 40 cm, conformément aux normes [AFNOR, 1992 a] et [Hervé BRUNEL, 2007]. Les matériaux utilisés pour cette structure sont répertoriés dans le tableau I-1 ci-dessous [9].

Tableau 0.1 : matériaux spécifiques pour les chaussées bitumineuses épaisses.

Couches	Matériaux	Source
Couche de fondation	-Grave bitume de calsse2, GB2 -Grave bitume de calsse3, GB3	LCPC 1994 [7]

	-Enrobé à module élevé de classe 2, EME2	
Couche de base	-Grave bitume de calsse2, GB2 -Grave bitume de calsse3, GB3 -Enrobé à module élevé de classe 2, EME2	LCPC 1994 [7]
Couche de surface	Les enrobés de revêtements	LCPC 1994 [7]

2) Les chaussées à assise traitées aux liants hydrauliques se caractérisent par une couche de surface bitumineuse mince, d'une épaisseur inférieure à 15 cm, parfois réduite à un simple enduit superficiel. Cette couche repose sur une assise composée de matériaux traités aux liants hydrauliques, qui sont disposés en une couche (base) ou en deux couches (base et fondation), conformément aux normes [AFNOR, 1992a] et [Hervé BRUNEL, 2007]. L'épaisseur totale de la chaussée varie généralement de 30 à 60 cm. La norme NFP 98-080-1 (AFNOR, 1992a) les définit comme une structure de chaussée dans laquelle la couche de base (et la couche de fondation) est traitée aux liants hydrauliques (norme NF P 15-301), tandis que seule la couche de surface est traitée aux liants hydrocarbonés. Les matériaux spécifiques pour ce type de structure sont répertoriés dans le Tableau I.2.

Tableau 0.2 : Matériaux spécifiques pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

Couches	Matériaux	Source
Couche de base et fondation	-Grave ciment (GC) de classe G3 et G4 -Grave cendre hydraulique (GCH) de classe G3 -Grave laitier Pré broyé (GLp) de classe G2 -Grave cendres volantes silico-alumineuses – chaux (GCV) de classe G3 -Sable traités (SH) de class S3	LCPC 1994 [7]
Couche de surface	-Les enrobés de revêtements	LCPC 1994 [7]

3) Les chaussées à structures mixtes sont caractérisées par la présence d'une couche de surface et d'une couche de base en matériaux bitumineux, ayant des épaisseurs de 10 à 20 cm, reposant sur une couche de fondation traitée aux liants hydrauliques, d'une épaisseur de 20 à 40 cm [2].

4) Les chaussées rigides, ou chaussées en béton de ciment, se composent d'une dalle de béton pervibré ou fluide d'environ 25 cm d'épaisseur. Cette dalle repose sur une couche

de fondation en grave ciment d'environ 15 cm d'épaisseur (figure I.3). Pour prévenir une fissuration anarchique du béton, des joints transversaux sont réalisés tous les 4 à 5 mètres, en plus des joints longitudinaux. En raison de son coût élevé et de sa complexité de mise en œuvre, ce type de chaussée est relativement peu courant à l'échelle mondiale [10].

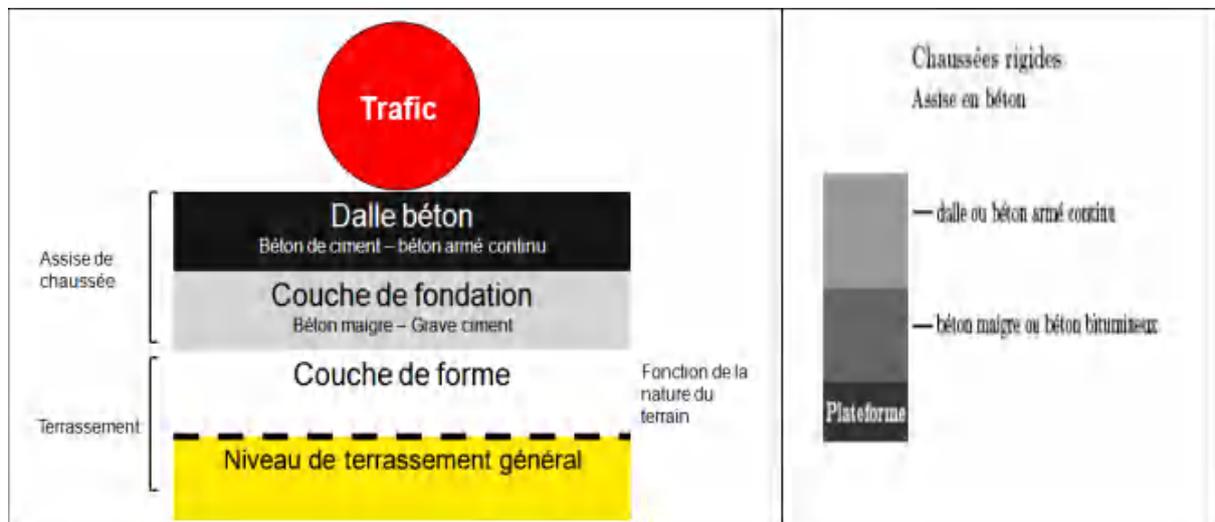


Figure I.3 : Composantes d'une chaussée [10].

5) Les chaussées à structure souple sont caractérisées par une couverture bitumineuse mince, d'une épaisseur généralement inférieure à 15 cm, parfois réduite à un simple enduit superficiel. Cette couche repose sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités [11]. Les matériaux spécifiques pour les chaussées souples sont répertoriés dans le Tableau I.3 ci-dessous.

Tableau 0.3 : matériaux spécifiques pour les chaussées souples.

Couches	Matériaux	Source
Couche de fondation	-Grave non traitée (GNT)	LCPC [7, 12]
Couche de base	-Grave bitume de classe 3 (GB3) -grave non traitée (GNT)	LCPC [7, 12]
Couche de surface	-Les enrobés bitumineux de revêtements - Les enduits superficiels	LCPC [7, 12]

6) Les chaussées à structure inverse sont constituées d'une couche de roulement et d'une couche de liaison en matériaux bitumineux, avec une épaisseur d'environ 15 cm, une

couche de base en matériaux non traités, et une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. En général, l'épaisseur totale de ces chaussées varie entre 60 et 80 cm [5].

I.2 Matériaux de chaussées

Il est possible de classer les matériaux en trois (3) grandes familles qui sont [10] :

I.2.1 Matériaux naturels

Il existe plusieurs types de matériaux granulaires tels que :

- les graves latéritiques (GL) ;
- les sables argileux ;
- les graves non traitées (GNT).

I.2.2 Matériaux traités au liant hydrocarboné

Il y a maintenant un seul type, à savoir l'enrobé bitumineux. Effectivement, étant donné les caractéristiques cancérigènes du bitume, son utilisation en tant que liant est abandonnée au profit du goudron. De cette manière, on peut identifier différents types d'enrobés bitumineux en fonction de la granulométrie, du degré de compactage, du grade et du dosage en bitume :

- le grave bitume (GB) ;
- le béton bitumineux (BB) ;
- l'enrobé à module élevé (EME).

De même, à travers le mode de production, on distingue deux types d'enrobés qui sont les enrobés à chaud et les enrobés à froid ou grave émulsion.

Les matériaux traités au liant hydrocarboné sont largement préférés pour les chaussées souples et pour le trafic en raison de leur capacité à offrir un compromis optimal entre des performances moyennes, comparées à celles des matériaux traités au liant hydraulique, et une capacité de déformation des fissures de support qui leur permet de supporter des déflexions très élevées.

I.2.3 Matériaux traités au liant hydraulique :

Il existe différents types de matériaux qui sont traités avec du liant hydraulique. Par conséquent, en fonction du matériau utilisé, il y aura des matériaux traités tels que le ciment, la chaux, au laitier ou les cendres volantes. Donc, en fonction de la taille du matériau et de la quantité de liant hydraulique utilisée, on peut observer :

- Les graves traités au liant hydraulique ;
- Les sables traités au liant hydrauliques ;
- Les bétons compactés ;
- Les graves hydrauliques à haute performances.

Ces matériaux sont largement utilisés pour les chaussées à fort trafic en raison de leurs avantages, notamment ;

- Leur performance élevée avec un module d'élasticité élevé ;
- Leur résistance élevée à la compression et à la traction ;
- Leur bonne résistance à la fatigue et leur durabilité élevée.

Cependant, ils présentent également un inconvénient majeur du point de vue de la pathologie de la chaussée, car des fissurations se produisent lors du retrait du béton.

I.3 Matériaux routiers traités aux liants hydrauliques (MTLH) ou (GC)

I.3.1 Définition

Les matériaux traités aux liants hydrauliques se composent de granulats, de liants hydrauliques, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Ils sont distingués comme suit :

- Les sables traités aux liants hydrauliques (STLH), définis par la norme NF P 98-113, avec des granulats ayant un diamètre inférieur à 6,3 mm;
- Les graves traitées aux liants hydrauliques (GTLH), définies par la norme NF P 98-116, avec des granulats pouvant atteindre un diamètre maximal (Dmax) de 31 mm, bien que la valeur la plus courante de D max soit de 20 mm. Cette spécification vise à garantir l'homogénéité en facilitant le malaxage et en réduisant la ségrégation lors du transport et de la mise en œuvre [7].

À partir de février 2005, ces deux normes (NF P 98-113 et NF P 98-116) ont été remplacées par la norme NF EN 14227-5 concernant les mélanges traités au liant hydraulique routier).

Dans cette thèse, le travail expérimental portera spécifiquement sur les graves traitées aux liants hydrauliques (MGTLH), notamment les graves ciments (GC).

I.3.2 Historique des MGTLH

Au cours des années 1950, a été commencé à utiliser des matériaux traités au liant hydraulique dans les structures de chaussée. Au cours de cette période, les pays occidentaux ont commencé à utiliser les MGTLH dans la construction des routes. Le principal sujet était le grave-ciment et le grave-laitier. Grâce à la construction de ces structures, les ingénieurs routiers ont dû faire face à une fissuration qui n'était pas causée par la fatigue prématurée de la chaussée. C'est la raison pour laquelle, dès 1964, on envisage des études de fissuration sur les graviers en ciment et graviers laitiers afin de comprendre et évaluer les répercussions de ce phénomène, ainsi que de proposer des solutions pour lutter contre la fissuration [2, 13].

Au cours des années 1960, en raison de l'augmentation du trafic lourd sur les routes, en particulier en France, les designers de routes ont été contraints de renoncer à l'utilisation de matériaux non traités dans les assises de chaussées. En France et en Europe, cette tendance a été encouragée, ce qui a permis d'augmenter considérablement les opportunités de valorisation des matériaux naturels existants ou de retraitement des anciennes chaussées. Le traitement de ce genre permet également de diminuer les problèmes liés aux approvisionnements et aux délais de chantier et d'améliorer la durabilité des structures (réduction de la fissuration, meilleure résistance au gel, réduction des résistances mécaniques dans le temps...)[2, 13].

Avec l'introduction des structures semi-rigides dans le catalogue des structures de chaussées de (SETRA LCPC) à partir de 1971, les fissures de retrait des chaussées du réseau routier national conçu selon cette technique ont été considérées comme une dégradation, car elles sont acceptées dès lors que l'on a choisi une telle structure. L'application du catalogue des structures de chaussées de 1977 a été étendue [2, 13].

I.3.3 Constitution des MGTLH

- **Liant hydraulique routier** : Dans le domaine des techniques routières, on ajoute des liants hydrauliques en faibles quantités à des granulats afin de produire des matériaux

routiers traités avec ces liants hydrauliques. Le liant joue un rôle essentiel en garantissant la résistance mécanique à long terme. Dans cette présente thèse, le mot « liant hydraulique » désignera « ciment » doit être conforme à EN 197-1 [14].

- **Granulats** : Les granulats doivent être conformes à la norme EN 12524. Ils doivent être concassés ou non, ou encore être une combinaison des deux ; ils doivent être d'un des types suivants :
 - Granulat naturel ou artificiel ;
 - Granulat de construction recyclé ;
 - Combinaison des deux.
- **Eau** : on utilise de l'eau destinée à la consommation humaine, qui est classée de type 1 en fonction de la quantité de matières dissoutes et de matières en suspension conformément à la norme NF P 98-100. L'étude spécifique de cette eau n'est pas nécessaire pour la fabrication des matériaux traités pour les liants hydrauliques [14].
- **Adjuvants** : les adjuvants doivent être conformes à la norme EN 934-2, les accélérateurs ou retardateurs éventuellement utilisés doivent être intégrés dans la conception de mélange (NF EN 14227-1).

I.3.4 Performances des graves ciments

Les propriétés structurales des graves ciments dépendent du matériau sol/agrégat, de la quantité de ciment, des conditions de cure et de l'âge. Les propriétés typiques du matériau GC sont présentées dans le tableau I.4.

Tableau 0.4 : Propriétés des graves ciments [15].

Propriété	Valeurs de 7 jours
Résistance à la compression	300 – 800 psis (2.1–5.5 MPa)
Module de rupture	100 – 200 psis (0.7–1.4 MPa)
Module d'élasticité	600,000 – 1, 000,000 psi (4,100 - 6,900 MPa)
Coefficient de Poisson	0.15

I.3.5 Cadre normatif des MGTLH

I.3.5.1 Domaine d'application

Les MGTLH sont utilisés dans la construction et l'entretien des couches de base et de fondation de chaussées des routes selon la norme NF EN-14227-1.

Il est souvent utilisé dans les autoroutes, les rues et les routes locales, les accès, les applications commerciales et les applications industrielles lourdes. La base traitée au ciment est également courante dans les applications d'aérodrome, en particulier les applications sur les grandes pistes d'aéroport Garber, Rasmussen [1].

I.3.5.2 Formulation

L'étude de formulation est spécifiée par la norme européenne EN-14227. Le but a défini un mélange dont les performances répondent aux exigences de dimensionnement de la chaussée. Il est nécessaire de disposer de tous les constituants qui seront effectivement utilisés pour la réalisation. L'étude d'une formule non éprouvée, dite « étude complète », doit couvrir tous les éléments suivants (NF EN 14227-1) :

- Les essais d'identification et de caractérisation des constituants.
- Le dosage des constituants ;
- La tolérance de la formule retenue aux variations de dosage et de densité ;
- La détermination des performances mécaniques sur des éprouvettes curées au laboratoire dans des conditions prescrites par la norme (NF EN 14227-1, annexe C, méthode A) ;
- Le délai de maniabilité du mélange, lequel doit être ajusté en fonction des besoins du chantier au moyen de l'ajout d'un retardateur ;
- Le comportement du mélange au compactage.

I.3.5.3 Choix des constituants

A) Liant hydraulique

La provenance et les caractéristiques techniques du liant utilisé pour la formulation doivent être documentées par des fiches techniques et bonnes de livraison. Il doit être conforme à la norme NF EN 197-1.

B) Granulats

La provenance et la nature des granulats doivent être documentées. Leurs caractéristiques intrinsèques doivent répondre aux exigences des normes NF EN13242 et NF EN 13285/XPP 18-545, en fonction de la charge de trafic (Code D).

C) *L'eau de gâchage*

La provenance et la nature de l'eau de gâchage doivent être documentées. Leurs caractéristiques intrinsèques doivent répondre aux exigences de la norme NF EN 100.

I.3.5.4 Exigences relatives au mélange

La granularité du mélange (liant compris) doit être calculée en masse, en tenant compte de la granularité du granulat et de la teneur en liant comprenant l'addition de laitier de haut fourneau granulé broyé s'il en est fait usage, selon NF EN 14227-1, art 6.4.

✓ Teneur en liant : La teneur minimum en liant doit être de 3 % de la masse totale des constituants secs, selon NF EN 14227-1, art 6.2.

I.3.6 Avantages et inconvénients d'incorporation des MGTLH

I.3.6.1 Avantages :

Malgré le phénomène de fissuration, les avantages suivants ont laissé les constructeurs de route d'opter toujours pour cette technique :

✓ Le grave ciment fournit une base plus rigide et résistante qu'une base granulaire non liée.

✓ Une base plus rigide (GC) réduit les déviations dues aux charges de trafic, ce qui réduit les contraintes sur la surface de l'asphalte. Cela retarde l'apparition de la détérioration de la surface, comme la fissuration par fatigue, et prolonge la durée de vie de la chaussée (voir la figure I.4).

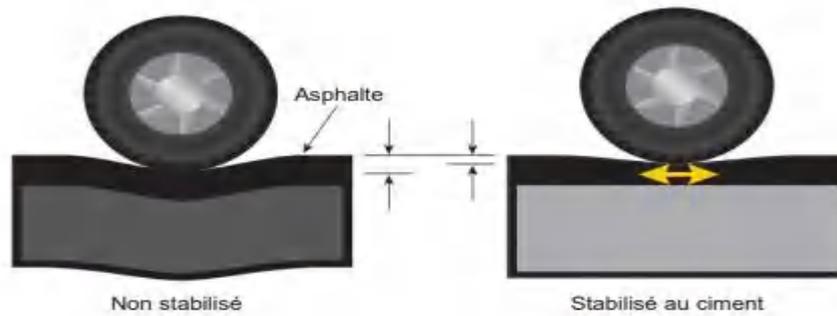


Figure I.4 : Structure des chaussées non stabilisées et stabilisées au ciment Halsted, Luhr [15].

Les bases non stabilisées ont une déflexion élevée en raison de leur faible rigidité, ce qui entraîne des contraintes de surface élevées et une éventuelle fissuration par fatigue. La rigidité plus élevée fournie par les bases stabilisées au ciment produit des déflexions plus faibles, ce qui entraîne des contraintes de surface inférieures et une durée de vie de la chaussée plus longue.

✓ Les épaisseurs de GC sont inférieures à celles requises pour des assises granulaires supportant le même trafic, car les charges sont réparties sur une grande surface (voir figure I.5). Le support solide et uniforme fourni par le GC réduit les contraintes appliquées au sol de fondation. Une section stabilisée au ciment plus mince peut réduire davantage les contraintes du sous-sol qu'une couche plus épaisse de base de granulats non traités. Les défaillances de la plate-forme, les nids-de-poule et la rugosité de la route sont ainsi réduites.

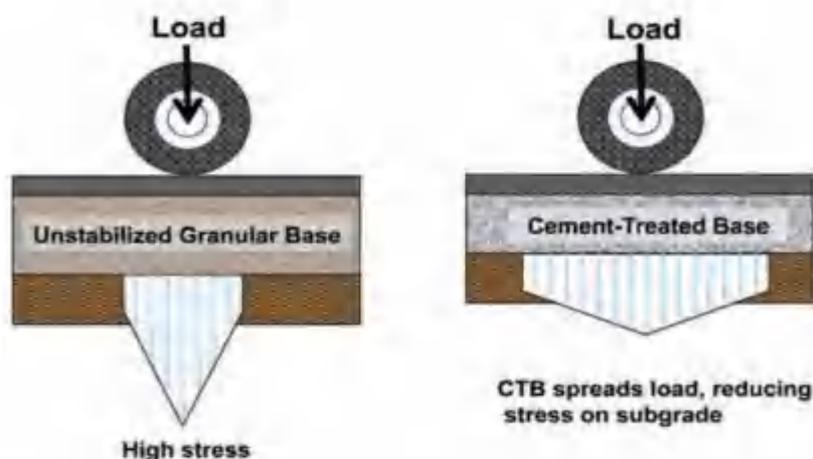


Figure I.5 : Répartition de la charge du GC par rapport à la base granulaire non stabilisée [1].

✓ Une grande variété de sols in situ et d'agrégats manufacturés peuvent être utilisées pour le GC. Cela élimine le besoin de transporter des agrégats granulaires sélectionnés coûteux.

✓ Le GC fournit une base durable dans tous les types de climats. En tant que matériau d'ingénierie, il est conçu pour résister aux dommages causés par les cycles de mouillage et de séchage et de gel et dégel.

1.3.6.2 Inconvénients :

- Fissuration de retrait thermique qui ne peut être évitée, les facteurs influençant la fissuration en retrait sont les suivants : (nature et granulométrie des granulats, nature et dosage du liant, période de mise en œuvre, climat annuel, trafic, épaisseur et nature de l'enrobé bitumineux de surface),
- Nécessite d'une épaisseur minimale par couche, même pour un trafic faible (environ 15 cm)
- Diminution importante de la résistance en fatigue pour un léger sous-dimensionnement
- Comportement avant prise, dessiccation, tenue de la surface, sensibilité aux intempéries et au gel précoce Halsted, Luhr [15].

I.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les chaussées et leur structure. Nous avons pu appréhender l'importance cruciale des Mélanges Granulaires Traités aux Liants Hydrauliques (MGTLH) dans le secteur de la construction routière, en examinant en détail leur composition ainsi que les normes qui encadrent leur utilisation. Cette compréhension approfondie constitue une base essentielle pour la suite de notre étude, où nous explorerons plus en profondeur les performances, les avantages et les défis associés à l'intégration des MGTLH dans les projets de construction routière.

II. Chapitre II Emploi des déchets dans les MGT LH

La valorisation des déchets dans les matériaux cimentaires émerge comme une alternative écologique et économique prometteuse. En plus de réduire l'accumulation de déchets dans les sites d'enfouissement, cette pratique offre la possibilité de transformer ces matériaux résiduels en une nouvelle source de construction. Avec l'effondrement de nombreux bâtiments dans plusieurs pays industrialisés, le volume des déchets de construction et de démolition (DCD) est estimé à près d'un million de tonnes. Ces déchets représentent une menace sérieuse pour l'écosystème et la qualité des nappes phréatiques. Ainsi, substituer les matériaux naturels par des déchets industriels ou de démolition présente une double opportunité : réduire les déchets produits par l'industrie tout en créant des matériaux potentiellement moins coûteux et plus résistants.

Sommaire partiel

II.1	<u>DIFFERENTS TYPES DES DECHETS</u>	18
II.2	<u>GRANULATS DE BRIQUE RECYCLE</u>	19
II.2.1	<u>Source de brique</u>	19
II.2.2	<u>Recyclage des déchets de brique dans le monde</u>	20
II.2.3	<u>Propriétés des agrégats de briques recyclées</u>	20
II.2.4	<u>Influence de RAB sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires</u>	23
II.2.5	<u>Effet du granulat de brique recyclé sur la durabilité des matériaux cimentaires</u>	36
II.2.6	<u>Récapitulatif sur l'emploi des briques recyclées</u>	42
II.3	<u>GRANULATS DE BETON RECYCLE</u>	42
II.3.1	<u>Source du granulat de béton recyclé</u>	42
II.3.2	<u>Recyclage des déchets de béton dans le monde</u>	43
II.3.3	<u>Recyclage des déchets de béton en Algérie</u>	44
II.3.4	<u>Propriétés des granulats de béton recyclé</u>	44
II.3.5	<u>Influence du RAC sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires</u>	48
II.3.6	<u>Effet du RAC sur la durabilité des matériaux cimentaires</u>	61
II.4	<u>Récapitulatif sur l'évaluation des performances des RAC</u>	66
II.5	<u>Granulat de déchet de béton bitumineux</u>	67
II.5.1	<u>Source du granulat de déchet de béton bitumineux</u>	68
II.5.2	<u>Recyclage du granulat de déchet de béton bitumineux</u>	68
II.5.3	<u>Propriétés du granulat de déchet de béton bitumineux</u>	68

II.5.4	<u>Influence de RAP sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires</u>	70
II.5.5	<u>Effet du granulat RAP sur la durabilité des matériaux cimentaires</u>	78
II.5.6	<u>Récapitulatif sur l'évaluation des performances des RAP</u>	83
II.6	<u>Conclusion partielle</u>	83

II.1 DIFFERENTS TYPES DES DECHETS

Au cours des dernières décennies, une observation a été faite selon laquelle les déchets provenant des secteurs de la construction et de la démolition représentent un volume important qui connaît une augmentation significative chaque année. Les déchets de construction et de démolition (C&D) englobent divers matériaux tels que le béton, briques, tuiles, céramique, verre, plastique, bois, etc. [4]

Le tableau II.1 suivants représente les différents types de déchets utilisés dans le domaine de construction.

Tableau II.1 : Différents types de déchets utilisés dans le domaine de construction

Auteur	Type de déchets	Granulats ou Poudre	Domaine d'application
Debieb et Kenai [4]	Brique	Granulats fin et grossier	Béton
Settari et al [16]	Déchets de routes	Granulats fin et grossier	Béton compacté au rouleau
Ouldkaoua [17]	Déchets de verre	Granulats fin	Béton autoplaçant
Guendouz et al [18]	Déchets de plastique	Poudre et fibres	Béton de sable

La sélection minutieuse des déchets de construction destinés à la couche de base et/ou de fondation des routes revêt une importance capitale dans la promotion du développement durable des infrastructures routières. Notre étude se focalise sur l'identification et l'évaluation de matériaux dérivés de déchets de construction susceptibles d'être intégrés de manière efficiente et respectueuse de l'environnement dans la construction des chaussées. À travers une analyse approfondie, nous avons identifié certains matériaux recyclés tels que les granulats issus de béton concassé et d'asphalte, ainsi que les déchets de brique. Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques optimales tout en réduisant l'empreinte carbone associée à la fabrication de nouveaux matériaux. Cette sélection pré-

liminaire repose sur des critères techniques, environnementaux et économiques, contribuant ainsi à une gestion durable des déchets de construction tout en améliorant la performance à long terme des infrastructures routières.

II.2 GRANULATS DE BRIQUE RECYCLE

Les déchets industriels ou de démolition ont été exploités pour substituer les matériaux naturels, engendrant ainsi une réduction des stocks croissants de déchets générés par l'industrie, les chantiers de réparation et de rénovation. Cette démarche a également conduit à la création de nouveaux matériaux potentiellement plus résistants et économiquement avantageux. La production de briques engendre souvent un surplus de briques de qualité inférieure (représentant entre 1 et 3% du total), qui sont habituellement éliminées. Parallèlement, la démolition de bâtiments anciens et les catastrophes naturelles, telles que les séismes, génèrent d'importantes quantités de déchets de briques inexploités. Ces déchets de briques peuvent être réutilisés de diverses manières, notamment en tant que granulats fins (sable) ou grossiers pour la fabrication du béton. Cette substitution non seulement améliore la résistance du béton, mais contribue également à la préservation de l'environnement tout en réduisant la demande en matériaux de construction [19].

II.2.1 Source de brique

Selon Harbi. R [20], les déchets de briques sont des produits dérivés de l'industrie des produits rouges. En raison du nombre élevé de briqueteries et des taux élevés de rejets (briques non conformes ou cassées) qu'elles produisent, ils sont présents en grande quantité à l'échelle nationale, représentant 10 à 15 % de leur production.

La brique est un matériau de construction qui est obtenu en mettant en forme une petite quantité d'argile à une température adéquate, connue sous le nom de température de frittage. Ensuite, les particules d'argile commencent à se dissoudre et à se regrouper pour créer une masse à texture pierreuse. Une fois cuite, la brique conserve une certaine porosité, ce qui lui confère des caractéristiques particulières et la distingue des autres matériaux de construction [20].

II.2.2 Recyclage des déchets de brique dans le monde

La brique est souvent considérée comme le deuxième matériau de construction le plus utilisé après le béton. Cependant, elle peut être classée comme un déchet de la construction et de la démolition (C&D) si elle est endommagée au cours des activités de fabrication, de construction et de démolition. En Chine, ces dernières années, de nombreux bâtiments anciens ont été démolis en raison d'activités de reconstruction, et ces opérations de démolition ont généré une quantité considérable de déchets de briques, atteignant environ 0,4 milliard de tonnes par an [21]. Pour une surface de plancher d'environ 50 000 m², 315 tonnes de déchets de briques et de blocs peuvent être générées [22] et cette quantité est similaire à la quantité de déchets de briques générés par les activités de construction et de démolition sur 16 sites de projet dans l'État de Penang en Malaisie [23]. L'Inde se classe comme le deuxième plus grand producteur de briques au monde, et les déchets de briques représentent 31% du total des déchets de construction et de démolition générés annuellement. Cette proportion est plus élevée que celle des déchets de béton [24], tandis qu'à Taïwan, 0,24 million de tonnes de déchets de briques étaient générées annuellement [25]. Les statistiques fournies par l'Agence américaine de protection de l'environnement (2016) ont montré qu'environ 44 millions de tonnes de déchets de briques provenaient des activités de construction et de démolition entre 2012 et 2014.

II.2.3 Propriétés des agrégats de briques recyclées

La brique recyclée à partir de déchets de construction et de démolition est couramment recherchée sans précédent comme substitut de granulats dans le béton. L'utilisation de granulats recyclés aide non seulement à réduire le problème des décharges, il est économiquement avantageux tout en étant plus écologique. Plusieurs recherches montrent que les granulats de briques recyclés pourraient être utilisés pour remplacer les agrégats naturels grossiers et fins dans le mortier et le béton (Figure II.1). Le tableau II.2 et II.3 résume les propriétés physiques et chimiques de l'agrégat de briques trouvées par plusieurs chercheurs.



Figure II.1: Brique recyclée sous forme de granulats fins et grossiers.

Tableau II.2 : Propriétés physiques des agrégats de briques recyclées.

Référence	Taille des particules (mm)	Module de finesse	Absorption de l'eau (%)	La masse volumique absolue (kg/m ³)	La masse volumique apparent (kg/m ³)	Abrasion (%)	Porosité (%)
Khatib [26]	Agrégat fin	/	14.8	2050	/	/	/
Debieb et Kenai [4]	Agrégat grossier	/	11.5	2200	1924	/	/
	Agrégat fin	3.91	14	2500	1010	/	/
Arulrajah et al [27]	Agrégat grossier	/	6.15	2619	/	36	/
	Agrégat fin	/	6.87	2580	/	/	/
Cavalline et Weggel [28]	Agrégat grossier	/	12.20	2.19	976	43.10	/
Arulrajah et al [29]	Agrégat grossier	/	6.2	2620	/	/	/
	Agrégat fin	/	6.9	2580	/	/	/
Mohammed et al [30]	Agrégat grossier	/	9.0-29.1	2000-2500	/	26.1-76.9	/
Aliabdo et al [31]	Agrégat grossier	/	15.5	2040	/	/	/
	Agrégat fin	3.07	2.08	/	/	/	/
Vieira et al [32]	Agrégat fin	/	12.63	1948	1032	/	/

Zhao et al [33]	Agrégat grossier	/	15.2	2030	910	/	48.4
	Agrégat fin	/	21.2	2180	1120	/	43.7
Li et al [34]	Agrégat grossier	/	15.31	1875	1078	/	/

Selon les exemples du Tableau II.2, il est observé que la masse volumique d'un granulat recyclé est habituellement inférieure à celle d'un granulat naturel (avec une réduction d'environ 6 à 18%), ce qui correspond aux valeurs habituellement observées pour les bétons. En revanche, la capacité des granulats recyclés à absorber de l'eau est nettement supérieure à celle des granulats naturels.

Tableau II.3 : composition chimique des agrégats de briques recyclées.

Réf- erence	Composition chimique (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
Adamson et al [35]	69.43	17.29	6.4	0.51	2.54	1.14	/	/	/	/	0.17
Zhao et al [33]	64.5	18.4	8	1.9	0.1	1.5	1	1.1	2.7	/	0.5
Dang et al [36]	66.26	16.42	6.18	5.97	1.36	/	0.93	/	2.63	/	/
Ge et al [37]	64.21	16.06	9.73	1.85	0.68	1.75	/	/	/	//	/

Comme le montre le tableau II.3, les principaux oxydes chimiques du RAB sont la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂ O₃) et la ferrite (Fe₂ O₃). Les autres principaux oxydes métalliques comprennent le soufre (SO₃) et le potassium (K₂ O). De petites quantités de calcium (CaO).

II.2.4 Influence du granulat de brique recyclé sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires

II.2.4.1 Proctor modifier

Pour connaître l'effet de RAB sur l'état frais du béton, des études antérieures ont montré l'effet de RAB en faisant substituer une partie du poids de granulat naturel avec un différent taux de substitution et le comparer au mélange de références.

Sharma et al. [38] ont étudié l'influence des RAB dans les applications géotechniques, en se concentrant sur les propriétés de compactage selon le Proctor modifié ainsi que sur la densité relative. Les déchets sont des différentes gammes de tailles de particules, allant de 0 à 5mm, de 5 à 10mm, de 10 à 30mm et de 30 à 50mm. Les résultats de la courbe de compactage Proctor modifiée Comme illustré dans la figure II.2. Les valeurs de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale sont obtenues à 11.60 % et 2.03 g/cm³ respectivement.

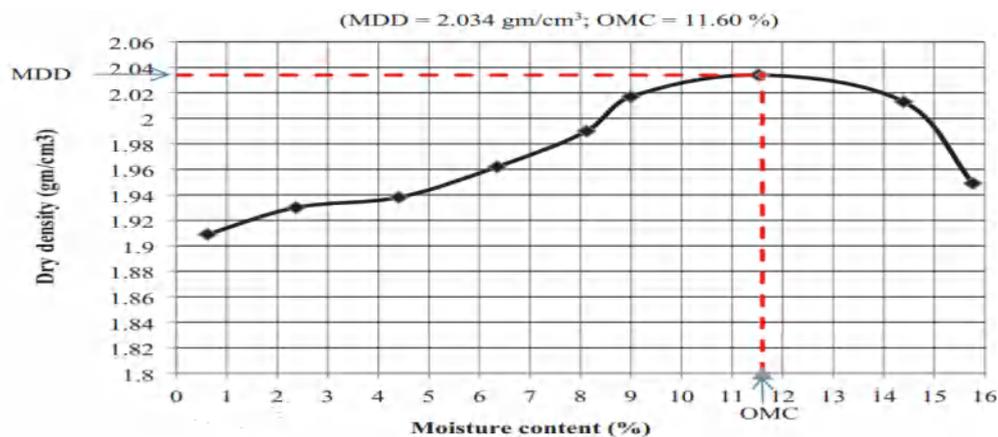


Figure II.2: Résultat de l'essai Proctor modifié [38].

Sharma et al.[39] ont réalisé une étude sur la caractérisation géotechnique et géo-environnementale des granulats de béton recyclé (RCA), granulats de briques recyclées (RBA). Ils ont examiné leurs mélanges, comprenant différentes proportions : (100 % RCA, 75 % RCA-25 % RBA, 50 % RCA-50 % RBA, 25 % RCA-75 % RBA, 100 % RBA). Les résultats des tests de Proctor modifiés ont indiqué que la densité sèche maximale (MDD) et la teneur en humidité optimale (OMC) augmentent avec l'augmentation de la teneur en RBA dans les combinaisons à l'étude. La MDD des combinaisons étudiées sont comprises entre 1,93 et 2,03 g/cm³ et les valeurs d'OMC se situent entre 11.21 et 12.20 % (Figure II.3).

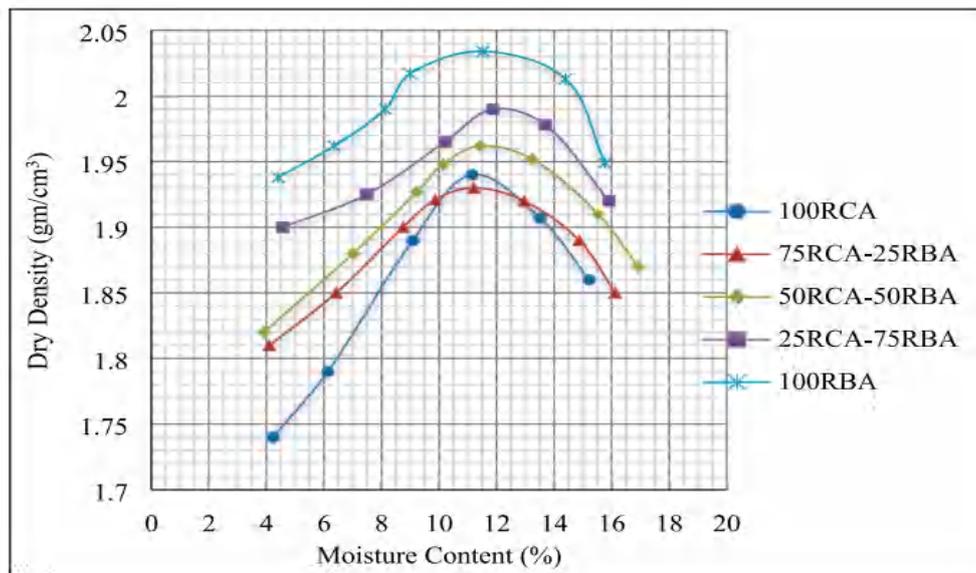


Figure II.3 : Résultat de l'essai Proctor modifié [39].

Kong et al.[40] ont mené une étude sur l'influence de différentes tailles d'agrégats de brique-béton recyclé (RBCA) avec différentes teneurs en ciment (3 %, 4 %, 5 % et 6 %) sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux stabilisés au ciment (CSM) préparés à partir RBCA avec différentes proportions de briques (15 %, 30 % et 45 %). Les résultats des essais ont montré qu'avec l'augmentation de la proportion de briques dans le RBCA, la densité sèche maximale (MDD) a été considérablement réduite, tandis que la teneur en eau optimale (OMC) a augmenté.

Disfani et al. [41] ont effectué une étude visant à évaluer les performances de la brique concassée (CB) utilisée comme matériau supplémentaire dans les RCA stabilisé au ciment (3 %). Ils ont analysé différents mélanges comprenant les proportions suivantes : (100 % RCA, 85 % RCA-15 % CB, 70 % RCA-30 % CB, 50 % RCA-50 % CB). Les résultats indiquent que les valeurs de la OMC et de la MDD se sont avérées cohérentes pour tous les mélanges, avec seulement de légères variations.

Poon et al. [42] ont étudié la possibilité d'utiliser du RCM en combinaison avec du RCA comme granulats dans les matériaux de sous-base routière non liés. Deux mélanges, l'un contenant 75 % de RCA et 25 % de RCM et l'autre contenant 50 % de RCA et 50 % de RCM. À une teneur plus élevée en RCM, la densité maximale sèche (MDD) était réduite et la teneur en eau optimale (OMC) augmentait, tandis que les valeurs de CBR étaient plus faibles.

Hu et al. [43] ont rapporté le remplacement partiel du granulat grossier naturel dans des mélanges pour la sous-base de la chaussée avec des RAB à des niveaux de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Ces mélanges ont été combinés avec du sable et traités par 5 % de ciment. Les résultats présentés dans le tableau II.4 indiquent une diminution de la MDD avec l'augmentation de la teneur en RAB. En effet, la MDD atteint jusqu'à $2,37 \text{ g/cm}^3$ dans le mélange utilisant 100 % d'agrégats naturels comme agrégats grossiers, tandis que la valeur la plus basse, soit seulement $1,84 \text{ g/cm}^3$, est obtenue dans le mélange utilisant 100 % d'RAB concassée comme agrégats grossiers.

Tableau II.4 : Résultats de Proctor modifier [43].

Mélange	MDD(g/cm^3)	OMC (%)
C 0%	2.376	5.72
C 25%	2.311	8.33
C 50%	2.132	9.54
C 75%	2.035	12.27
C 100%	1.849	14.05

Li et al.[34] ont remplacé le gravier naturel avec le déchet de briques à des niveaux de 0% ; 30% ; 60% et 100% avec différentes teneurs en ciment (3% ; 4% ; 5% ; 6% et 7%) dans le matériau de base des autoroutes. Les résultats indiquent qu'avec une augmentation de la teneur en ciment, la teneur en eau optimale du mélange augmente, ce qui entraîne une augmentation de la MDD. Concernant le mélange de briques recyclées stabilisées au ciment avec des taux de substitution de 30 % ; 60 % et 100 %, les MDD ont été de $2,06 \text{ kg/cm}^3$; $1,87 \text{ kg/cm}^3$ et $1,66 \text{ kg/cm}^3$ respectivement. Les teneurs en eau correspondantes étaient de 9,4 % ; 12,6 % et 16,2 % (tableau II.5).

Tableau II.5 : Résultats de la teneur en eau et la densité séchée maximale [34].

Dosage de ciment (%)		3	4	5	6	7	
Pourcentage de déchets de briques	0%	OMC (%)	4.3	4.8	5.6	5.9	6.3
		MDD (Kg/cm^3)	2.23	2.26	2.28	2.29	2.31
	30%	OMC (%)	8.8	9.0	9.4	9.7	9.9
		MDD (Kg/cm^3)	2.03	2.04	2.06	2.07	2.09
		OMC (%)	11.9	12.2	12.6	12.9	13.3

remplaçant le gravier naturel	60%	MDD (Kg/cm ³)	1.84	1.85	1.87	1.88	1.90
		OMC (%)	15.7	15.9	16.2	16.6	16.9
	100%	MDD (Kg/cm ³)	1.63	1.64	1.66	1.67	1.68

II.2.4.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus importante du béton durci, exerçant une influence majeure sur sa durabilité et ses performances globales.

Adamson et al. [35] ont remplacé le gravier naturel avec les déchets de briques à des niveaux de 25 % et 50 % dans le béton. La résistance à la compression à l'âge de 28 jours augmente avec l'augmentation de la teneur des déchets de briques comme le montre la figure II.4.

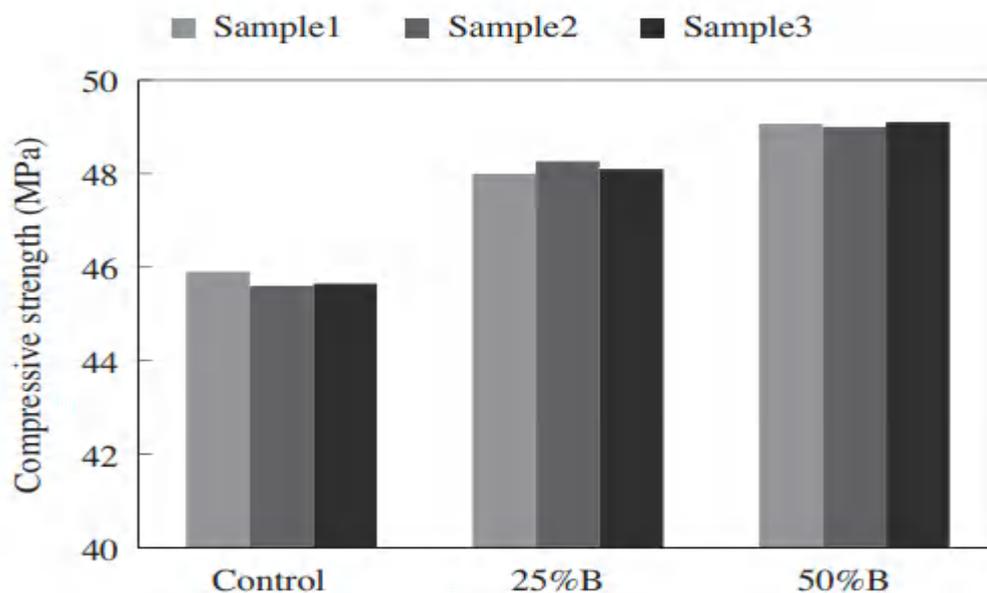


Figure II.4 : Résistance à la compression à 28 jours des échantillons [35].

Khatib [26] a étudié les propriétés du béton contenant des granulats fins recyclés, Les granulats recyclés étaient constitués de brique concassée (BC) avec des particules de moins de 5 mm de diamètre. Le granulat fin dans le béton a été remplacé par 0 % ; 25 % ; 50% et 100 % de BC.

Les résultats montrent que le béton incorporant jusqu'à 50 % de BC présente une résistance à long terme similaire à celle du témoin. Même à 100 % de remplacement des granulats fins par du BC, la réduction de résistance n'est que de 10 %. Au-delà de 28 jours

de durcissement, le taux de développement de la résistance dans le béton contenant du BC est supérieur à celui du témoin indiquant une action de cimentation supplémentaire en présence d'agrégats fins recyclés (figure II.5).

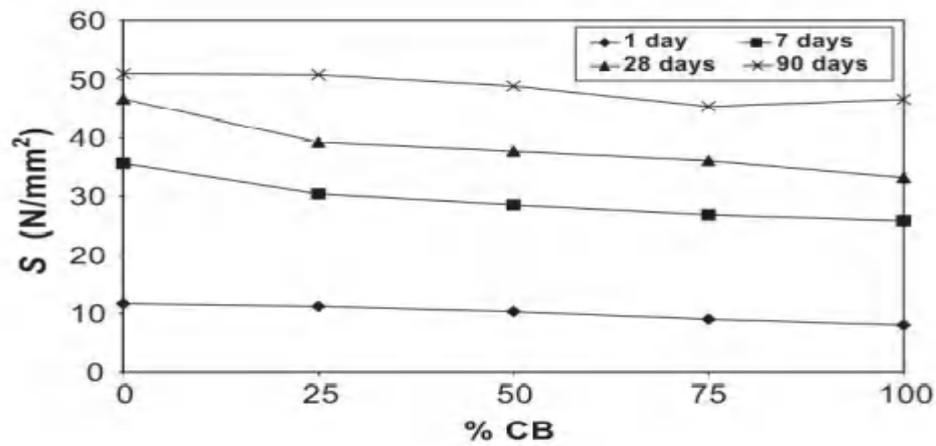


Figure II.5 : Effet de la teneur en BC sur la résistance à la compression [26].

Debieb et al. [4] ont étudié la possibilité d'utiliser la BC comme agrégat grossier et fin pour un nouveau béton. Le sable naturel, les granulats grossiers ou les deux ont été partiellement remplacés (25, 50, 75 et 100 %) par des granulats de BC. La résistance à la compression jusqu'à 90 jours d'âge ont été comparées à celles du béton fabriqué avec des granulats naturels.

Les résultats montrent que la résistance à la compression est plus faible pour le béton de BC : plus le taux de substitution est élevé, plus la résistance à la compression est faible (figure II.6).

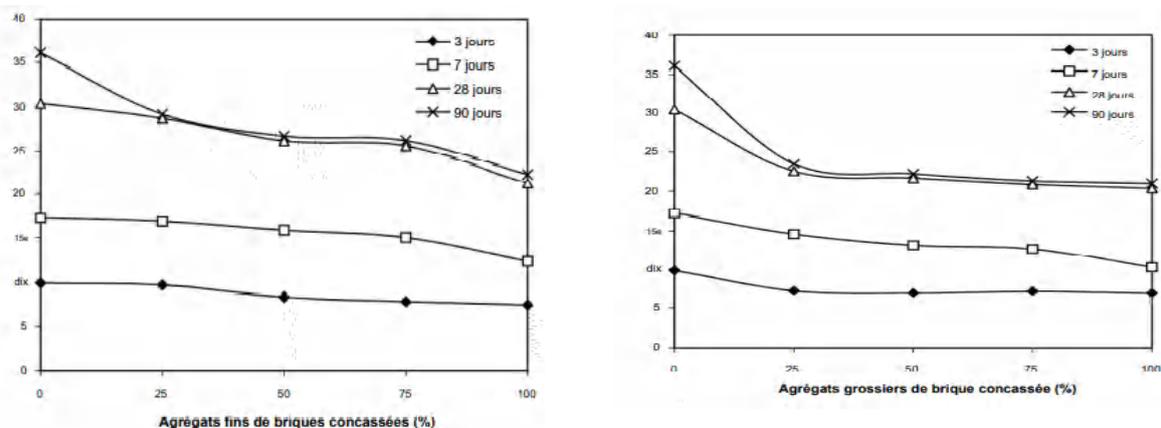


Figure II.6 : Évolution de la résistance à la compression du béton avec de la brique concassée fine et grossière taux de substitution des agrégats [4].

Atyia et al. [44] ont étudié l'influence du déchet de briques d'argile concassée (CCB) en tant que des agrégats fins et grossiers sur les propriétés physiques, mécaniques et microstructurales du béton.

Dans la figure II.7, les résultats des tests de résistance à la compression sur des échantillons de béton à 7,28 et 91 jours sont tracés. La figure montre que l'utilisation de FCBA comme granulat fin produit un béton (RFAC) avec une résistance à la compression d'environ 85 % NC. La résistance à la compression a diminué à environ 75 % de NC lors de l'utilisation de CCBA comme granulat grossier dans la production de béton (RCAC). Il a également été réduit à environ 70 % de la NC lorsque le FCBA et le CCBA ont été employés respectivement comme granulats fins et grossiers dans la production de béton (RCAC).

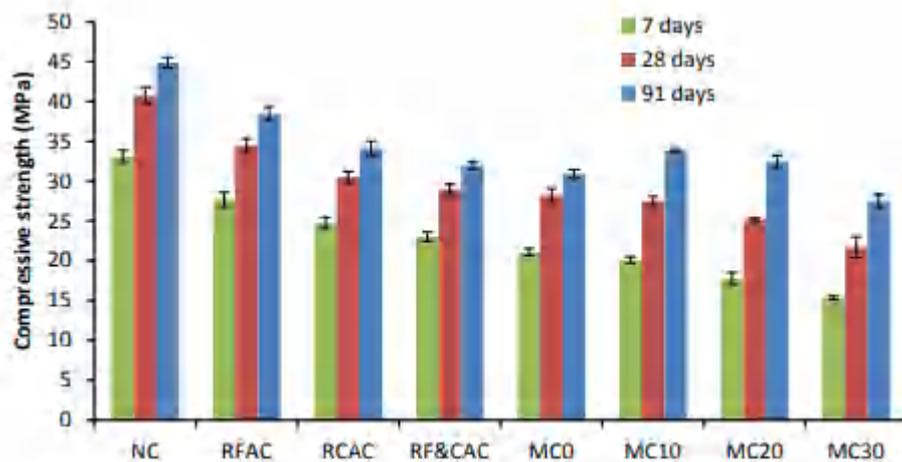


Figure II.7 : Résistance à la compression du béton étudié à 7,28 et 91 jours [44].

Tavakoli et al. [45] ont remplacé le sable naturel avec les déchets de briques à des niveaux de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % dans les chaussées en béton compacté au rouleau (RCCP). La résistance à la compression à l'âge de 28 jours diminue avec l'augmentation de la teneur des déchets de briques. Le mélange contenant 25 % de déchet de briques présentait une augmentation négligeable de 2 % de la résistance par rapport au mélange témoin.

Kong et al.[40] ont mené une étude sur l'influence de différentes tailles d'agrégats de RBCA avec différentes teneurs en ciment (3 %, 4 %, 5 % et 6 %) sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux stabilisés au ciment (CSM) préparés à partir d'agrégats de brique-béton recyclé (RBCA) avec différentes proportions de briques (15 %, 30 % et 45 %). Les résultats des essais ont montré que les résistances à la compression non confinées pour le CSM avec

différentes graduations d'agrégats à l'âge de durcissement de 7, 28 et 90 jours ont toutes augmenté avec l'augmentation de la teneur en ciment et diminué avec l'augmentation de la teneur en RBCA.

Disfani et al.[41] ont montré dans leur étude que les valeurs moyennes de résistance à la compression non confinée (UCS) répondaient à l'exigence minimale de 4 MPa après au moins 7 jours de durcissement pour tous les mélanges. En particulier, le mélange composé de 85 % de RCA et 15 % de CB a présenté une résistance supérieure à 28 jours par rapport aux autres formulations.

Hu et al.[43] ont rapporté le remplacement partiel du granulat grossier naturel dans des mélanges pour le sous-base de la chaussée avec des granulats de BC à des niveaux de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Ces mélanges ont été combinés avec du sable et traités par 5 % de ciment. Les résultats présentés dans la figure II.8 indiquent que la résistance à la compression des mélanges augmente avec la durée de durcissement. Cependant, en augmentant le taux de remplacement des granulats grossiers de 0 à 100 % par des granulats de BC, les valeurs de la résistance à la compression à 7 jours, 28 jours et 90 jours des mélanges ont varié respectivement de 3,34 MPa à 1,14 MPa ; de 5,20 MPa à 1,88 MPa ; et de 6,87 MPa à 2,93 MPa. Ces résultats montrent clairement que l'UCS des mélanges diminue considérablement avec l'augmentation de la proportion de BC.

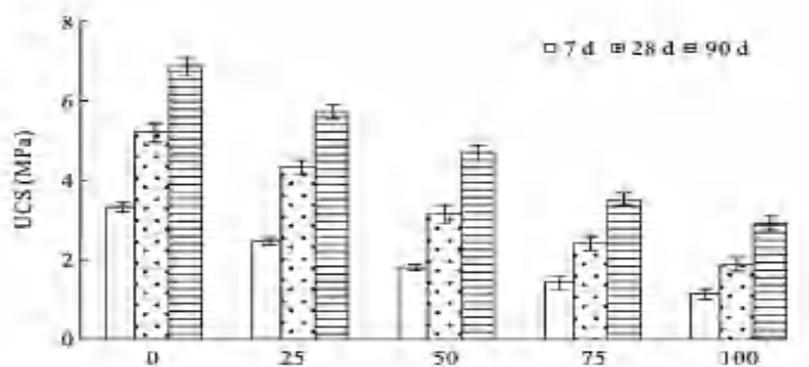


Figure II.8 : Résistance à la compression du béton étudié à 7,28 et 91 jours [43].

Le tableau II.6 présente les résultats de résistance à la compression à partir de nombreuses études.

Tableau II.6 : Résistance à la compression à partir de nombreuses études.

Granulat grossier	E/C	Pourcentage de Remplacement (%)	Résistance à la compression	Auteur
Granulats de déchets de briques (RAB)	0.61	0	30	Debieb et Kenai [4]
	0.60	25	23.25	
	0.59	50	22.42	
	0.58	75	21.33	
	0.57	100	20.84	
	0.30	0	45.68	Zhang et al [46]
		30	45.28	
		40	40.05	
	0.5	50	34.09	Lonth et al [47]
		0	26.3	
		25	25.3	
		50	22.3	
		75	17.1	
	0.45	100	14.9	Sharma et al [48]
		0	22.5	
		100	20	

La figure II.9 représente les résultats d'effet du niveau de remplacement des granulats RAB sur la résistance à la compression à partir de nombreuses études.

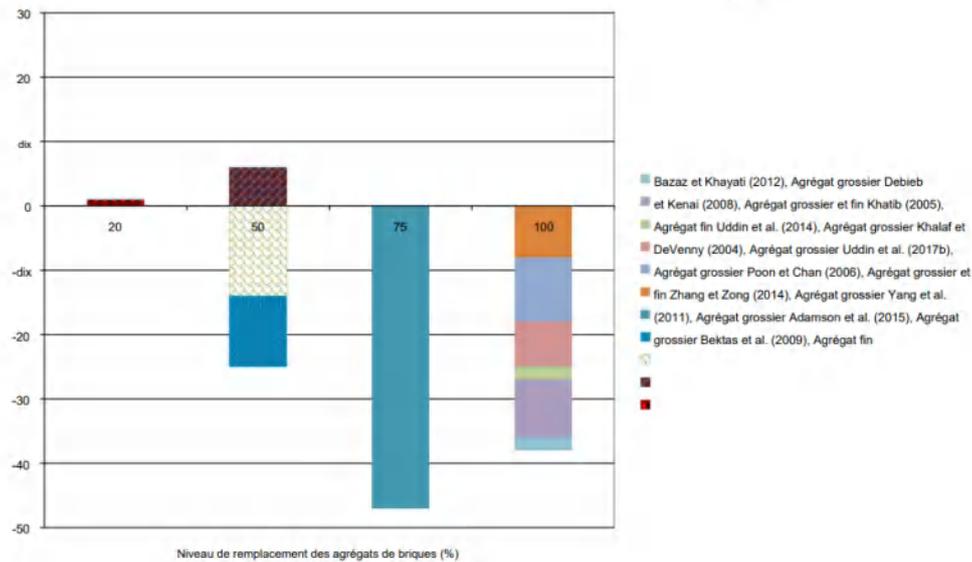


Figure II.9 : Effet du niveau de remplacement des granulats de RAB sur la résistance à la compression du béton [49].

II.2.4.3 Résistance à la traction

Tavakoli et al. [45] ont remplacé le sable naturel avec des déchets de briques à des niveaux de 0 % ; 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 % dans les chaussées en RCCP. La résistance à la traction à l'âge de 28 jours diminue avec l'augmentation de la teneur des déchets de briques. Pour l'inclusion de 50 % ; 75 % et 100 % de déchet de briques, ils ont signalé une réduction de la résistance à la traction à 28 jours avec 10,5 % ; 17,2 % et 27,7 % respectivement. Le mélange contenant 25 % de déchet de briques présentait une augmentation négligeable de 2 % de la résistance par rapport au mélange témoin.

Kong et al. [40] ont mené une étude sur l'influence de différentes tailles d'agrégats de RBCA avec différentes teneurs en ciment (3 %, 4 %, 5 % et 6 %) sur les propriétés physiques et mécaniques des CSM préparés à partir d'agrégats RBCA avec différentes proportions (15 % ; 30 % et 45 %). Les résultats des essais ont montré que la résistance à la traction par fendage de tous les CSM à trois âges (7 j, 28 j et 90 j) de durcissement a augmenté avec l'augmentation de la teneur en ciment, tandis qu'elle a diminué avec l'augmentation de la RBCA.

Disfani et al. [41] ont effectué une étude visant à évaluer les performances de la BC utilisée comme matériau supplémentaire dans les agrégats de béton recyclé (RCA) stabilisés au ciment à hauteur de 3 %. Ils ont analysé différents mélanges comprenant les proportions suivantes : (100 % RCA, 85 % RCA-15 % BC, 70 % RCA-30 % BC, 50 % RCA-50 % BC). Les résultats

mettent en évidence que l'augmentation de la quantité de BC dans les mélanges de RCA stabilisés au ciment entraîne une diminution correspondante de la charge maximale et du module de rupture (traction par flexion).

Hu et al. [43] ont rapporté le remplacement partiel du granulat grossier naturel dans des mélanges pour la sous-base de la chaussée avec des granulats de BC à des niveaux de 0 % ; 25 % ; 50 %, 75 % et 100 %. Ces mélanges ont été combinés avec du sable et traités par 5 % de ciment. Les résultats présentés dans la figure II.17 indiquent que la résistance au fendage a 28 jours de différents mélanges variait de 0,31 MPa à 0,17 MPa. On peut également voir que la résistance au fendage a diminué avec l'augmentation de la teneur en BC dans le mélange. De plus, les résultats des tests montrent que la diminution de la résistance au fendage à 90 jours dans le niveau de remplacement des granulats grossiers de 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 % était de 11.3 %, 19.4 % ; 29.0 %, et 35.5 % par rapport aux spécimens utilisant des granulats 100 % naturels comme agrégat grossier, respectivement.

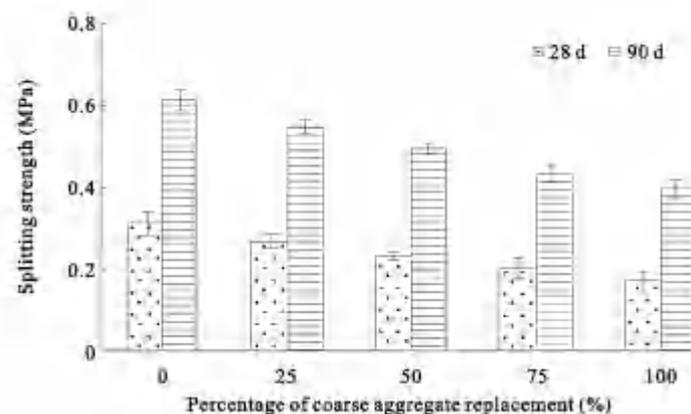


Figure II.10 : Résistance à la traction du béton étudié à 7, 28 et 91 jours [43].

Le tableau II.7 représente les résultats de résistance à la traction à partir de nombreuses études.

Tableau II.7 : Résistance à la traction à partir de nombreuses études.

Granulat grossier	E/C	Pourcentage de Remplacement (%)	Résistance à la traction par fendage	Résistance à la traction par flexion	Auteur

Granulats de déchets de briques RAB)	0.61	0	/	2.99	Debieb et Kenai [4]
	0.60	25	/	2.40	
	0.59	50	/	2.03	
	0.58	75	/	2.18	
	0.57	100	/	2.00	
	0.30	0	/	4.64	Zhang et al [46]
		30	/	4.78	
		40	/	4.33	
		50	/	4.17	
	0	0	4.19	4.10	
		20	2.90	4.12	
		50	2.77	3.86	
	0.5	0	3.69	4.60	Lonth et al [47]
		25	3.33	4.30	
		50	2.62	3.73	
		75	2.19	3.20	
		100	1.88	2.57	
	0.45	0	3.85	/	Sharma et al [48]
		100	2.4	/	

II.2.4.4 Module d'élasticité

Kong et al. [40] ont mené une étude sur l'influence de différentes avec différentes tailles de particules et teneurs en ciment (3 % ; 4 % ; 5 % et 6 %) sur les propriétés physiques et mécaniques des CSM préparés à partir de RBCA avec différentes proportions de briques (15 % ; 30 % et 45 %). Les résultats des essais ont montré que le module de résilience à la compression du CSM préparé en utilisant RBCA a augmenté avec l'augmentation de la teneur en ciment, tandis qu'elle a diminué avec l'augmentation de la teneur en briques.

Hu et al. [43] ont rapporté le remplacement partiel du granulat grossier naturel dans des mélanges pour la sous-base de la chaussée avec des granulats de BC à des niveaux de 0 % ; 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 %. Ces mélanges ont été combinés avec du sable et traités par 5 % de ciment. Comme le montre la figure II.11, la tendance générale observée n'est qu'une diminution du module de résilience des mélanges avec l'augmentation de la teneur en granulats de BC grossière. De plus, par rapport au mélange utilisant des agrégats 100 % naturels, la diminution

du module de résilience à 90 jours dans les niveaux de remplacement des agrégats grossiers de 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 % était de 19.5 % ; 33.5 % ; 50.2 % et 56.7 %, respectivement.

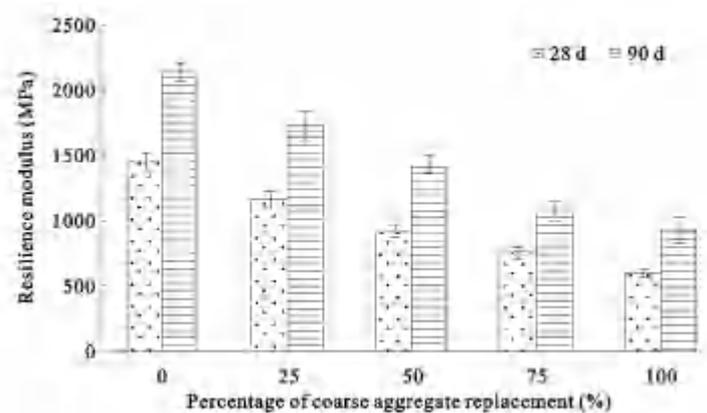


Figure II.11 : Module d'élasticité du béton étudié à 7, 28 et 91 jours [43].

Padmini et al. [50] ont rapporté que le module d'élasticité du béton avec des granulats de BC était d'environ 30 % à 50 % inférieur à celui du béton avec des granulats naturels.

De même, Debieb et al [4], Akhtaruzzaman et al [51] et Alves et al [52] ont démontré une diminution pouvant atteindre 30% du module d'élasticité pour le béton fabriqué à partir de BC par rapport au béton fabriqué à partir de granulats naturels.

Chen et al.[53] ont employé le RAB et la tuile en tant que matériaux recyclés. Selon la figure II.12, ils ont constaté que le module d'élasticité du BGR était d'environ 20 à 30% inférieur à celui du béton classique. Cela implique que les valeurs du module d'élasticité du béton recyclé ne sont pas significativement affectées par la présence de RAB et de tuile dans les granulats recyclés. De plus, le module d'élasticité n'est pas impacté par la variation du rapport eau/ciment ou la quantité de RAB et de tuile dans le granulats recyclés.

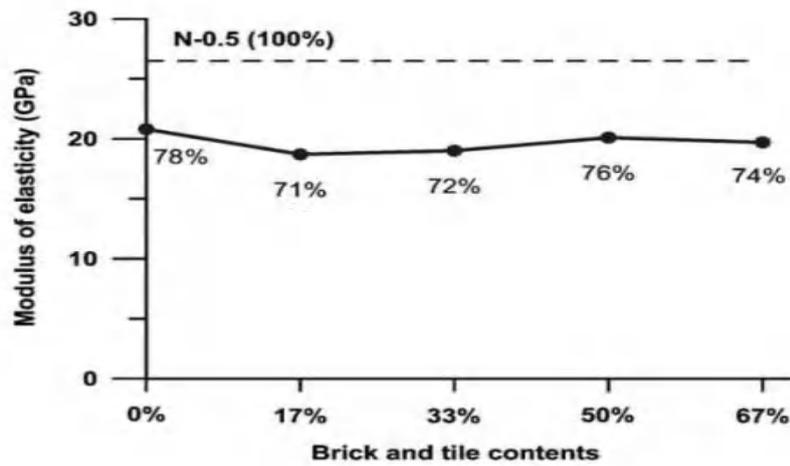


Figure II.12 : Module d'élasticité du béton en fonction du taux de GR de brique et tuile [53].

II.2.4.5 Indice de CBR

Disfani et al. [41] ont montré que le mélange contenant 100 % RCA a démontré une valeur de CBR supérieure par rapport aux autres mélanges. En revanche, le mélange contenant 50 % RCA-50 % CB a montré une valeur plus faible en comparaison avec les autres mélanges (figure II.13).

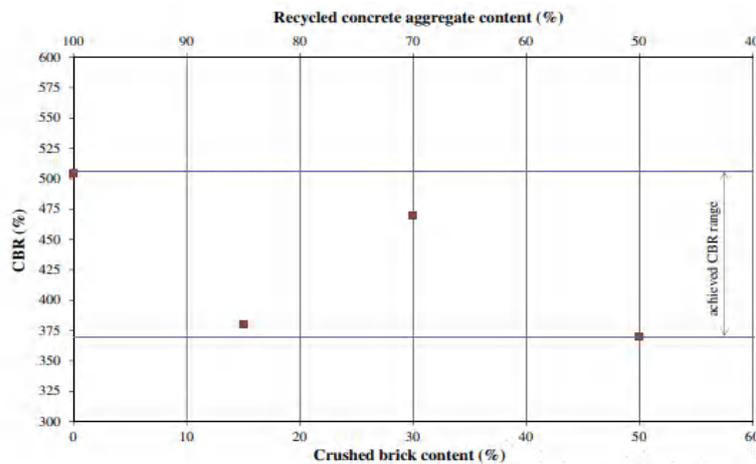


Figure II.13 : Indice de CBR des mélanges étudiés [41].

Dans leur étude, Aatheesan et al. [54] ont étudié les mélanges de maçonnerie d'argile concassée recyclée (RCM) avec du béton concassé (RCA) ou du roche concassé pour la sous-base de chaussée. Les mélanges RCA-RCM étaient composés de béton concassé contenant de 10 % à 30 % d'argile maçonnée concassée. Les valeurs de CBR obtenues après immersion étaient d'au moins 80 %, satisfaisant ainsi les spécifications de VicRoad de l'État de Victoria (2009) pour une utilisation en tant que classe 3 de sous-couche supérieure.

Poon et al.[42] ont étudié la possibilité d'utiliser du RCM en combinaison avec du RCA comme granulats dans les matériaux de sous-base routière non liés. Deux mélanges, l'un contenant 75 % de RCA et 25 % de RCM et l'autre contenant 50 % de RCA et 50 % de RCM. Les résultats montrent que les valeurs CBR ont encore diminué à mesure que le niveau de remplacement des granulats de RCA par le RCM augmentait. Le CBR des deux mélanges s'est avéré être dans des limites acceptables.

II.2.5 Effet du granulat de brique recyclé sur la durabilité des matériaux cimentaires

II.2.5.1 Microstructure

L'examen au microscope électronique à balayage (MEB) réalisé par Hou et al. [55] sur des bases et des sous-couches contenant des granulats de briques concassées (CBA) révèle une réaction pouzzolanique entre le SiO_2 et l' Al_2O_3 dans le CBA, ainsi qu'avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ résultant de l'hydratation du ciment. La figure II.14 présente les images MEB du Granulats de briques concassées stabilisés au ciment (CSCBA). On observe la présence de gels Aft en forme d'aiguilles et de gels fibreux C-S-H issus du ciment, ainsi que des hydratations secondaires entre $\text{Ca}(\text{OH})_2$, SiO_2 et Al_2O_3 dans le CBA. Ces observations dévoilent la formation d'une structure de réseau tridimensionnelle qui emprisonne les CBA et les agrégats.

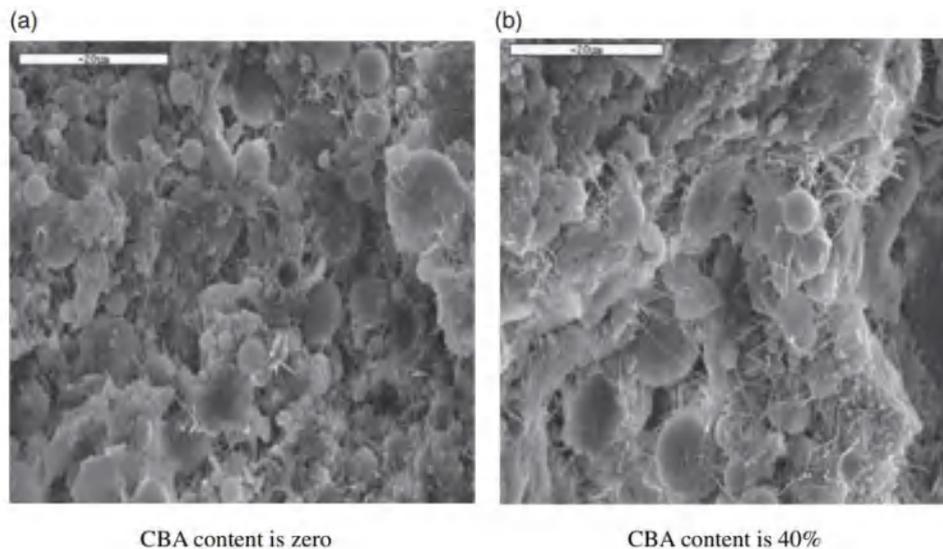


Figure II.14 : Image MEB de (CSCBA) [55].

II.2.5.2 Résistance au gel/dégel

Hu et al. [43] ont rapporté le remplacement partiel du granulat grossier naturel dans des mélanges pour la sous-base de la chaussée avec des granulats de BC à des niveaux de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Ces mélanges ont été combinés avec du sable et traités par 5 % de ciment. Les résultats montrent que l'indice de résistance au gel a diminué avec l'augmentation de la teneur en BC dans le mélange. La figure II.15 montre une réduction de l'indice de résistance au gel avec l'augmentation du contenu de brique d'argile concassée.

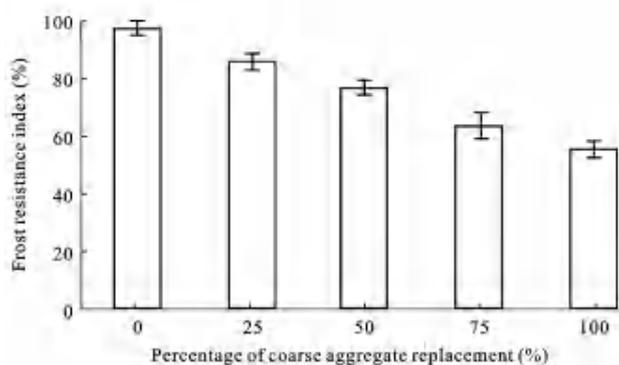


Figure II.15 : Résistance gel/dégel des mélanges étudiés [43].

Dans leur enquête, Miao et al. [3] ont étudié l'influence des particules de briques d'argile sur les performances des granulats recyclés stabilisés au ciment utilisé comme base de chaussée. Les granulats recyclés ont été classés en deux catégories : le granulat de béton recyclé (RCA) et le granulat de béton recyclé et de briques d'argile (RCBA). Le RCBA a été subdivisé en deux types : les granulats grossiers de RCBA (CRCBA) et les granulats fins de RCBA (FRCBA). Au cours de leur étude, les chercheurs ont examiné différents mélanges comprenant des proportions variées, comme indiqué dans le tableau II.8 :

Tableau II.8 : composition des mélanges étudiés [3].

ID	Proportion/%					
	CRCBA	FRCBA	RCA 10-25	RCA 5-10	RCA 0-3	Mineral Powder
B-0	0	0	43	26	26	5
B-2	20	0	32	18	26	4
B-4	40	0	28	2	27	3
B-4-1	40	10	28	1	20	1
B-6	60	0	20	0	16	4
B-M	50	30	20	0	0	0

Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue à mesure que la teneur en CRCBA augmente, tant avant qu'après les cycles de gel-dégel. En ce qui concerne le

BDR (taux de déformation de rupture), Il augmente d'abord avec l'augmentation de la teneur en CRCBA, puis diminue par la suite. Le BDR le plus bas a été observé pour le mélange B-0, avec un taux de 81,6 % (figure II.16).

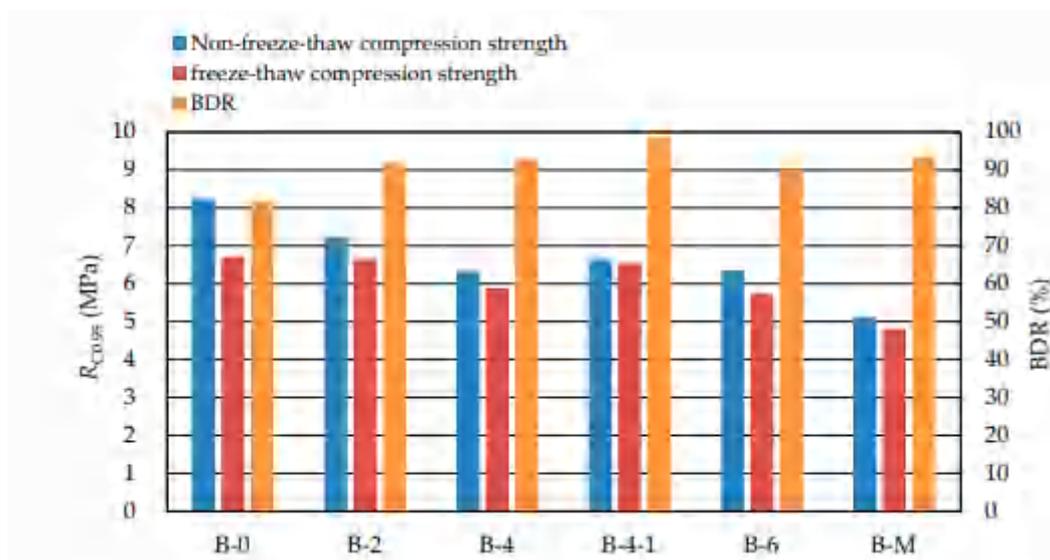


Figure II.16 : Résistance gel/dégel des mélanges étudiés [3].

II.2.5.3 Absorption

Viera et al. [32] ont constaté que l'utilisation des granulats de briques d'argile en tant que granulats fins (les remplacements effectués étaient de 20 %, 50 % et 100 % en volume.) dans le béton entraînant une augmentation de l'absorption par immersion. Cette augmentation était observée à mesure que la proportion des granulats de briques augmentait, comme le montre la figure II.17.

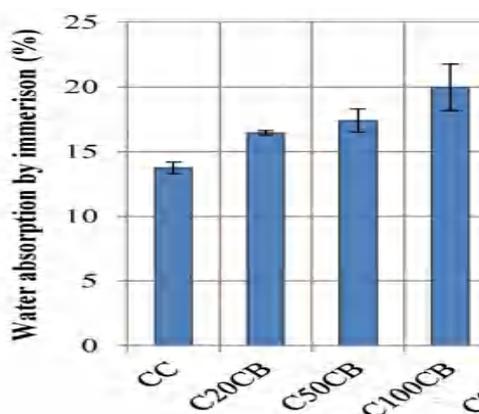


Figure II.17 : L'absorption par immersion des mélanges étudiés [32].

Aliabdo et al. [31] ont confirmé que l'utilisation des granulats fins et grossiers de brique entraîne une augmentation de l'absorption comme le montre la figure II.18.

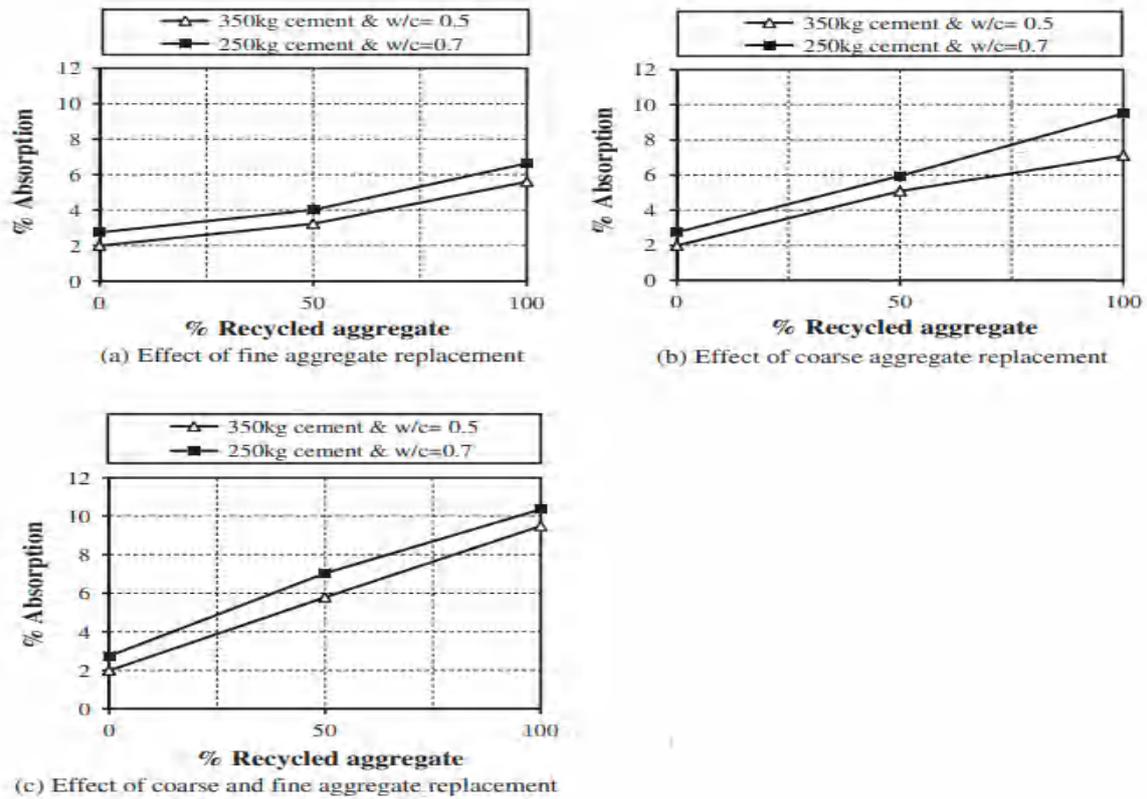


Figure II.18 : Effet de la teneur en granulats recyclés grossiers et fins sur l'absorption d'eau [31].

II.2.5.4 Porosité

Atya et al. [44] ont constaté que la porosité a augmenté de 30 % lorsque la brique était utilisée comme granulat fin (RFAC). Sa valeur a doublé lorsque la brique était utilisée comme granulat grossier (RCAC). Lorsque les granulats naturels sont complètement remplacés par des granulats de brique, la porosité du RF&CAC atteint environ 3 fois celle du NC tout en utilisant la même matrice cimentaire (figure II.19).

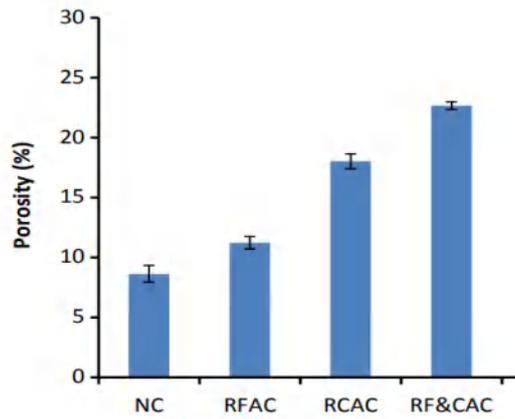


Figure II.19 : Porosité des mélanges étudiés [44].

Aliabdo et al. [31] ont montré l'effet de la teneur en granulats recyclés sur la porosité du béton. La figure II.20 démontre clairement que l'augmentation de la teneur en granulats de briques d'argile concassées augmente la porosité du béton. Le remplacement des granulats fins et grossiers par des granulats recyclés augmente la porosité du béton jusqu'à 63 %.

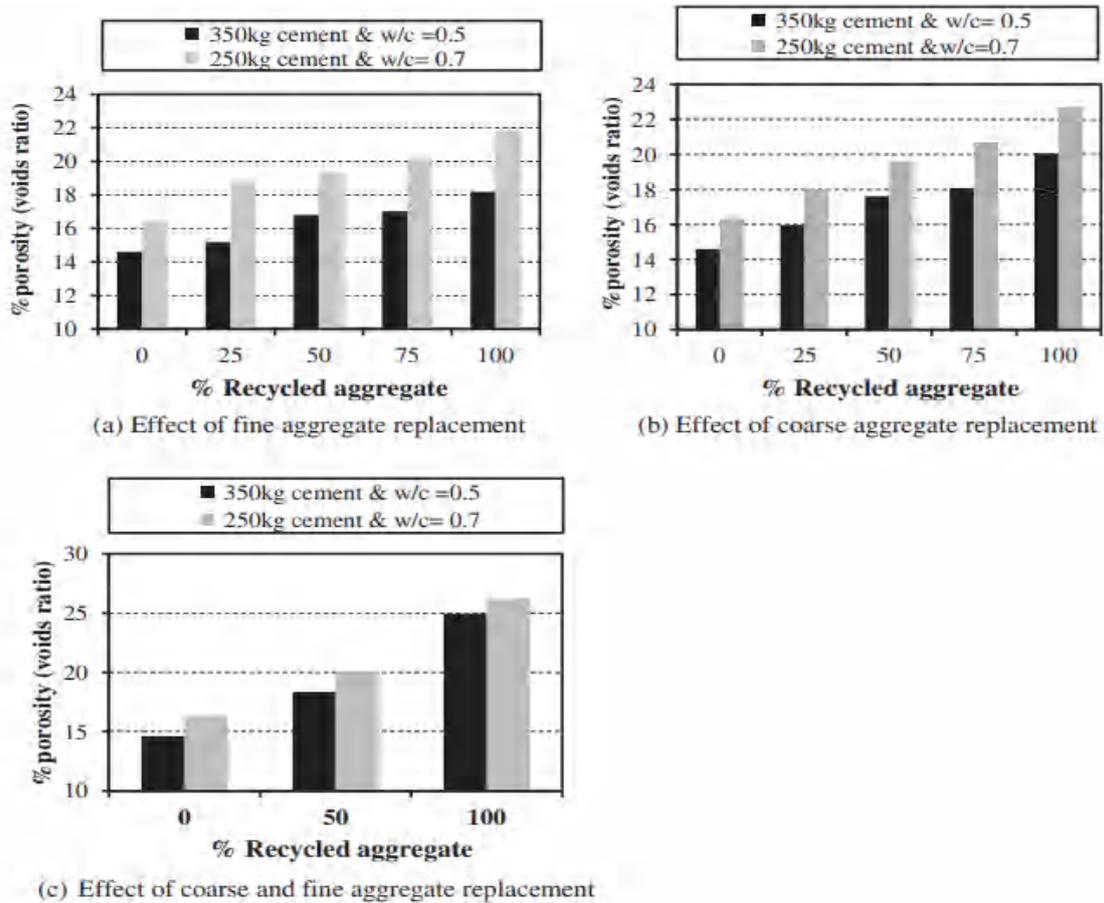


Figure II.20 : Effet de la teneur en granulats recyclés grossiers et fins sur la porosité du béton [31].

II.2.5.5 Vitesse d'auscultation sonore (VAS)

Atya et al. [44] ont montré que l'utilisation de RAB sous forme sable réduit la valeur VAS d'environ 11 %. De même, l'utilisation de RAB sous forme de gravier entraîne une diminution plus importante de la valeur VAS, car elle a diminué d'environ 24,2 %. Il a diminué d'environ 30,5 % lors de l'utilisation du RAB comme granulats grossiers et fins dans le mélange de béton.

Aliabdo et al. [31] ont confirmé que l'utilisation des granulats fins et grossiers de brique entraîne une diminution des valeurs VAS jusqu'à 67 % comme le montre la figure II.21.

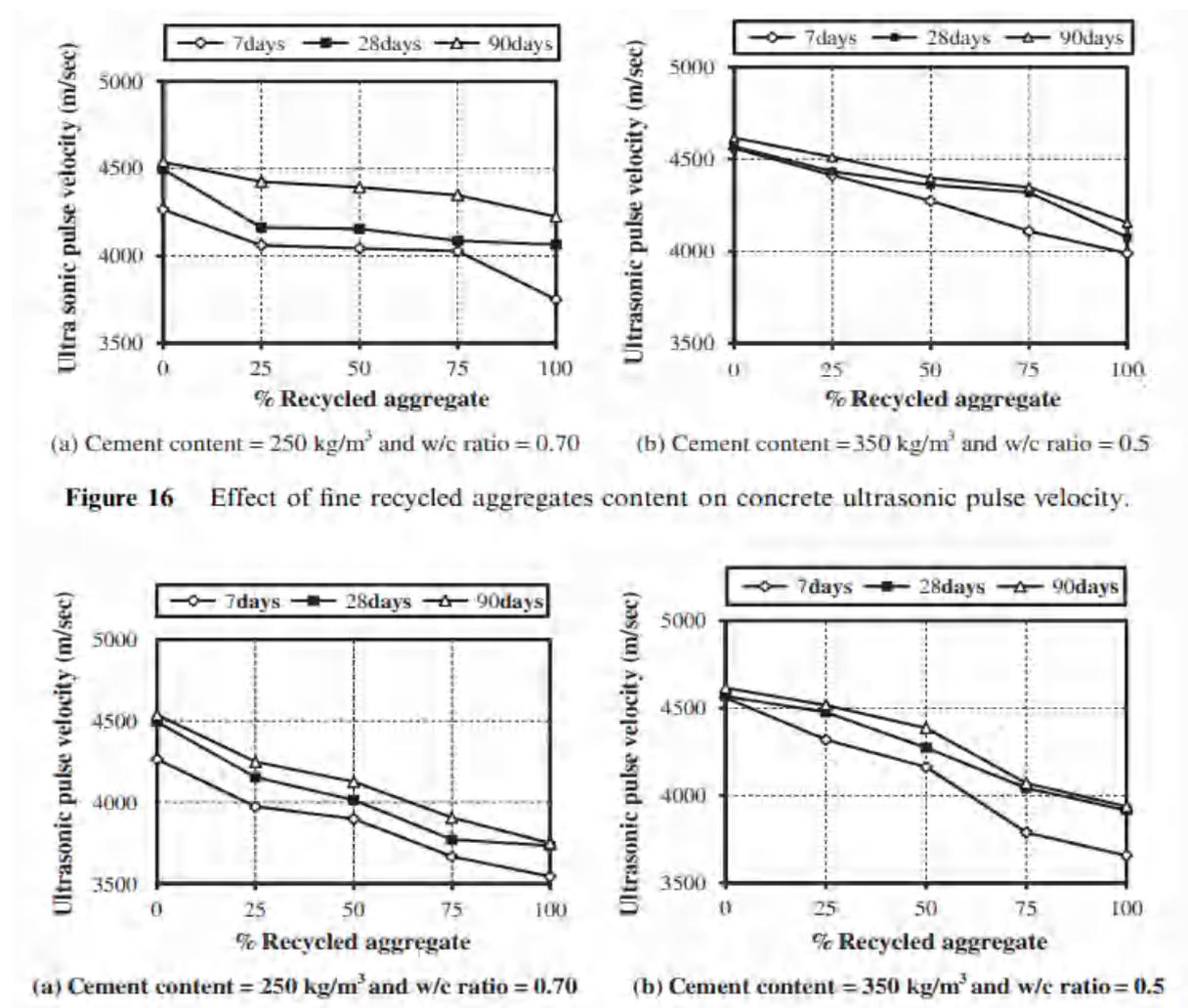


Figure II.21 : Effet de la teneur en granulats recyclés grossiers et fins sur la VAS du béton [31].

II.2.6 Récapitulatif sur l'emploi des briques recyclées

Il apparaît évident que l'utilisation de granulats de RAB dans la fabrication des matériaux cimentaires présente des avantages potentiels en termes de durabilité environnementale, mais elle nécessite une évaluation minutieuse des propriétés mécaniques du béton. Les études examinées ont révélé des résultats diversifiés. Les granulats de RAB est comparativement plus faible et plus poreux que l'agrégat normal, indiquant que la substitution des granulats traditionnels par des granulats de RAB peut influencer la résistance à la compression, la porosité, la résistance à la traction, la résistance au gel-dégel et d'autres caractéristiques.

II.3 GRANULATS DE BETON RECYCLE

Au cours des deux dernières décennies, le nombre de publications sur les RAC a connu une croissance exponentielle, comme illustré dans la figure II.22.

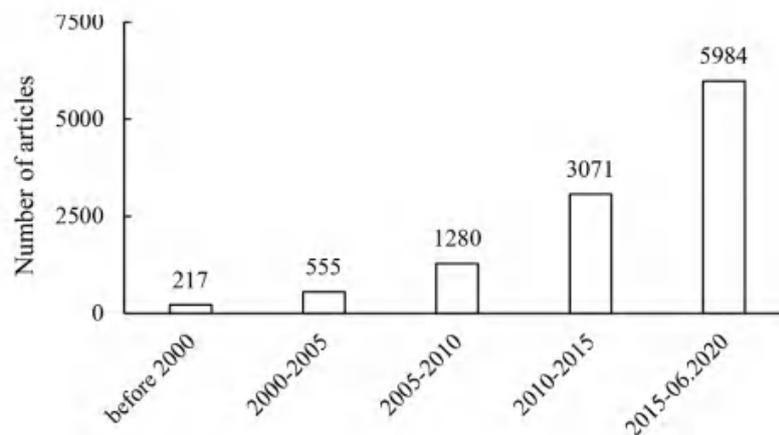


Figure II.22 : Nombre d'articles sur le sujet « béton de granulats recyclés [56].

II.3.1 Source du granulats de béton recyclé

Dans le monde, la majorité des infrastructures sont construites en béton. De nombreuses structures en béton se détériorent en raison de l'entretien tardif et de l'interaction complexe entre le béton et son environnement. Une méthode de plus en plus courante pour utiliser les gravats lorsque les structures en béton sont démolies ou rénovées est le recyclage du béton [57]. De plus, le recyclage du béton améliore le développement durable dans les constructions en béton[58].

Les granulats de béton recyclé peuvent être trouvés dans de nombreuses sources différentes.

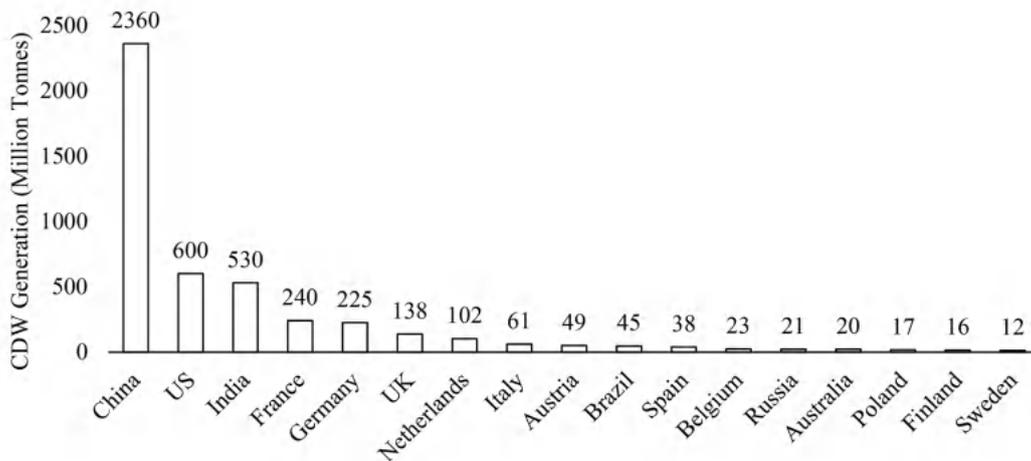
Les bétons provenant des déchets de construction et de démolition (CDW) et de l'industrie de la préfabrication sont les sources les plus courantes [59].

II.3.2 Recyclage des déchets de béton dans le monde

D'après l'Agence américaine de protection de l'environnement, les CDW sont définis comme les déchets généralement produits lors de nouvelles activités de construction, de rénovation ou de démolition de structures existantes telles que les rues, les autoroutes, les ponts, les bâtiments, les centrales électriques, les piliers et les barrages [56].

La figure II.23 illustre la quantité de CDW générée dans le monde en 2018. La Chine a enregistré la plus grande production de CDW (environ 2360 millions de tonnes), suivie par les États-Unis (environ 600 millions de tonnes) et l'Inde (environ 530 millions de tonnes en 2016).

L'Union Européenne a également produit d'importantes quantités de CDW, la France et l'Allemagne se positionnant en tant que principaux contributeurs avec respectivement 240 et 225 millions de tonnes.

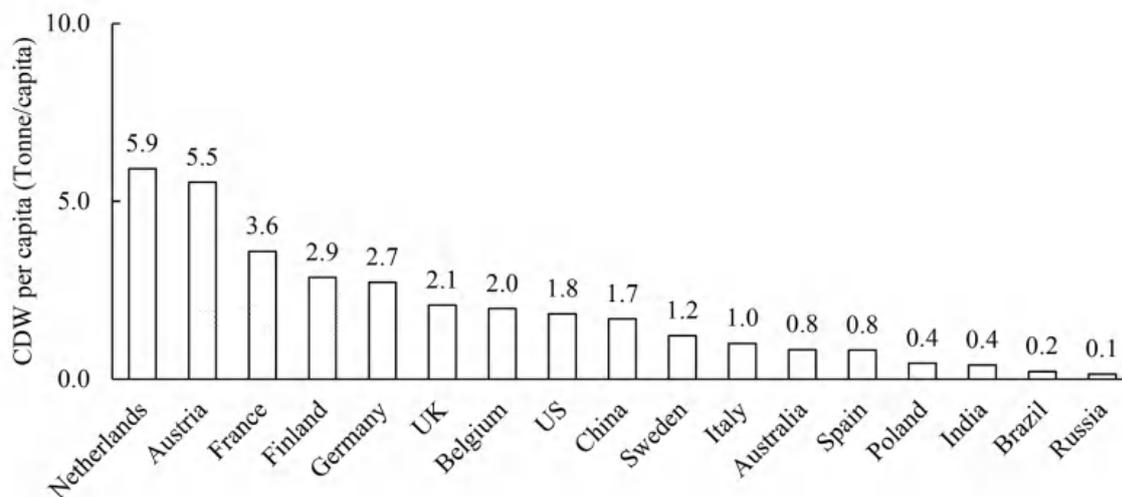


(a)

Figure II.23 : Production totale de déchets de construction et de démolition [56].

La figure II.24 présente la production de CDW en fonction de la population. La plupart des pays européens maintiennent leur position en tête, les Pays-Bas affichant une valeur de 5,9 tonnes de CDW par habitant. L'Autriche se classe en deuxième position derrière les Pays-Bas avec une valeur de 5,5 tonnes de CDW par habitant. Cependant, dans les pays produisant une grande quantité de CDW, tels que la Chine, les États-Unis et l'Inde,

la production par habitant était inférieure à celle des pays européens, atteignant seulement 1,7 ; 1,8 et 0,4 tonne de CDW par habitant respectivement.



(b)

Figure II.24 : Production de déchets de construction et de démolition par population [56].

II.3.3 Recyclage des déchets de béton en Algérie

En Algérie, en plus de la forte pénurie de granulats (10 à 20 %) ces dernières années, les déchets de construction et de démolition sont considérables et rarement exploités. Une seule initiative de valorisation dans ce domaine a été lancée à El-Asnam (actuellement Chlef) après le tremblement de terre de 1980, en collaboration avec le Centre scientifique et technique de construction belge (CSTC). D'après les informations concernant la gestion des déchets solides en Algérie (avril 2014), on estime que la production annuelle de déchets de C & D s'élève à 11 millions de tonnes. Ces derniers peuvent être un investissement rentable qui peut être valorisé. Regrettant, le processus d'industrialisation et de développement urbain n'a commencé qu'au début des années 2010 sans aucune prise en compte réelle des mesures environnementales [60].

II.3.4 Propriétés des granulats de béton recyclé

II.3.4.1 Caractéristiques physiques des granulats recyclés

Il est possible que les caractéristiques physiques "classiques" soient très variables et surtout très différentes des granulats naturels. Le tableau II.9 montre différentes valeurs d'absorption d'eau et de volume des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels.

Tableau II.9 : Caractéristiques de granulats recyclés issues de la littérature.

Référence	Taille des particules	Module de finesse	Absorption de l'eau	La masse volumique absolue (kg/m ³)	La masse volumique apparente (kg/m ³)	Abrasion (%)	Porosité (%)
Arulrajah et al [29]	Grossier	/	4.9	2710	/	/	/
	Fin	/	9.8	2600	/	/	/
Sadati et al [61]	Grossier	/	4.2	2380	1458	33	/
	Fin	/	6.8	2410	/	/	/
Miao et al [3]	Grossier (5/10)	/	4	2738	1468	/	48
	Fin	/	4.3	2730	1460	/	47
Pérez et al [62]	Grossier (5/25)	/	4.72	2531	/	38	/
Sharma et al [39]	Grossier	/	6.45	2630	/	41.23	/
	Fin	/	8.26	/	/	/	/
Zhang et al [63]	Grossier	/	5.71	2500	/	27.6	/
	Fin	/	9.8	2480	/	/	/
Li et al [64]	Grossier (5/20)	/	8.54	2637	1235	/	/
Zhang et al [65]	Grossier (5/20)	/	1.5	2467	1340	11.7	/

Selon les exemples du Tableau II.9, il est observé que la masse volumique d'un granulat recyclé est habituellement inférieure à celle d'un granulat naturel (environ de 6 à 18%), ce qui correspond aux valeurs habituellement observées pour les bétons. En revanche, la capacité des granulats recyclés à absorber de l'eau est nettement supérieure à celle des granulats naturels.

Il a été signalé que certains vieux mortiers adhèrent naturellement à la surface des granulats d'origine au cours du processus de production du RAC, devenant ainsi intégrés au produit RAC [66].

La plupart des rapports dans la littérature indiquent que le pourcentage de mortier récupéré et utilisé est généralement limité entre 20 et 30 %. Cette limitation vise à réduire les vides présents et à garantir une résistance de chaussée de qualité. Cependant, l'augmentation du pourcentage de mortier adhérent crée un système plus léger dans le RAC en raison de la porosité accrue et de la densité moindre du mortier par rapport au granulat naturel (NA). De plus, cela conduit à la formation d'interfaces agrégat-pâte plus étendues, connues sous le nom de zone de transition interfaciale (ITZ).

Cette ITZ représente une zone plus fragile du béton, susceptible de présenter des ruptures potentielles. Des études ont signalé que le béton élaboré avec du RAC présente une ITZ plus importante que le béton conventionnel, en raison de la préexistence d'une ITZ ancienne issue du mortier antérieur des granulats (ancienne ITZ) et d'une liaison entre l'ancien mortier et le nouveau mortier (nouvelle ITZ) (voir figure II.25) [67].

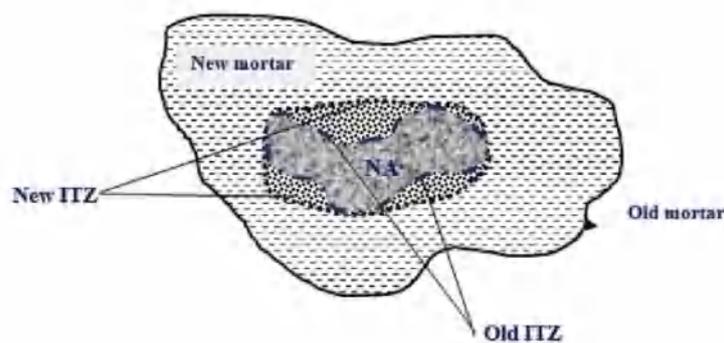


Figure II.25 : Schéma de l'ancien et du nouveau ITZ en béton [67].

II.3.4.2 Caractéristiques chimiques et minéralogiques des granulats recyclés

La composition chimique des RAC peut varier considérablement en fonction de la composition du ciment d'origine, de la composition des granulats fins et grossiers du béton de base et des caractéristiques de la pâte de ciment adhérente (contamination, détérioration) [68]. Le Tableau II.10 présente la composition chimique des granulats recyclés rapportée dans la littérature.

Tableau II.10 : Composition chimiques des granulats recyclés.

Auteurs	Composition chimique (%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	SrO	P ₂ O ₅	ZrO ₂
Yang et al [69]	54.67	8.58	3.21	2.10	17.38	/	1.32	2.08	0.07	0.33	0.54	0.16	0.06

Moreno et al [70]	56.64	14.68	5.18	1.23	14.03	/	4.69	1.91	0.94	0.7	/	/	/
Sohail et al [71]	53.9	1.7	18.2	12.5	10.8	/	1.1	0.2	0.2	/	/	0.1	/
Bui et al [72]	62.56	12.52	5.82	1.83	12.01	/	2.69	1.3	0.12	0.62	/	/	/

D'après le tableau II.10, les principaux oxydes chimiques des granulats recyclés sont la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et la ferrite (Fe_2O_3). Les autres principaux oxydes métalliques comprennent le calcium (CaO) et le potassium (K_2O). De petites quantités de sulfates et d'alcalis sont également présentes. Cette disparité est associée aux caractéristiques de la composition du ciment et des granulats du béton concassé parent et de la pâte de ciment adhérente (contamination, détérioration).

La figure II.26 montre le pourcentage moyen de composition en oxydes du RAC par rapport à celui du NA.

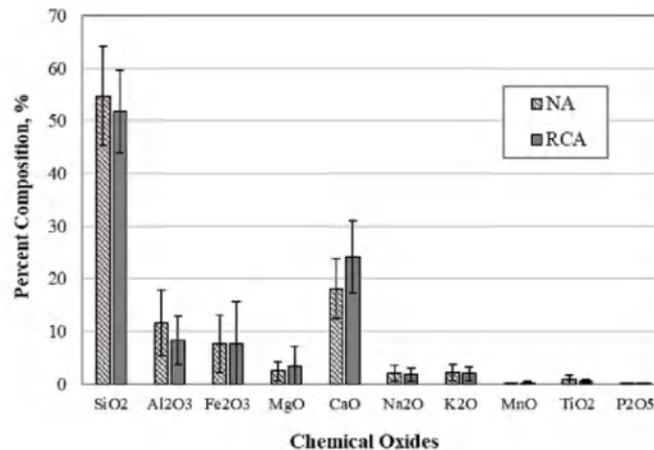
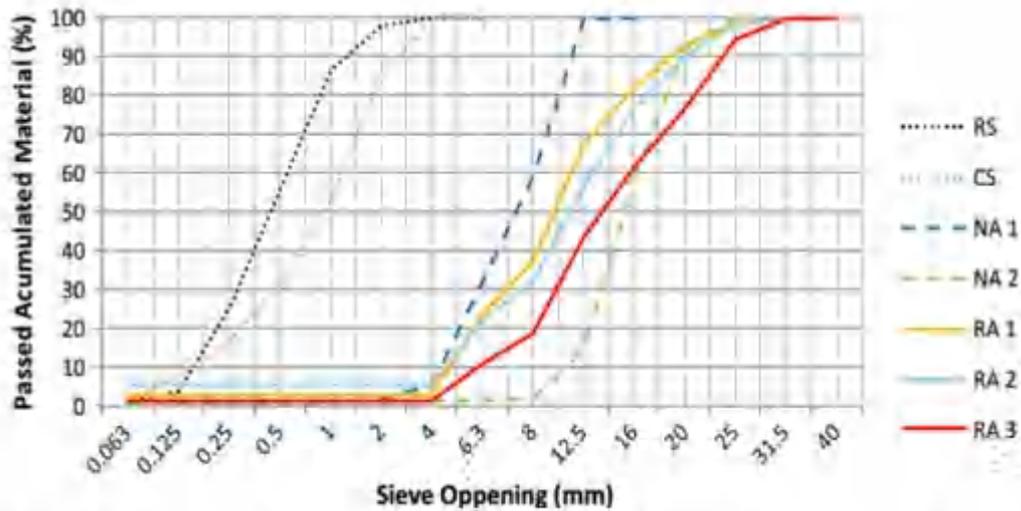


Figure II.26 : Moyenne en pourcentage de la composition chimique de RAC et NA [67].

II.3.4.3 Granulométrie

La taille des granulats recyclés varie en fonction de la qualité du béton mère. Une fois qu'il sera concassé, un béton de faible qualité présentera une plus grande quantité de fines [73]. En général, les RAC ont une teneur en fines supérieure à celle du GN.

Selon Eckert et al. [74], tous les GR peuvent présenter une distribution de taille normale et continue (Figure II.27).



RS = sable de rivière, CS = sable concassé, NA = gravier naturel, RA = gravier recyclé

Figure II.27 : Analyse granulométrique des granulats [74].

II.3.5 Influence du RAC sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires

Les propriétés mécaniques du béton sont fortement influencées par les caractéristiques des granulats recyclés. Donc, l'ajout de RAC pourrait influencer les performances des par rapport aux bétons à granulat naturel (BGN).

II.3.5.1 Proctor modifier

Poon et Chan [42] ont montré que l'utilisation de granulats de béton recyclés augmentait la teneur en humidité optimale et diminuait la densité sèche maximale des matériaux de sous-couche par rapport à celle des matériaux de sous-couche naturels (tableau II.11).

Tableau II.11 : Résultat du test de compactage pour les mélanges [42].

Mélange	La teneur en eau optimale (%)	La densité séchée maximale (Mg/m ³)
Témoin	8.6	2.15
Sériés I 100 RCA	11.8	2.02

75 RCA	12.7	1.97
50 RCA	16.0	1.82
Sériés II		
100 RCA	14.9	1.92
75 RCA	15.3	1.87
50 RCA	19.0	1.74

Bennert et al [75] ont constaté que plus la teneur en granulats recyclés de la couche de fondation routière est élevée entraîne une augmentation de la teneur en eau et en même temps une diminution de la densité sèche par rapport aux granulats naturels, comme le montre le tableau II.12.

Tableau II.12 : Résultat du test de compactage pour les mélanges [75].

Mélange	Densité sèche maximale (Kg/m ³)	Teneur en eau optimale (%)
75% DGABC, 25% RCA	2064	5.0
50% DGABC, 50% RCA	2016	6.0
25% DGABC, 75% RCA	2000	7.0
100% RCA	1984	7.5

D'autres études menées par Arulrajah et al [76] ont montré que la densité sèche maximale du RCA après l'effort de compactage Proctor modifié s'est avérée être de 1,96 Mg/m³ à la teneur en humidité optimale de 12,0 %. La courbe de compactage du RCA est présentée à la figure II.28. La teneur en humidité optimale s'est avérée légèrement supérieure à celle des matériaux granulaires standard.

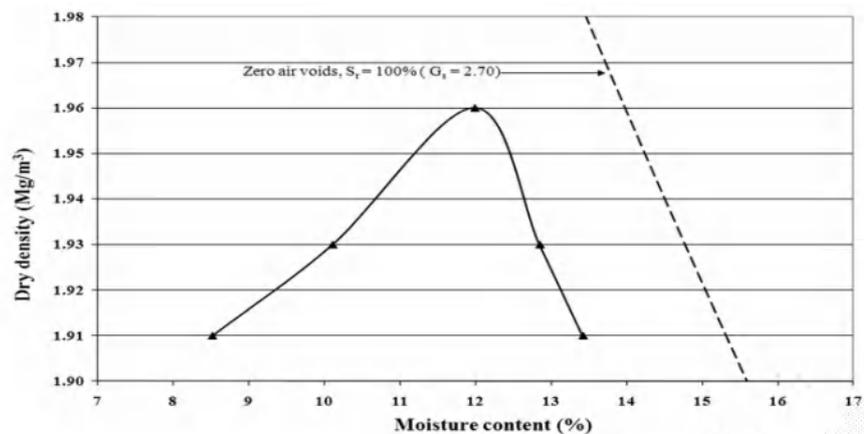


Figure II.28 : Courbe de compactage pour RCA [76].

Bahri [77] a confirmé que l'utilisation de granulats recyclés comme couche de base pour la route entraîne une augmentation de la teneur en eau et en même temps une diminution de la densité sèche par rapport aux granulats naturels, comme le montre le tableau II.13. L'absorption plus élevée de RAC peut réduire les infiltrations d'eau dans et sous les autoroutes qui utilisent le RAC comme matériau de base.

Tableau II.13 : Résultat du test de compactage pour les mélanges [77].

Mélange	Matériaux	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche maximale (T/m ³)
Mix RA0	100% LSA	11.0	1.98
Mix RA25	75% LSA +25% RCA	9.5	1.90
Mix RA50	50% LSA +50% RCA	10.6	1.82
Mix RA75	25% LSA +75% RCA	12.3	1.78
Mix RA100	100% RCA	14.7	1.74

II.3.5.2 Indice de CBR

Haider et coll. [78] ont rapporté que l'indice de CBR des couches de base composées de granulats de béton recyclés (RCA Plant A et RCA Plant B) ont fourni des valeurs CBR 2,18 et 1,67 fois plus élevées que le granulat naturel (GAB) comme indiqué dans le tableau II.14.

Tableau II.14 : Valeur de CBR des mélanges étudiés [78].

Matériaux	Valeur de CBR (%)
Granulats naturel	68
RCA-Plant A	148
RCA-Plant B	114

Leite et al. [79] ont examiné les effets de la composition et du compactage sur le comportement mécanique des couches de base et de fondation basées sur des matériaux CDW. La valeur CBR des matériaux CDW recyclés était comparable à celle des granulats naturels fréquemment utilisés dans la construction routière.

Arulrajah et al [76] ont réalisé des tests CBR sur des échantillons prélevés à trois moments différents sur plusieurs mois, dans le contexte d'applications de sous-base de chaussée (le matériau à 100 % granulats recyclés). Les valeurs CBR obtenues se situaient entre 118 et 160 %, ce qui satisfaisait aux exigences minimales fixées par les autorités routières locales d'Australie pour un matériau de sous-couche atteignant 80 %.

Bahri [77] a constaté que les valeurs CBR diminuent progressivement à mesure que le contenu RCA augmente. Selon les normes routières égyptiennes, les valeurs CBR minimales pour la sous-couche et les couches de base sont de 25 % et 50 %, respectivement. Les résultats prouvent que les valeurs CBR pour tous les mélanges de granulats granulaires recyclés sont supérieures à 25 %, donc elle est acceptable (figure II.29).

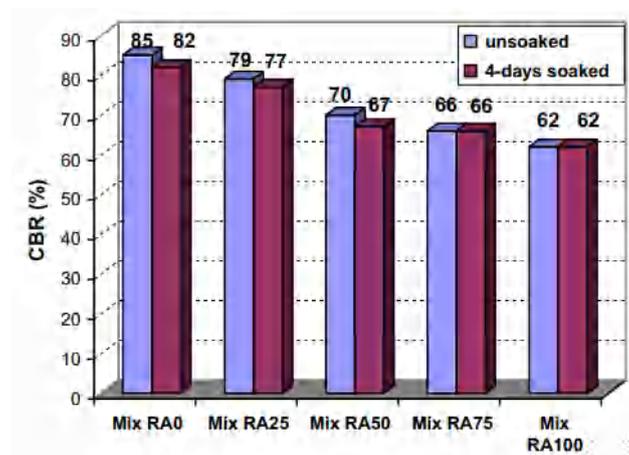


Figure II.29 : Résultat du test CBR pour les mélanges [77].

II.3.5.3 Résistance à la compression

D'après plusieurs études, le béton élaboré à partir de granulats recyclés présente une résistance à la compression inférieure de 5 à 40 % par rapport à celle du béton conçu à partir de granulats naturels.

En revanche, certains chercheurs ont déclaré que la résistance à la compression du béton utilisant des granulats recyclés reste stable ou augmente légèrement par rapport au béton utilisant des granulats naturels, particulièrement à long terme.

Bahri [77] a montré l'influence de la teneur en ciment et des fines pour les granulats de béton recyclé (RCA) et granulats naturels (LSA) traités après une période de durcissement de 3 jours, comme illustré dans les figures II.30 et 31. Généralement, il est observé que la

résistance approximative augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. Le RCA obtient une résistance à la compression plus élevée que le LSA pour chaque pourcentage des fines. Cela suggère que la relation entre l'UCS et la teneur en ciment est influencée à la fois par le type de granulat et la teneur en fines, indiquant que le choix du granulat et la quantité de fines jouent un rôle dans la détermination de la résistance du matériau.

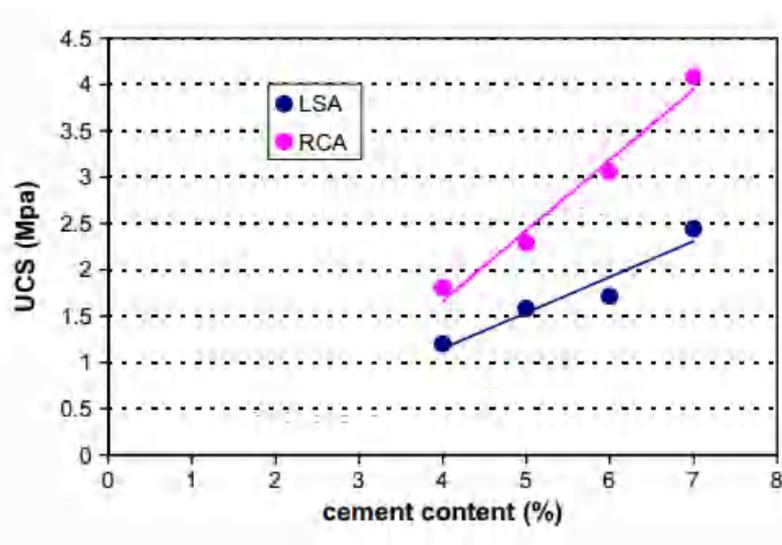


Figure II.30 : Résistance à la compression Influence de la teneur en ciment sur la Résistance à la compression [77].

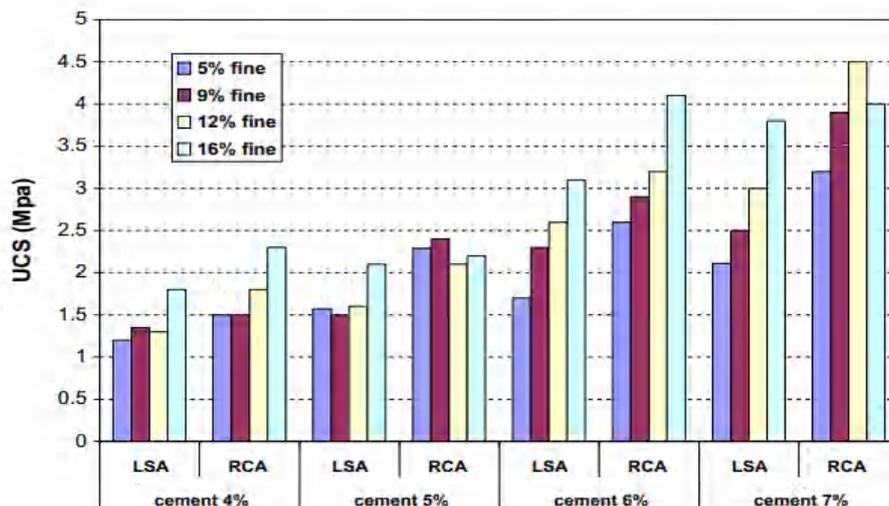


Figure II.31 : Influence de la quantité de matière fine sur la Résistance à la compression [77].

Barbudo et al. [80] ont utilisé une analyse statistique pour étudier la relation entre les différents composants des agrégats recyclés et leur comportement mécanique pour l'application routière. Les résultats ont montré que l'amélioration de la qualité des granulats

recyclés dépend de la sélection des matériaux appropriés et de l'élimination des impuretés dans une installation avec pré-criblage et double concassage. Ils ont conclu que les agrégats recyclés peuvent être utilisés comme matériaux de base pour les routes.

Dapena et al.[81] ont étudié les effets des granulats recyclés sur les caractéristiques des bétons fabriqués lorsqu'une partie des granulats est remplacée par du sable recyclé. Leur rapport eau/ciment était de 0,50. Les résultats montrent que l'utilisation de granulats recyclés jusqu'à 100 % n'affecte pas significativement la résistance à la compression à 28 jours, car elle variait entre 47,1 MPa et 52 MPa, cette dernière obtenue avec 100 % de sable recyclé.

Une autre étude réalisée par Panda et al. [82] a montré que la résistance à la compression d'une chaussée RCA pouvait être similaire à celle d'une chaussée NA, 50 % de RCA présentant des valeurs légèrement plus élevées, tandis que des teneurs plus élevées réduisaient la résistance (de 20 %). Ils ont démontré aussi que l'utilisation de 100 % RCA pour le pavé atteignait des résistances à la compression supérieures à celles de NA (a augmenté de 10,1 %).

Sadati et Khayat [61] ont évalué la performance sur le terrain d'une chaussée en béton contenant du NA et 30 et 40 % de RCA en utilisant une route de 6,6 m de large, 300 m de long et 215 mm d'épaisseur. Il est remarquable que l'ajout de 30 % et 40 % de RCA a réduit la résistance à la compression de 7 % et 12 % à 91 jours (tableau II.15).

Tableau II.15 : la résistance à la compression du béton étudié [61].

Age (jours)	Mélange témoin	30% RCA	40% RCA
1	18.2	16.3	14.0
7	31.8	27.9	28.3
28	37.6	32.7	33.3
56	39.0	36.3	37.1
91	42.6	39.8	37.5

Selon Folino et al. [83], il a été constaté une diminution de la résistance à la compression d'environ 8 %, 17 % et 20 % à 28 jours lorsque le béton est composé de 30 %, 60 % et 100 % de graviers recyclés, respectivement.

Ayoub et al. [84] ont observé que la proportion de GR influence de manière significative la résistance à la compression du BGR. Selon la figure II.32, une teneur en GR inférieure

à 50 % entraîne une légère influence sur la résistance à la compression. Cependant, une diminution significative de la résistance est enregistrée lorsque la proportion de GR atteint 100 %.

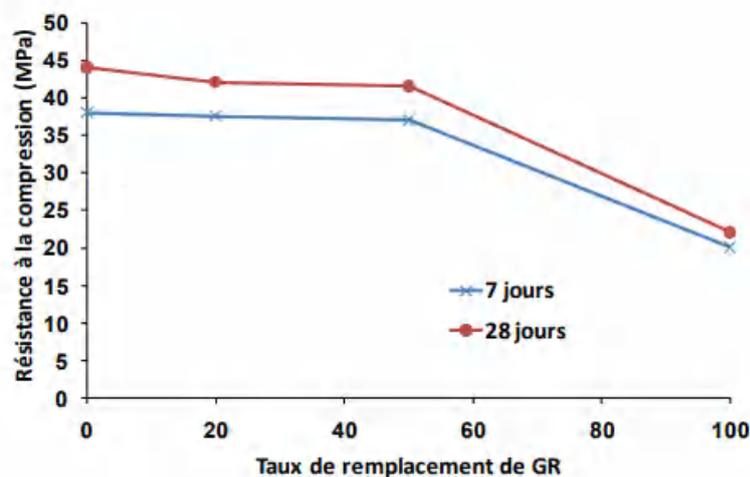


Figure II.32 : Résistance à la compression du béton en fonction du taux de GR [84].

L'étude menée par Tu et al. [85] portait sur les caractéristiques des bétons à haute performance (BHP) utilisant des granulats recyclés. Leur analyse a révélé une diminution de 20-30 % de la résistance à la compression. Les conclusions indiquent que les granulats recyclés ne sont pas appropriés pour la fabrication de bétons à haute performance en raison de leur instabilité et de la résistance relativement faible de ces granulats.

Selon les recherches de Kenai et al [86], il a été démontré que la résistance à la compression des bétons recyclés à base de briques et de béton concassé diminue en fonction de la proportion de granulats recyclés (gros et fins). La baisse est principalement causée par l'élévation du rapport E_{eff}/C et la présence de granulats recyclés qui augmentent la quantité d'eau nécessaire pour maintenir la consistance, ce qui entraîne une diminution de la résistance. De plus, l'effet du mortier attaché aux GR perturbe le bon déroulement de l'hydratation du ciment. D'un autre côté, la diminution de la résistance du béton à base de granulats de briques concassées est principalement causée par l'absorption d'eau élevée de ces granulats fins recyclés.

Perez et al. [62] ont étudié les performances du RCA traité au ciment pour les couches de base et de sous-base, les résultats montrèrent que le mélange de routes RCA a atteint une résistance à la compression sur 7 jours de 10,15 MPa et le mélange des granulats naturels a atteint 10,95 MPa.

Yan et al.[87] ont rapporté le remplacement partiel du gravier naturel (5-10 mm et 10-20 mm) dans des mélanges du macadam stabilisé au ciment avec des granulats recyclés à partir de déchets de construction à des niveaux de 0 %, 30 %, 70 % et 100 %. Comme le montre la figure II.33, la tendance générale observée que le remplacement partiel du gravier naturel dans les mélanges de macadam avec du granulat recyclé indique une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de pourcentage du granulat recyclé.

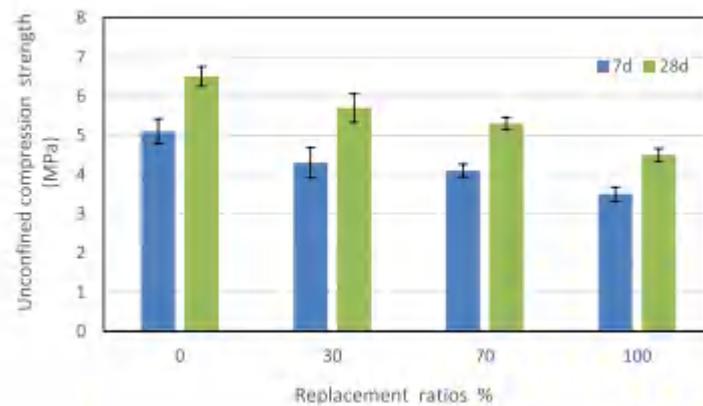


Figure II.33 : Résultats de résistance à la compression.

Dans leur étude, Poon et al. [88] ont observé que l'impact des RAC sur la résistance à la compression du BGR est significativement influencé par le niveau d'humidité initial des RAC. Ils ont constaté que la diminution de la résistance est plus prononcée lorsque l'humidité initiale est plus élevée. En fonction du degré d'humidité, la résistance à la compression peut diminuer jusqu'à 30 % ou augmenter jusqu'à 20 % lorsqu'une proportion de 100 % de granulats recyclés est utilisée, comme illustré dans la figure II.34.

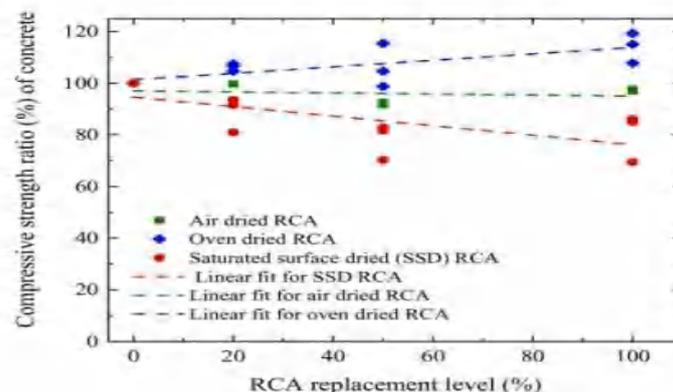


Figure II.34 : Variation de la résistance à la compression du béton avec le taux de GR pour différentes conditions d'humidité initiales [88].

La figure II.35 et le tableau II.16 représentent une synthèse de résistance à la compression

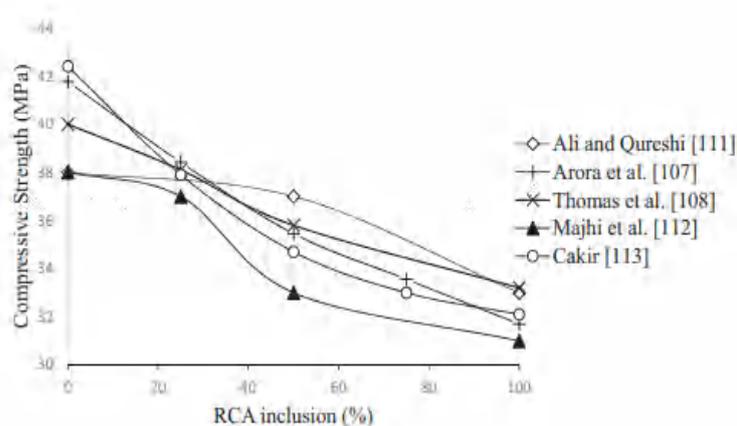


Figure II.35 : les résultats de résistance à la compression à partir de nombreuses études [89].

Tableau II.16 : Variation de la résistance à la compression à partir de nombreuses études.

Granulat grossier	E/C	Pourcentage de Remplacement (%)	Résistance à la compression	Auteur
Granulats de déchets de béton (RCA)	0.4	0	42.41	Duan et al [90]
		25	40.25	
		50	36.93	
		100	34.85	
	0.45	0	26.10	Kumar et al [91]
		25	25	
		50	24.45	
		75	23.30	
		100	24.15	
	0.50	0	37.77	Majhi et al [92]
0.52	25	36.50		
0.53	50	33.50		
0.55	100	30.50		
0.45	0.45	0	37	Andal et al [93]
		30	33.20	
		100	31.40	

		0	28.73	Daniyal et al [94]
	0.50	10	28.07	
		15	27.25	
		20	26.36	

II.3.5.4 Résistance à la traction

Lorsqu'il s'agit de la résistance à la compression, les bétons à base de granulats recyclés présentent une résistance à la traction inférieure à celle du béton de granulats naturels, et cette résistance diminue lorsque la quantité de granulats recyclés augmente.

Sadati et Kayat [61] ont évalué la performance sur le terrain d'une chaussée en béton contenant du NA et 30 et 40 % de RCA en utilisant une route de 6,6 m de large, 300 m de long et 215 mm d'épaisseur. Il est remarquable que les valeurs de résistance à la flexion des deux mélanges RCA fussent similaires à celles du béton de référence (tableau II.17).

Tableau II.17 : la résistance à la flexion du béton étudiée [61].

Age (jours)	Mélange témoin	30% RCA	40% RCA
28	5.55	5.20	5.35
56	5.80	5.85	5.70

Folino et al. [83] ont observé une diminution de la résistance au fendage à 28 jours d'environ 4 %, 3 % et 18 % lorsque le béton est composé de 30 %, 60 % et 100 % de graviers recyclés.

Thomas et al. [95] ont trouvé une diminution de la résistance au fendage à 28 jours de l'ordre de 10 %, 15 % et 20 % pour des taux de GR de 20 %, 50 % et 100 %, respectivement.

De la même manière, Gesoglu et al. [96] ont observé une diminution de 7,4 à 17,6 % de la résistance au fendage après 56 jours pour un taux de 100 % de GR.

Kou et al. [97] ont observé des améliorations de la résistance à la traction par fendage des bétons de granulats recyclés après une période de durcissement de 5 ans, parfois supérieures à celle des bétons de granulats naturels. Ces améliorations sont attribuées à l'amélioration de la microstructure de la zone de transition interfaciale, ce qui entraîne une augmentation de l'adhérence entre la nouvelle pâte de ciment et les GR, comme le reflète

la figure II. 36. À un an, les bétons préparés avec une teneur de 100 % de GR présentait une résistance au fendage supérieure à celle du béton de GN. Après 5 ans, on constatait une augmentation de 42 % à 65 % du rendement du béton avec 100 % de GR par rapport au béton de granulats naturels.

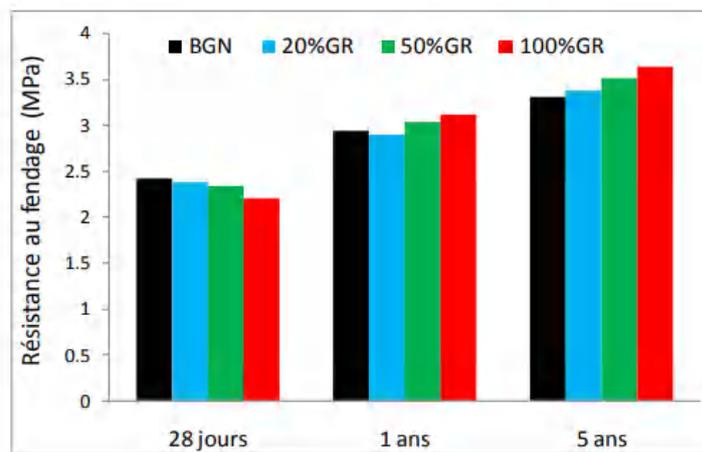


Figure II.36 : Evolution de la résistance au fendage en fonction du taux de GR [97].

La figure II.37 et la figure II.38 et le tableau II.18 représentent les résultats de résistance à traction à partir de nombreuses études.

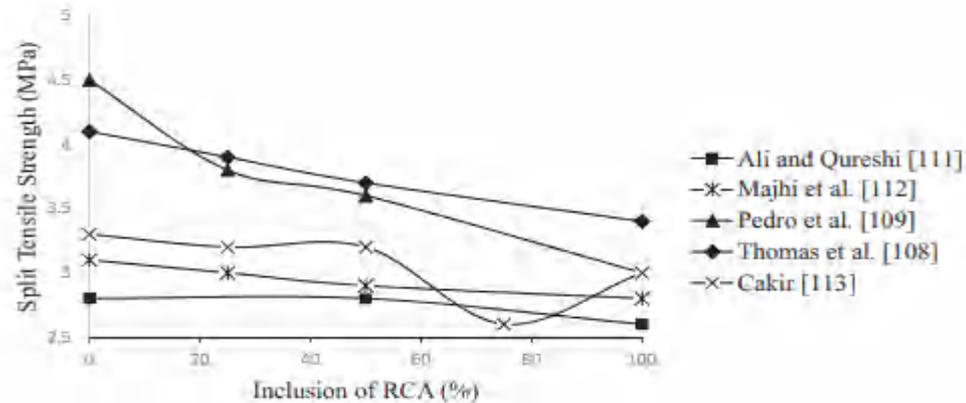


Figure II.37 : Résultats de résistance à la traction à partir de nombreuses études [89].

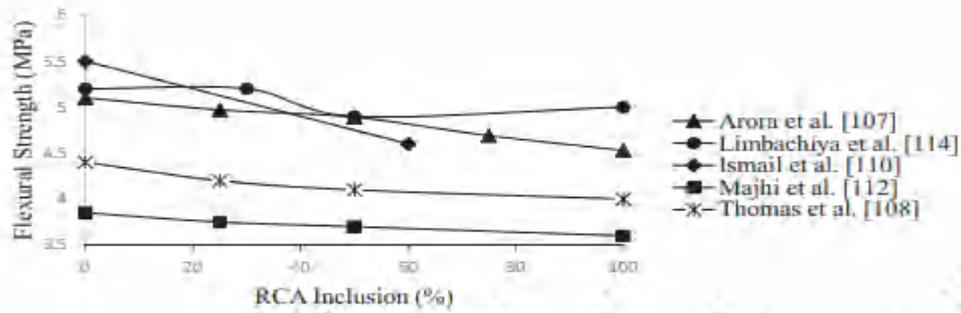


Figure II.38 : Résultats de résistance à la traction par flexion à partir de nombreuses études [89].

Tableau II.18 : Variation de la résistance à la traction à partir de nombreuses études.

Granulat grossier	E/C	Pourcentage de Remplacement (%)	Résistance à la traction par fendage	Auteur	
Granulats de déchets de démolition	0.45	0	5.30	Kumar et al [91]	
		25	4.95		
		50	4.50		
		75	4.10		
		100	4.35		
	0.40	0	4.44	Duan et al [90]	
		25	3.64		
		50	3.6		
		100	3.2		
	0.45	0	3.18	Andal et al [93]	
		30	2.68		
		100	2.32		
	0.50	0	3.1	Majhi et al [92]	
		0.52	25		3.02
		0.53	50		2.88
0.55		100	2.80		

II.3.5.5 Module d'élasticité

Haidder et coll. [78] ont rapporté que le module d'élasticité des couches de base composées de RCA était deux fois supérieur à celui des granulats naturels.

Sadati et Kayat [61] ont démontré que L'incorporation de 30 % et 40 % de RCA a réduit le module d'élasticité à 56 jours de 22 % et 14 %, respectivement (tableau II.19).

Tableau II.19 : Module d'élasticité du béton étudié [61].

Age (jours)	Mélange témoin	30% RCA	40% RCA
28	33.6	31.4	27.6
56	38.8	30.4	33.2

Leite et al. [79] ont évalué les influences de la composition et du compactage sur le comportement mécanique des couches de base et de fondation basées sur les matériaux de CDW. La valeur des modules de résilience obtenus avec les matériaux de CDW recyclés était similaire à celle obtenue avec les granulats naturels couramment utilisés dans la construction routière.

Selon Hansen [73], le module d'élasticité pour le béton à base de granulat recyclé était de 10 à 33 % inférieur à celui du béton à base de granulat naturel.

Selon Gesoglu et al. [96] , une diminution de 23,6 à 26.0 % du module d'élasticité a été observée après 56 jours pour un taux de GR de 100 % .

Xiao et al. [98], il a été constaté que le module d'élasticité du béton diminue d'environ 45 % pour un béton à 100 % de GR.

De plus, Etxeberria et al. [99] ont observé une baisse du module d'élasticité des BGR lorsque le taux de GR augmente. Le béton contenant 100 % de GR présente un module d'élasticité inférieur de 15 % à celui du BGN. Effectivement, les granulats recyclés présentent une plus grande déformation par rapport aux granulats naturels et présentent un module d'élasticité inférieur à celui des granulats naturels. En outre, le coefficient d'élasticité du béton est fortement influencé par le coefficient d'élasticité des granulats.

II.3.5.6 Effet de la qualité du granulat recyclé sur les propriétés mécaniques du béton recyclé

Ajdkiewicz et Kliszczewicz [100] ont examiné l'impact des GR provenant d'un béton de démolition à résistance moyenne à élevé sur les propriétés du BGR. La résistance à la compression du BGR s'avère supérieure à celle du béton classique lorsque les GR sont produits à partir d'agrégats du BHP. Une résistance à la compression de 80 MPa a été obtenue en utilisant des GR provenant d'un béton d'une résistance initiale de 60 MPa.

Afroughsabet et al. [101] ont observé que la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés fabriqués à partir de granulats recyclés issus d'un béton de 80 MPa est équivalente, voire légèrement supérieure, à celle du BGN à tous les stades de test.

La résistance des bétons contenant des granulats recyclés est influencée par la qualité initiale du béton dont proviennent ces granulats. Ainsi, la résistance d'un béton intégrant des granulats provenant d'un béton à haute résistance sera supérieure à celle d'un mélange utilisant des granulats recyclés issus d'un béton moins performant [102].

II.3.6 Effet du RAC sur la durabilité des matériaux cimentaires

La durabilité du béton est sa capacité à maintenir sa résistance et son intégrité face à différents types de dommages lorsqu'il est exposé à son environnement. Cette durabilité est souvent influencée par le mortier lié au GR. Une quantité accrue de mortier liée au GR entraîne généralement une porosité et une absorption d'eau plus élevées, ce qui diminue les performances de durabilité du BGR.

II.3.6.1 Absorption

Selon Debieb et Kenai [86], les bétons fabriqués à partir de granulats recyclés de béton et de brique (gros et fins) ont une absorption d'eau supérieure de 1,5 à 3,5 fois par rapport au béton témoin (Figure II.39). La hausse est attribuable à la grande absorption d'eau des granulats de béton et de briques concassés, qui est de 2 à 11 fois plus élevée pour les granulats gros et de 5 à 14 fois plus élevée pour les granulats fins) que celle des granulats naturels.

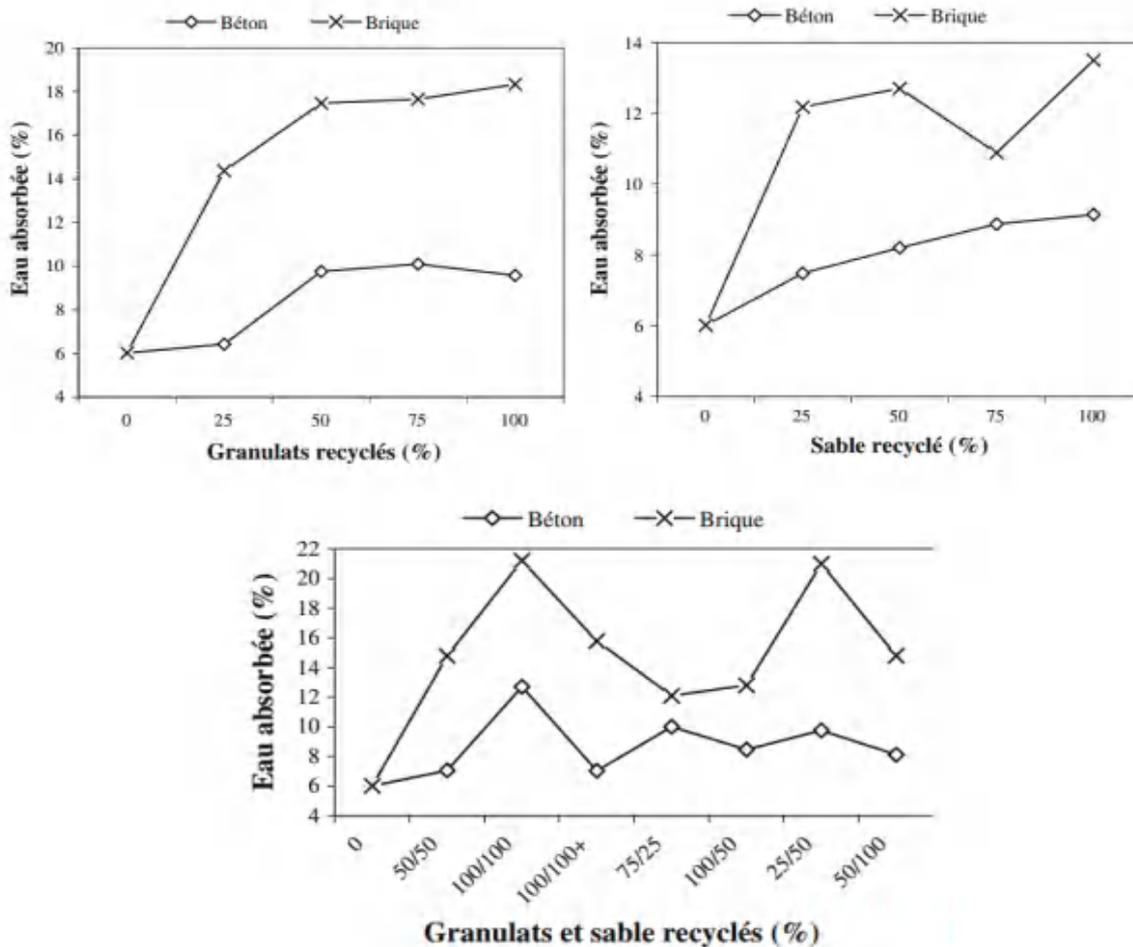


Figure II.39 : Absorption d'eau des bétons à base de granulats recyclés [86].

Selon Ayoub et al. [84], les taux d'absorption d'eau du BGR étaient supérieurs à ceux du béton classique (Figure II.40). L'écart d'absorption d'eau du granulat naturel s'est élevé à 2,6 %. On a obtenu la valeur d'absorption d'eau la plus élevée pour un spécimen contenant 100 % de GR, ce qui représente une augmentation de 0,6 fois par rapport à la normale. Il s'agit de la capacité accrue d'absorption des GR, causée par le mortier de ciment qui s'y trouve, et de la substitution des GR, ce qui a entraîné une pression d'osmose plus élevée dans la matrice de béton.

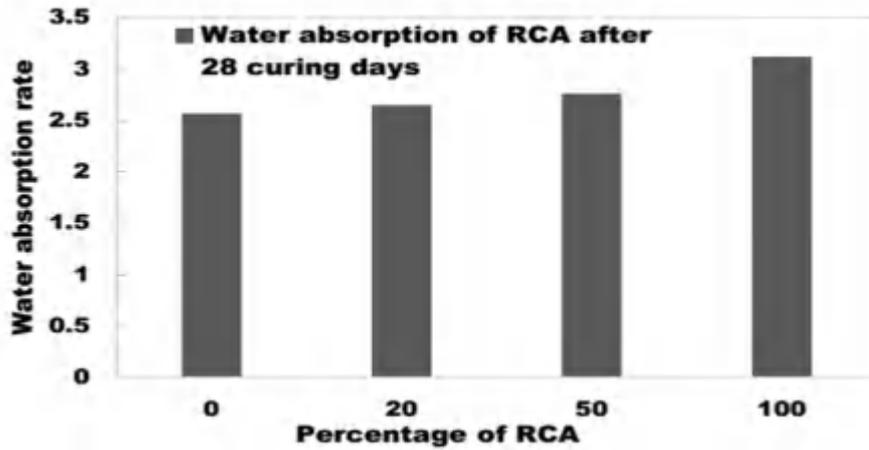


Figure II.40 : Evolution du taux d'absorption en fonction du taux de GR à 28 jours [84].

Thomas et al. [95] ont montré que Le coefficient d'absorption augmente proportionnellement au degré de substitution de la RAC. Une absorption de 100 % de RAC avec un rapport eau/ciment (W/C) de 0,65 passe de 6,2 % à 8,4 % par rapport au béton conventionnel. Comme le montre la figure II.41.

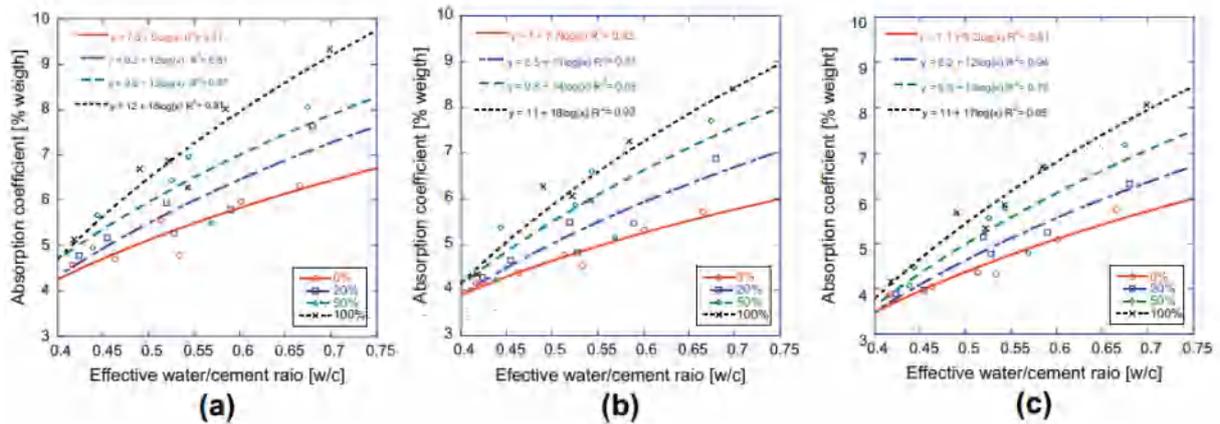


Figure II.41 : Coefficient d'absorption en fonction du rapport eau/ciment des différents degrés de substitutions après 28 jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c) [95].

II.3.6.2 Porosité

Thomas et al. [95] ont montré que l'incorporation de RAC entraîne une augmentation de la porosité par rapport au degré de substitution comme le montre la figure II.42.

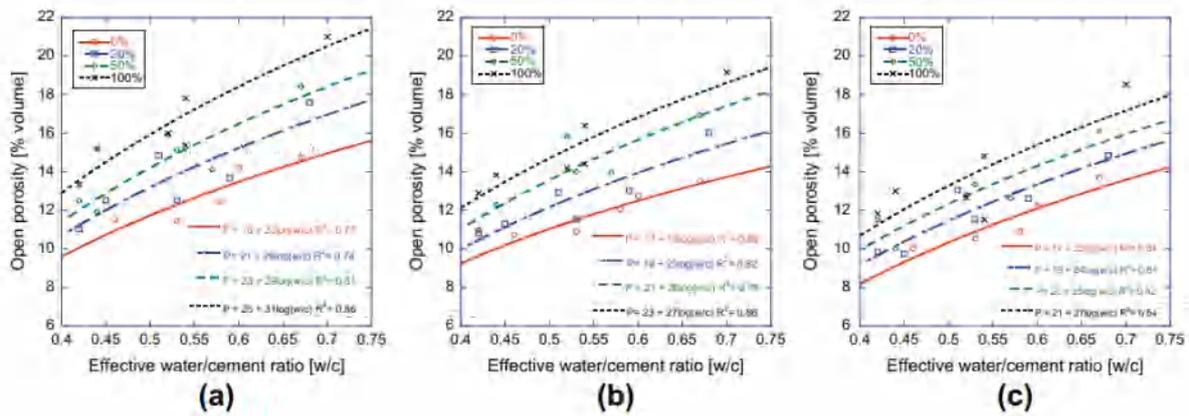


Figure II.42 : Coefficient porosité en fonction du rapport eau/ciment des différents degrés de substitution après 28 jours (a), 180 jours (b) et 365 jours (c) [95].

II.3.6.3 Résistance au gel-dégel

La résistance au gel-dégel est également un indicateur utilisé pour évaluer la durabilité du béton. Elle peut être évaluée en mesurant des paramètres tels que le module d'élasticité dynamique, la perte de poids et la résistance après exposition à des cycles de gel-dégel. Cette propriété est généralement influencée par des facteurs tels que la porosité, la teneur en eau, les conditions environnementales et les types de granulats.

La résistance au gel-dégel est une mesure de durabilité qui permet d'évaluer la résistance des chaussées en béton aux cycles hivernaux et estivaux. L'étude de Kox et al. [103] a montré que le RAC pouvait avoir une résistance similaire à celle du NA, avec un rapport E/C plus faible améliorant la résistance.

La résistance du BGR au gel-dégel est généralement faible et il n'est pas conseillé d'utiliser le BGR dans un climat froid. Toutefois, les chercheurs Salem et al. [104] ont démontré que le BGR avec un rapport E/C inférieur à 0,5 et une teneur en air de 5 % peut toujours être employé dans les climats froids sans eau et modérés.

Selon Salem et al. [104] et Verian et al. [105] Le BGR présente une résistance au gel-dégel plus faible que le béton traditionnel en raison de sa porosité plus élevée, ce qui entraîne une absorption d'eau plus importante.

Gokce et al. [106] ont démontré que le béton fabriqué à partir de granulats recyclés (GR) dérivés de bétons entraînés par l'air présente une meilleure résistance au gel-dégel que le béton utilisant des granulats recyclés provenant de bétons non entraînés par l'air, même après 500 cycles de gel-dégel.

Bogas et al. [107] ont signalé que les pertes de masse dans le BGR à haute résistance sont considérablement inférieures à celles observées dans le BGR à résistance normale. Cela

suggère que la résistance au gel-dégel du béton dépend davantage de sa résistance globale que du type de granulats utilisés.

Oliveira et al. [108] ont souligné que la résistance au gel-dégel est fortement influencée par le taux d'humidité des GR utilisés. Ils ont observé que le béton préparé avec des granulats recyclés saturés ou secs présentait une bonne résistance au gel-dégel, mais de meilleurs résultats ont été obtenus avec le béton fabriqué à partir de granulats semi-saturés. Cette amélioration s'explique par la formation d'une interface plus solide et plus dense dans ces conditions.

II.3.6.4 Microstructure

Zhang et al. [63] en utilisant la microscopie électronique à balayage pour illustrer la zone de transition interfaciale des agrégats. Ces analyses ont révélé qu'il existe une meilleure liaison entre le RCA et la nouvelle pâte de ciment par rapport au granulat naturel (voir Figure II.43). Ce résultat découle de la structure de surface lâche et poreuse du RCA, améliorant ainsi l'adhésion et mettant en évidence la capacité d'auto-cimentation du RCA.

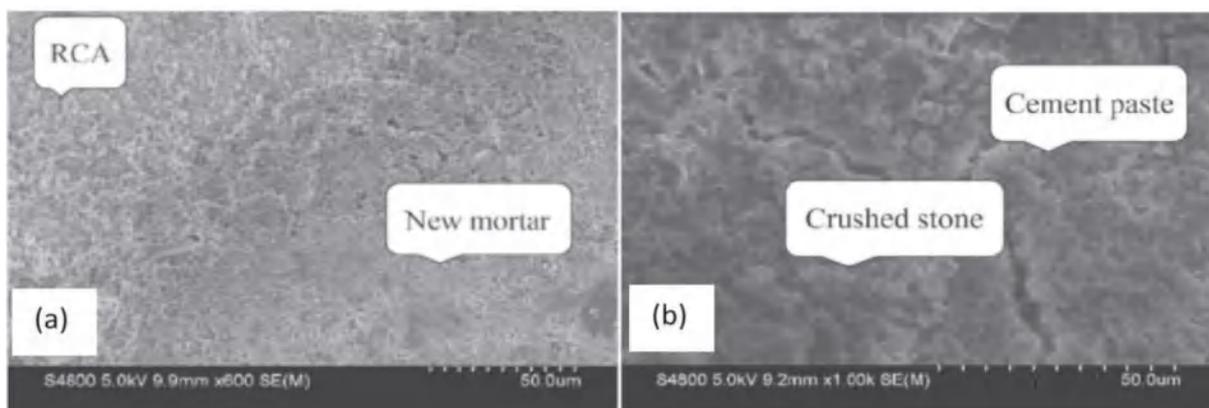


Figure II.43 : Micromorphologie de l'interface du nouveau ciment hydraté et (a) RCA, (b) NA [109].

D'autres études menées par Thomas et al. [95] ont démontré comment la nouvelle pâte de ciment enveloppe les granulats recyclés constitués d'ancienne pâte et de granulats naturels. Les observations indiquent que la pâte de ciment neuve présente une structure plus compacte et fermée par rapport à celle observée dans le granulat recyclé. La microstructure ouverte de l'ancienne pâte de ciment du RCA est détaillée dans la figure II.44.

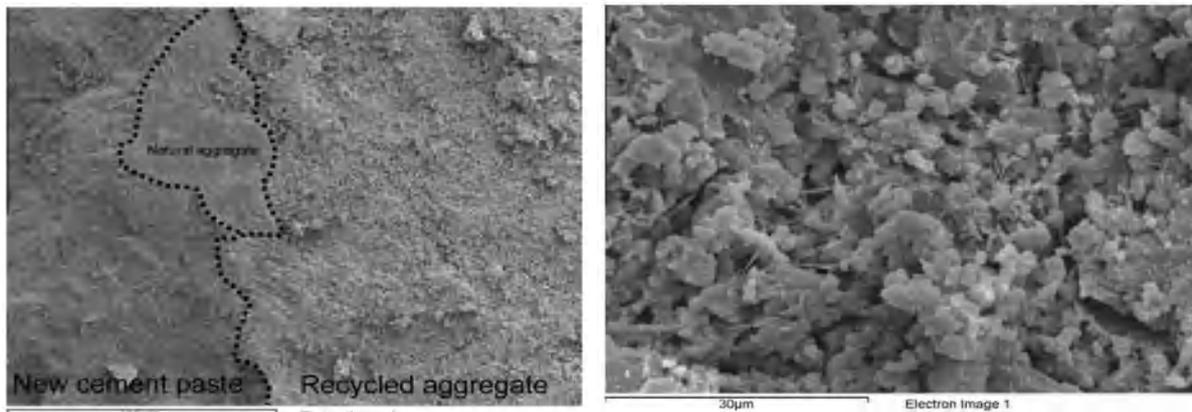


Figure II.44 : Micrographie de la structure du RAC [95].

Médine et al. [110] constatent que la zone de transition interfaciale entre la pâte de granulats recyclés et la pâte est beaucoup plus compacte et moins poreuse que celle de la pâte de granulats naturels (gravier), conférant aux bétons recyclés une meilleure qualité de fonctionnement.

II.4 Récapitulatif sur l'évaluation des performances des RAC

Les méthodes de test de performance typiques, issues de plusieurs études, pour évaluer le RAC en tant que sous-couche sont présentées dans le tableau II.20. Lorsqu'une exigence d'une norme est utilisée, une réponse oui ou non s'affiche, et lorsque les résultats sont comparés à NA, un oui indique une réponse similaire ou supérieure [67].

Tableau II.20 : Méthodes de test de performance pour évaluer le RAC pour les sous-couches de diverses études [67].

Type d'essai	Auteur	Satisfaisante
CBR	(Ardalan et al., 2020)	Oui
	(Martinez-Echevarria et al., 2020)	Oui
	(Bestgen et al., 2016)	Oui
Compactage	(Jiménez et al., 2012a)	Non
	(Pérez et al., 2013)	Oui
	(Arshad and Ahmed, 2017)	Oui
	(Cabrera et al., 2021)	Non
Résistance à la compression	(Pérez et al., 2013)	Oui
	(Lopez-Uceda et al., 2018)	Non
Résistance à la traction	(Hou et al., 2014)	Oui

	(Lopez-Uceda et al., 2018)	Non
Module d'élasticité	(Bestgen et al., 2016)	Oui
	(Arshad and Ahmed, 2017)	Oui
	(Lopez-Uceda et al., 2018)	Non
	(Toka and Olgun, 2021)	Non
Absorption d'eau	(Jiménez et al., 2012a)	Non
	(Arulrajah et al., 2014)	Non
	(Chakravarthi et al., 2019)	Non
	(Zhang et al., 2021)	Non
	(Cabrera et al., 2021)	Non
	(Teijon-Lopez-Zuazo et al., 2020)	Oui
Résistance à l'abrasion	Pérez et al (Pérez et al., 2013)	Oui
	Ardalan et al (Ardalan et al., 2020)	Oui
	(Alnedawi and Rahman, 2020)	Non
	(Teijon-Lopez-Zuazo et al., 2020)	Non

II.5 Granulat de déchet de béton bitumineux

Au cours des dernières années, une attention significative a été portée à la technologie du recyclage en raison des avantages évidents qu'elle offre pour la réhabilitation des chaussées existantes. De manière générale, le recyclage présente l'avantage de réduire la consommation de matières premières et de combustibles fossiles, tout en diminuant les émissions polluantes et en améliorant les performances des chaussées. Historiquement, les techniques de recyclage ont connu un développement rapide dans des pays tels que les États-Unis, le Canada, la France, l'Allemagne, l'Espagne et l'Australie. Par exemple, en Espagne, le recyclage des revêtements en asphalte est une pratique établie depuis plus d'une décennie. Cette approche a également été adoptée à l'échelle mondiale en raison de son potentiel à résoudre les graves problèmes de pollution, à prolonger la durée de vie des chaussées et à réduire les coûts de construction [111].

II.5.1 Source du granulat de déchet de béton bitumineux

Les matériaux RAP se définissent comme des revêtements anciens recyclés, provenant du frai-sage ou de l'arrachage de revêtements existants lors de la reconstruction et de la réhabilitation des autoroutes. Bien que la production annuelle de matériaux RAP atteigne 220 millions de tonnes en Chine, leur faible taux d'utilisation ne permet pas de répondre efficacement aux exigences de réduction des décharges et de recyclage des déchets [112].

Les composants principaux des matériaux RAP comprennent les agrégats et les liants vieillis. Ces deux éléments peuvent être intégrés dans la construction de nouvelles chaussées. Ainsi, le matériau RAP se présente comme une alternative excellente aux matériaux de chaussée vierges, capable de réduire la dépendance à l'égard des liants et des agrégats vierges. Cette caractéristique confère aux matériaux RAP une rentabilité économique et une considération environnementale [113].

II.5.2 Recyclage du granulat de déchet de béton bitumineux

D'après la Federal Highway Administration (FHWA), environ 100 millions de tonnes de RAP mélangé à chaud sont recyclées annuellement par broyage [114].

Au cours du début des années 1990, on évaluait à plus de 90 millions de tonnes la récupération annuelle d'asphalte, avec un taux de recyclage dépassant les 80 % pour le RAP, érigeant ainsi l'asphalte en tant que matériau le plus fréquemment recyclé [115].

En 2014, la National Asphalt Pavement Association (NAPA) a rapporté l'utilisation d'environ 71,9 millions de tonnes de RAP dans la construction de nouvelles chaussées aux États-Unis. Cette utilisation a permis aux contribuables américains d'économiser environ 2,5 milliards de dollars chaque année. En 2018, plus de 100 millions de tonnes de PAR ont été collectées aux États-Unis pour être réutilisées, contribuant ainsi à économiser environ 61,4 millions de mètres cubes d'espace d'enfouissement [116]. La rentabilité et l'aspect respectueux de l'environnement des matériaux recyclés, y compris le RAP, en font un choix attrayant dans certaines régions du monde [7].

II.5.3 Propriétés du granulat de déchet de béton bitumineux

Le tableau II.21 et II.22 résume les propriétés physiques et chimiques des RAP.

Tableau II.21 : Propriété physique des RAP.

Référence	Taille des particules (mm)	Module de finesse	Absorption de l'eau (%)	La masse volumique absolue (kg/m ³)	La masse volumique apparente (kg/m ³)	Abrasion (%)	Porosité (%)
Ghazy et al [117]	Agrégat grossier	/	1	2000	1400	/	30
Debbarma et al [118]	Agrégat grossier	/	0.7	2410	1613.7	/	8.5
	Agrégat fin	/	2.03	2350	1663.1	/	10.5
Singh et al [119]	Agrégat grossier	/	1.83	2490	1365	/	/
	Agrégat fin	/	2.46	2250	1428	/	/
Abedalqader et al [120]	Agrégat grossier	/	1.9	2350	/	29.6	/
Soltanabadi et al [121]	Agrégat grossier	/	1.35	2380	1224	/	/
Paluri et al [122]	Agrégat grossier	/	1.04	2600	1370	38.2	47.31
Singh et al Singh et al. [123]	Agrégat fin	3.38	2.46	2.25	/	/	/
	Agrégat fin	4.43	0.6	2.32	/	/	/
	Agrégat fin	4.37	0.81	2.40	/	/	/

II.5.3.1 Caractéristiques chimiques des granulats de RAP

Selon Chyne et al. [124] le tableau suivant présentent une moyenne de la composition chimique sur plusieurs déchets RAP.

Tableau II.22 : Composition chimique des RAP.

Auteur	Composition chimique %												
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	SrO	CuO	V ₂ O ₅	BaO	ZnO
Chyne et al [124]	38	26.8	16.3	11	2.9	1.8	1.73	0.585	0.37	0.13	0.11	0.2	0.045

II.5.4 Influence du granulat de RAP sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires

II.5.4.1 Proctor modifier

Plati et al. [125] ont étudié les performances du RAP dans la construction de couches de chaussée non liées (base et sous-couche). Le RAP mélangé avec des granulats vierges (VA) dans différentes proportions (10 %, 20 %, 30 % et 40 %). Comme le montre le tableau II.23, la variation de la OMC et la MDD diminuent en fonction de l'augmentation de la teneur en RAP.

Tableau II.23 : Résultats du test Proctor modifié pour tous les mélanges [125].

	0% RAP	10% RAP	20% RAP	30% RAP	40% RAP
OMC (%)	6.9	6.2	6.0	6.5	5.9
MDD (kg/m ³)	2196	2130	2083	2065	2041

II.5.4.2 Résistance à la compression

Plusieurs études montrent que l'utilisation des RAP a une influence négative sur la résistance à la compression : à mesure que le pourcentage de substitution de RAP augmente, on constate une réduction de la résistance à la compression [126].

Singh et al.[123] ont démontré que la résistance à la compression du béton de chaussée diminue avec l'augmentation de la teneur en RAP fin. Comme le montre la figure II.45, le remplacement jusqu'à 50 % du granulat naturel fin par du RAP fin a entraîné une légère diminution de la résistance à la compression ; cependant, à des taux de remplacement plus élevés, la réduction s'est avérée dépasser les 20 %.

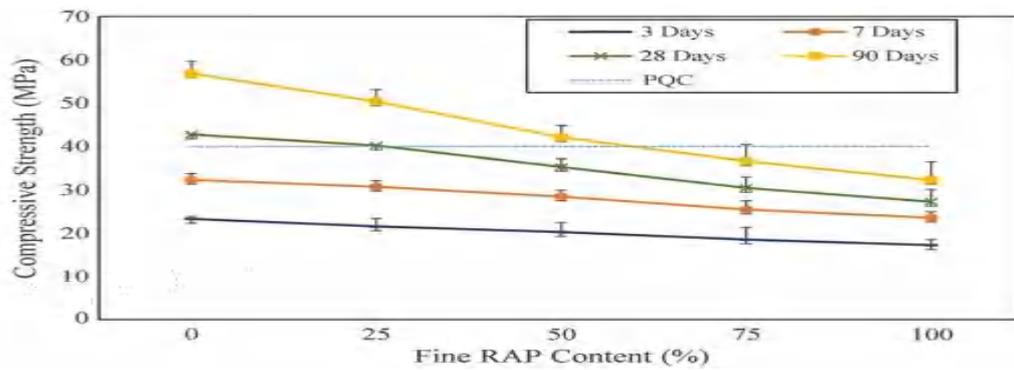


Figure II.45 : Variation de la résistance à la compression avec différente tenue en RAP fin [123].

Mahdavi et al.[127] ont remplacé les granulats grossiers par les granulats d'une chaussée d'asphalte récupéré (RAP) dans les bétons compactés au rouleau (BCR) avec des taux de remplacement de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % en volume. Comme le montre la figure II.46, l'augmentation de quantité de RAP dans les mélanges entraîne une diminution de la résistance à la compression. La réduction la plus notable par rapport aux mélanges est supérieure à 60 %, elle est observée dans le mélange contenant 100 % de RAP après 28 jours de durcissement.

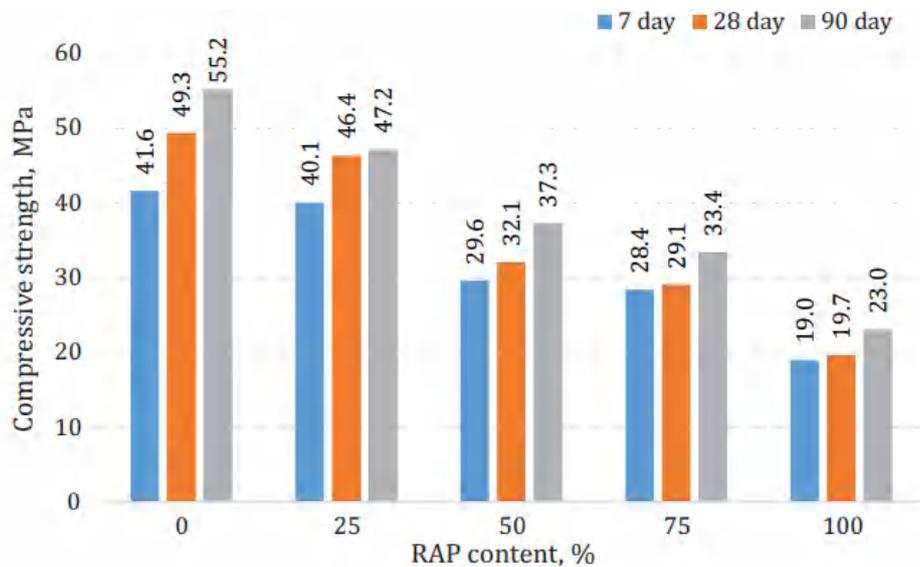


Figure II.46 : Variation de la résistance à la compression avec différent tenue en RAP grossiers [127].

Singh et al. [119] ont observé que La résistance à la compression diminue linéairement avec l'augmentation des deux fractions de teneur en RAP. Une diminution plus prononcée de la résistance à la compression dans le cas des mélanges contenant des granulats fins

d'asphalte récupéré (FRAP) par rapport aux mélanges contenant des granulats grossiers d'asphalte récupéré (CRAP) comme illustré dans la figure II.47.

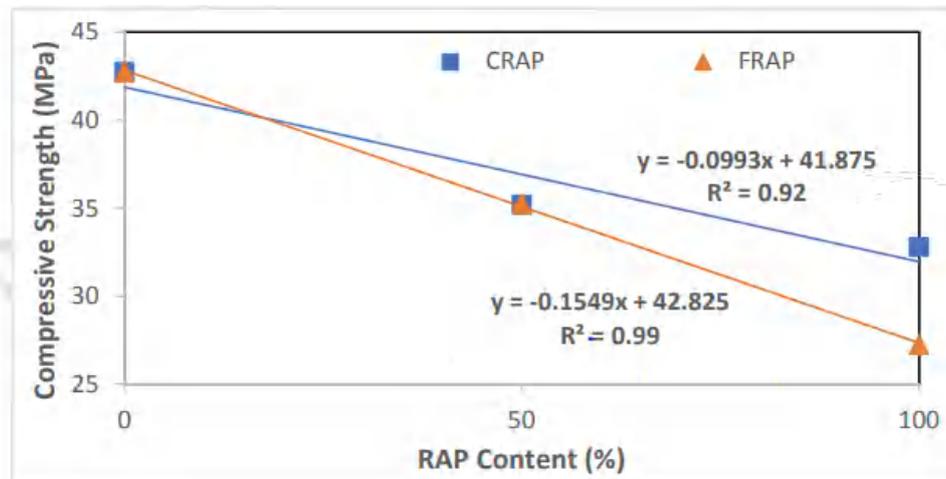


Figure II.47 : Variation de la résistance à la compression avec différente tenue en RAP [119].

Coppola et al. [128] ont démontré que l'utilisation de l'asphalte concassé conduit à une diminution de la résistance à la compression jusqu'à 50 % par rapport au béton de granulat naturel. Le tableau II.24 résume l'effet de l'incorporation de RAP grossier, de RAP fin et de RAP combiné grossier et fin sur les caractéristiques de résistance des mélanges de béton, tel que rapporté par les chercheurs.

Tableau II.24 : Résumé de la littérature sur l'effet de l'incorporation de RAP sur la résistance à la compression des mélanges de béton.

Auteur	Fraction de RAP utilisée	% De réduction la résistance à la compression
Andrew et al.[129]	RAP grossier	10-30
Soltanabadi et al.[130]		20-30
Nandi et al.[131]		24-30
Mahdavi et al.[127]		06-60
Paluri et al.[132]		10-27
Nandi et al.[131]	RAP fin	05-34
Paluri et al.[133]		06-38
Debbarma et al.[118]		09-14
Singh et al.[123]		06-36
Settari et al.[16]		51

Hassan et al.[134]	RAP fin et grossier	82
Hossiney et al.[135]		32-55
Modarres et al.[136]		60
Settari et al.[16]		41-55
Debbarma et al.[118]		06-15

II.5.4.3 Résistance à la traction

De la même manière que pour la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en RAP [137].

Singh et al. [123] démontrent que la résistance à la flexion du béton de chaussée a tendance à diminuer avec l'augmentation de la teneur en RAP fin. Comme le montre la figure II.48, le remplacement jusqu'à 25 % de granulat naturel fin par du RAP fin a entraîné une diminution de 16.2 % par rapport au mélange témoin, cependant, en cas de remplacement de 50 %, une diminution de 28,5 % a été observée ; à des taux de remplacement plus élevés (plus 50 %), la réduction s'est avérée dépasser 30 %.

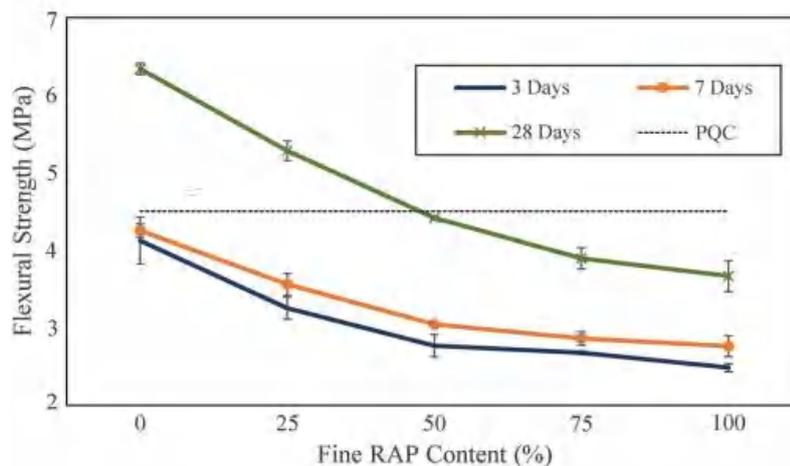


Figure II.48 : Variation de la résistance à la flexion avec différentes teneurs en RAP fin [123].

Mahdavi et al.[127] ont remplacé les granulats grossiers par les granulats d'une chaussée d'asphalte récupéré (RAP) dans les bétons compactés au rouleau (BCR) avec des taux de remplacement de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % en volume. Comme le montre la figure II.49, une réduction de la résistance à la flexion à 28 jours de l'ordre de 30 %, 40 %, 46 % et 50 % lorsque le BCR contient de 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de RAP, respectivement par rapport au mélange témoin.

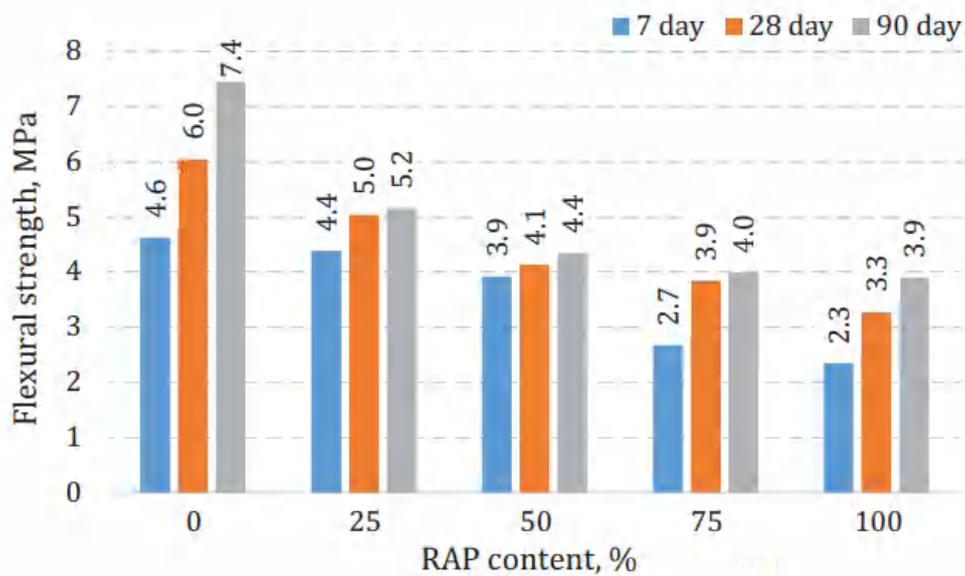


Figure II.49 : Variation de la résistance à la flexion avec différentes teneurs en RAP grossiers [127].

Singh et al. [119] ont observé que La résistance à la traction diminue linéairement avec l'augmentation des deux fractions de teneur en RAP. Une diminution plus prononcée de la résistance à la traction dans le cas des mélanges contenant des granulats fins d'asphalte récupéré (FRAP) par rapport aux mélanges contenant des granulats grossiers d'asphalte récupéré (CRAP) comme illustré dans la figure II.50.

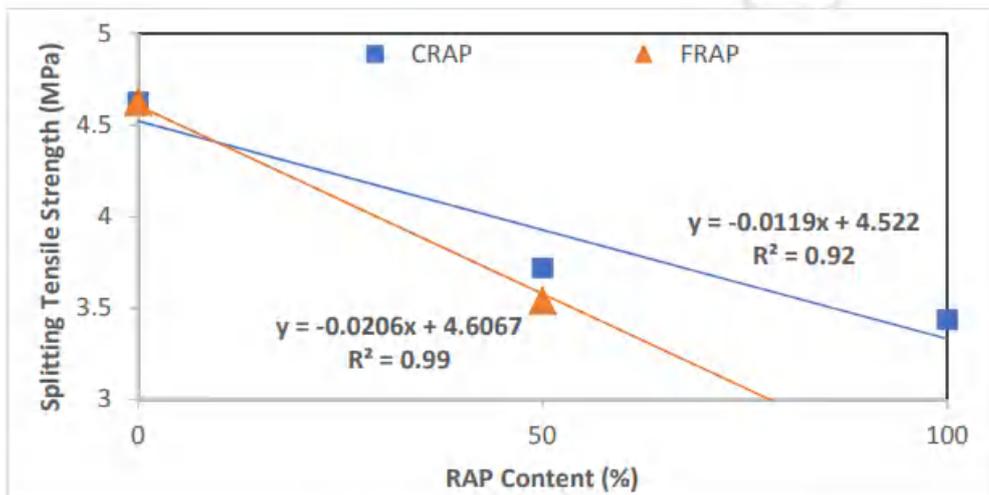


Figure II.50 : Variation de la résistance à la traction avec différente teneur en RAP [119].

Selon Hossiney et al. [135], l'utilisation de 40 % de RAP avec un rapport E/C égal à 0.53 présente une diminution de 37 % de la résistance à la flexion du béton par rapport à un béton contenant des granulats naturels.

Selon Okafor [138], les valeurs de résistance à la flexion d'un mélange de béton incorporant du RAP grossier sont inférieures à celles d'un béton fabriqué avec des granulats de gravier naturel (28 % inférieures en moyenne à 28 jours).

Paluri et al.[122] Employant le RAP comme granulat grossier pour un béton destiné à des surfaces routières de qualité, ont constaté qu'un béton contenant jusqu'à 30 % de granulats RAP présentait une résistance à la flexion supérieure à 4,5 MPa, qui est le minimum requis pour la résistance à la flexion du béton de chaussée selon les normes IS[142] pour éviter les sous-performances rhéologiques et mécaniques.

Selon Coppola et al. [128], l'utilisation de 20 % de RAP entraîne une diminution de la résistance à la flexion du béton de 14 % par rapport au mélange témoin.

Le tableau II.25 résume l'effet de l'incorporation de RAP grossier, de RAP fin et de RAP combiné grossier et fin sur les caractéristiques de résistance des mélanges de béton, tel que rapporté par les chercheurs.

Tableau II.25 : Résumé de la littérature sur l'effet de l'incorporation de RAP sur la résistance à la traction des mélanges de béton.

Auteur	Fraction de RAP utilisée	% De réduction la résistance à la traction
Nandi et al.[131]	RAP grossier	23
Mahdavi et al.[127]		16-45
Paluri et al.[132]		07-20
Nandi et al.[131]	RAP fin	29
Paluri et al.[133]		08-35
Debbarma et al.[118]		20
Singh et al.[123]		17-42
Hassan et al.[134]	RAP fin et grossier	45
Hossiney et al.[135]		15-24
Modarres et al.[136]		50
Debbarma et al.[118]		30-31

II.5.4.4 Module d'élasticité

L'ampleur du remplacement des granulats naturels par les granulats RAP a également une incidence sur le module d'élasticité : le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la teneur en RAP.

Mahdavi et al.[127] ont remplacé les granulats grossiers par les granulats d'une chaussée d'asphalte récupéré (RAP) dans les bétons compactés au rouleau (BCR) avec des taux de remplacement de 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 % en volume. Comme le montre la figure II.51, une réduction de module d'élasticité dynamique à 28 jours de l'ordre 14 % ; 18 % ; 19 % et 33 % lorsque le BCR contient de 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 % de RAP, respectivement par rapport au mélange témoin.

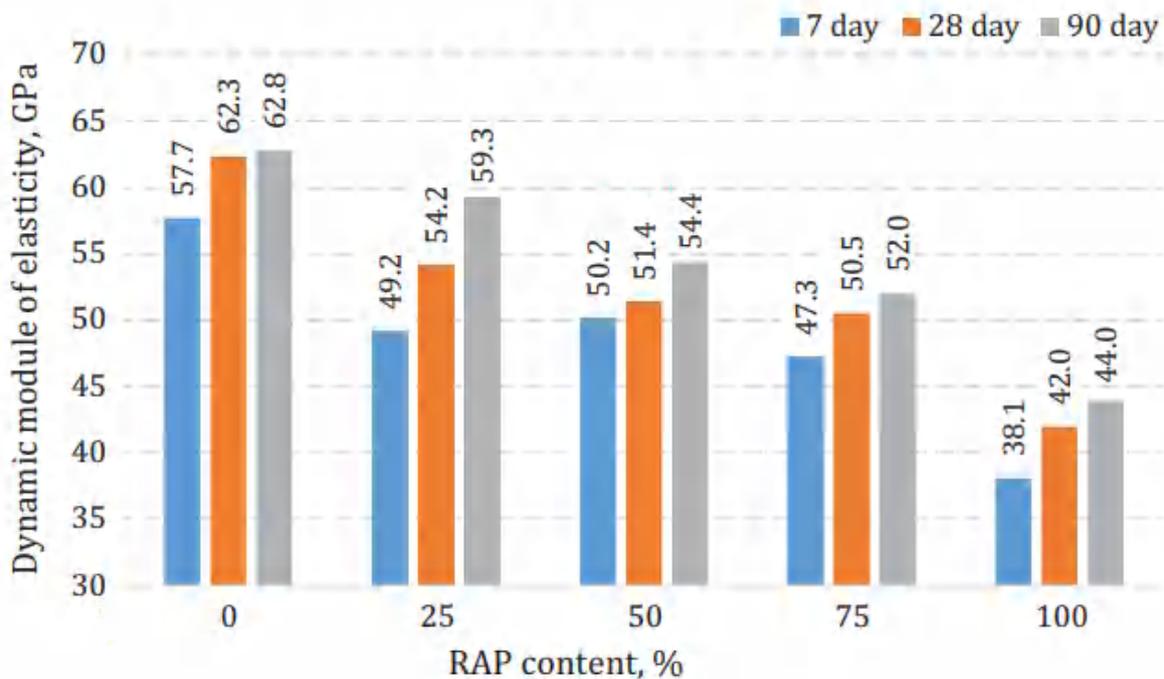


Figure II.51 : Variation de module d'élasticité dynamique avec différente tenue en RAP grossier [127].

Singh et al. [119] ont démontré que l'incorporation des granulats CRAP et granulats FRAP dans le béton a entraîné une diminution significative du module d'élasticité, cependant, les diminutions se sont révélées plus importantes pour les mélanges FRAP que pour les mélanges CRAP. Par exemple, la réduction du module d'élasticité des mélanges CRAP par rapport au mélange avec granulats naturels NA, à 28 jours, était inférieure à 26 %, tandis que pour le mélange 100 % FRAP, les réductions étaient supérieures à 40 % (figure II.52).

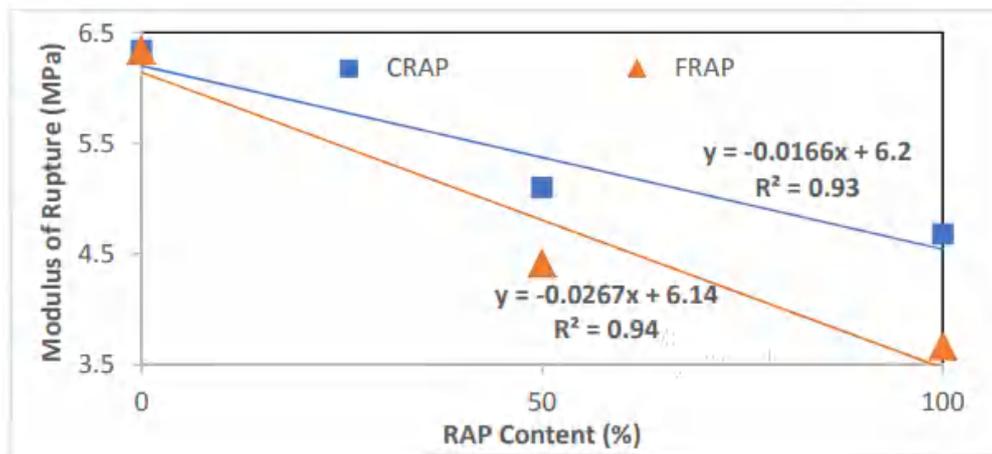


Figure II.52 : Variation de module d'élasticité dynamique avec différent tenure en RAP [119].

II.5.4.5 Indice de CBR

Plati et al. [125] ont étudié les performances du RAP dans la construction de couches de chaussée non liées (base et sous-couche). Le RAP mélangé avec des granulats vierges (VA) dans différentes proportions (10 % ; 20 % ; 30 % et 40 %). Comme le montre la figure II.53, la variation de l'indice de CBR diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en RAP.

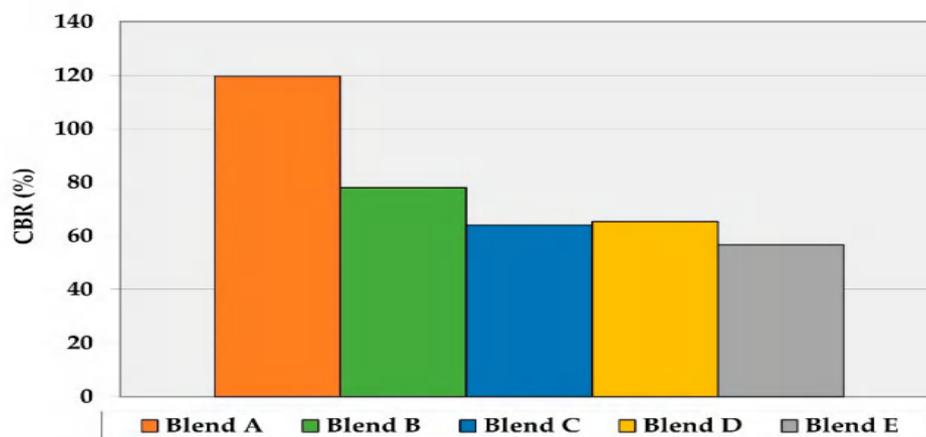


Figure II.53 : Variation de l'indice de CBR avec différente tenure en RAP [125].

Taha et coll. [139] ont étudié et évalué l'utilisation du RAP comme un granulat non lié en termes de CBR. Leurs recherches ont montré que la valeur du CBR diminuait à mesure que le pourcentage de RAP augmentait de 20 % à 100 %. De plus, aucun des échantillons n'a atteint la valeur minimale souhaitée pour le CBR, fixée à 80 % pour la couche de base.

Pradhan et Biswal. [140] ont également mélangé RAP et NA dans deux gradations différentes et ont évalué leurs performances sur la base de la valeur CBR à une humidité optimale. Leurs résultats ont montré que la valeur CBR augmentait de 32 à 100 % lorsque le RAP est mélangé avec du NA dans un rapport de 45 à 55 %, et ils ont conclu que ces mélanges RAP-NA conviennent à la couche de base de la chaussée.

II.5.5 Effet du granulat RAP sur la durabilité des matériaux cimentaires

II.5.5.1 Microstructure

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) du béton contenant des agrégats de revêtement d'asphalte récupéré RAP montre une ITZ faible et la présence des vides par rapport au béton de granulats naturels [119]. En outre, il a été rapporté que la microstructure du béton RAP grossier était plus dense que celle du béton RAP fin. On a observé la présence de vides minimums et de meilleurs ITZ dans le béton des agrégats naturels plutôt que dans le béton d'enrobé fin et grossier (Figure II.54) [118].

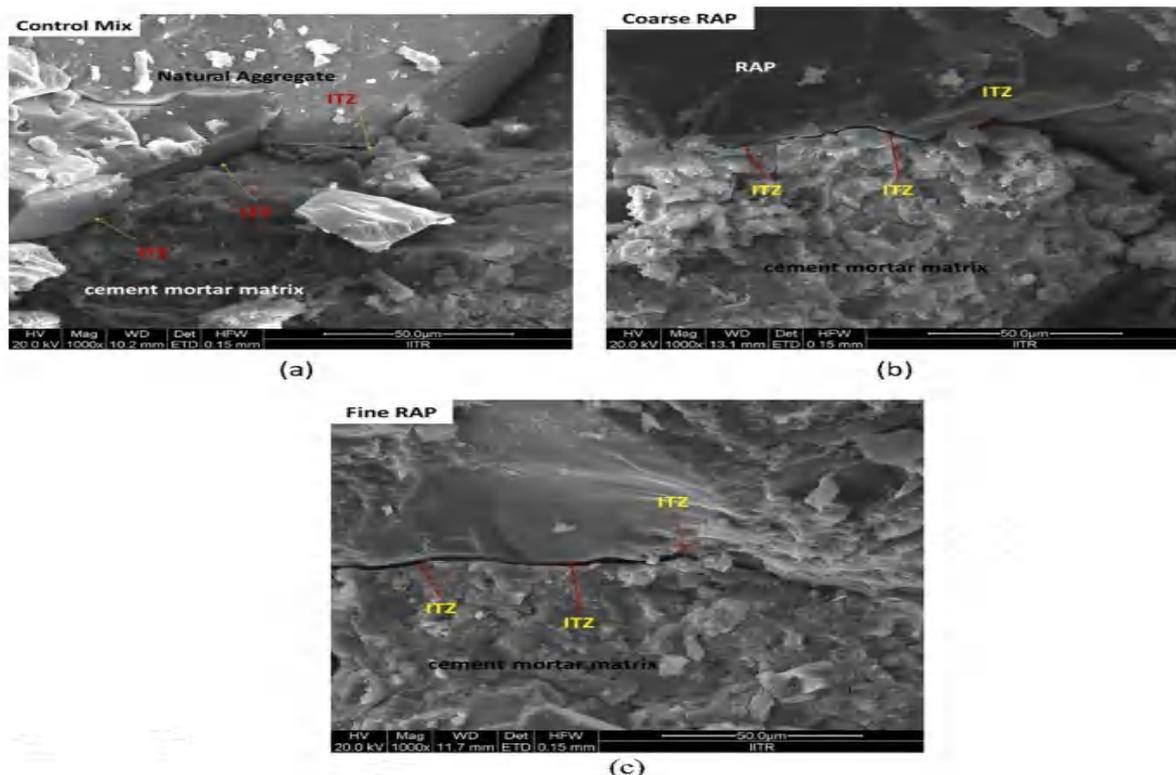


Figure II.54 : Image MEB d'un béton : (A). Béton avec granulats naturels ; (b). Béton avec RAP grossier ; (c). Béton avec RAP fin [118].

II.5.5.2 Gel/dégel

Marque et al. [141] ont signalé qu'une excellente durabilité au gel-dégel est observée pour le béton avec 0 et 20 % de granulats grossiers RAP.

En revanche, Berry et al. [142] ont démontré une diminution de la durabilité gel-dégel lorsque le pourcentage de RAP était augmenté de 50 % à 100 %.

Settari et al. [143] ont étudié l'influence des cycles de gel-dégel sur le béton fabriqué à partir de granulats de chaussée recyclés. L'étude examine l'aspect visuel et la perte de poids après 300 cycles de gel-dégel, ainsi que la corrélation entre la résistance à la compression et la perte de poids. Les résultats montrent que la résistance au gel-dégel est directement influencée par le type de granulats recyclés et que le béton recyclé avec un ratio élevé de granulats de chaussée recyclés a une meilleure résistance. La corrélation entre la résistance à la compression après ces cycles et la perte de poids donne une meilleure résistance aux bétons recyclés avec un taux élevé de granulats de chaussée recyclés comme le montre la figure II.55.

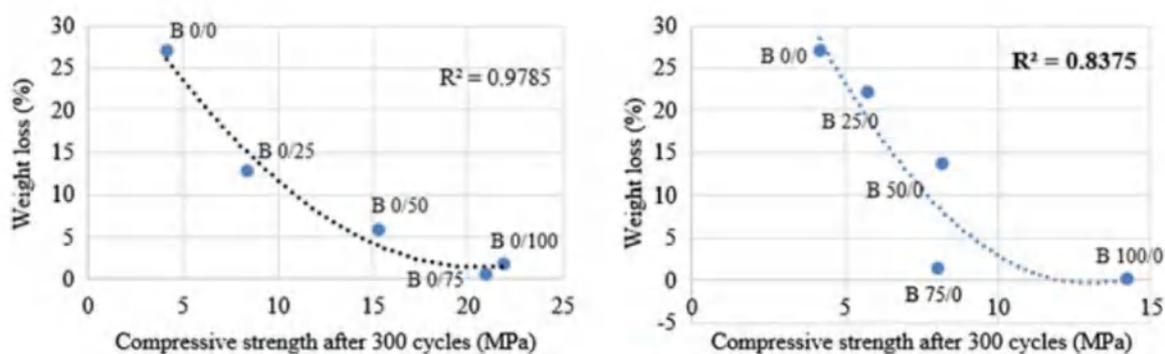


Figure II.55 : Corrélation entre perte de poids et résistance à la compression avec RAP fin et grossier [143].

II.5.5.3 Absorption

Singh et al. [123] ont étudié l'absorption d'eau au remplacement du granulat fin naturel dans le béton de chaussée par un revêtement d'asphalte recyclé fin (RAP) à des niveaux de remplacement (0 % ; 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 %) à 28 et 91 jours de cure. Les résultats indiquent qu'une augmentation de l'absorption d'eau à 28 jours de 3,5 et 8,1 % pour les niveaux de remplacement de 25 et 50 %, respectivement par rapport au mélange témoin, alors que pour les niveaux de remplacement de 75 et 100 % l'augmentation s'est avérée être de 21,3 et 29,4 % (figure II.56).

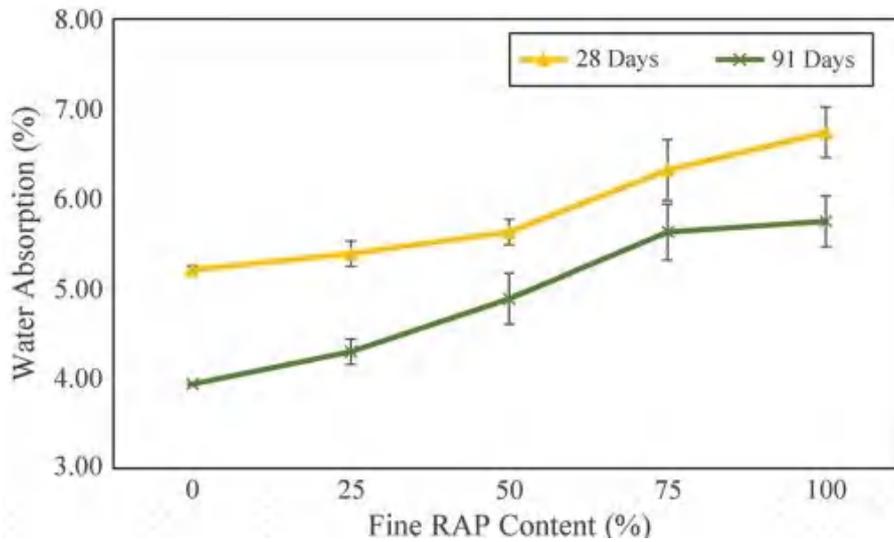


Figure II.56 : Absorption d'eau des mélanges à 28 et 91 jours [123].

Mahdavi et al.[127] démontrent que les variations de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la quantité de RAP n'ont pas suivi de modèle spécifique (figure II.57).

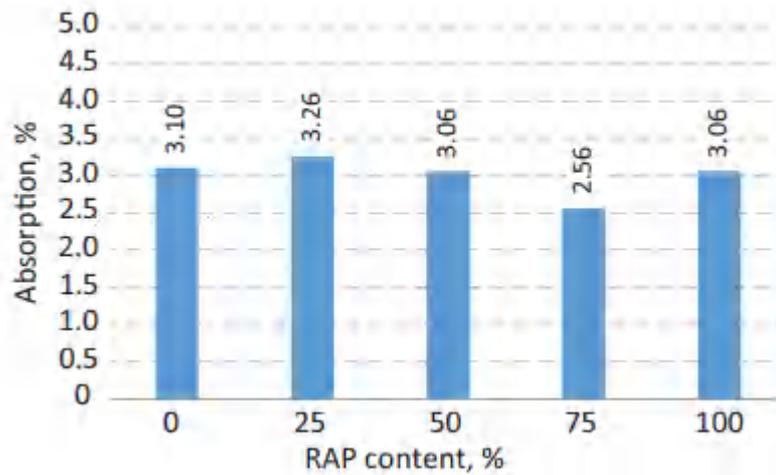


Figure II.57 : Absorption d'eau des mélanges [127].

Singh et al. [119] démontrent que l'incorporation de granulats CRAP entraîne une réduction de l'absorption d'eau de béton alors que l'incorporation des granulats FRAP conduit à une augmentation de l'absorption d'eau, comme illustré dans la figure II.58.

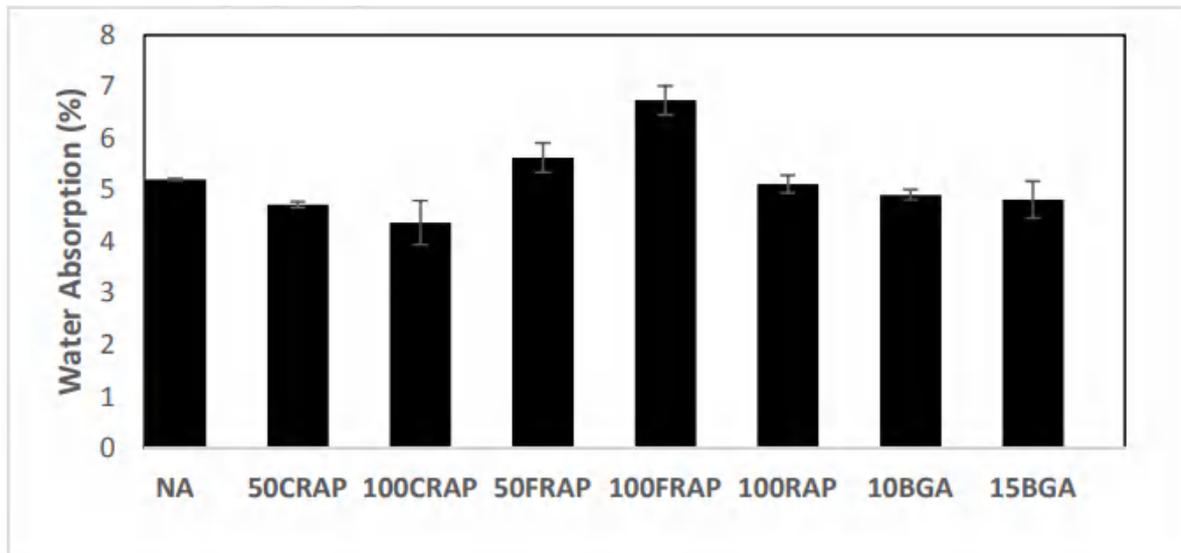


Figure II.58 : Absorption d'eau des mélanges [119].

Thomas et al.[144] ont étudié le taux initial d'absorption et le coefficient d'absorption capillaire au remplacement de granulats grossiers naturels dans le béton par un RAP. Les résultats démontrent que ces paramètres diminuent avec l'augmentation de la teneur en granulats de RAP : le taux initial d'absorption et l'absorption capillaire ont diminué de 50 % pour un béton contenant 75 % de RAP par rapport à un béton avec uniquement des granulats naturels.

II.5.5.4 Porosité

Singh et coll. [119] ont observé que l'incorporation de différents types de granulats fractionnés de RAP provoquait également une augmentation de la porosité dans les mélanges de béton.

Cependant, Sahdeo et al. [145] montrent la tendance de la porosité des mélanges de béton pour chaussées qui augmente avec l'augmentation de la taille des gros granulats RAP.

L'augmentation de la porosité était la principale raison due à l'ITZ plus pauvre, épaissie, plus grande, absorbante et poreuse dans la matrice de béton de Brand & Roesler [26].

II.5.5.5 Résistance à l'abrasion

Singh et al. [123] ont examiné la résistance à l'abrasion lors du remplacement de granulats fins naturels dans le béton de chaussée par un RAP fin à des niveaux de remplacement (0 % ; 25 % ; 50 % ; 75 % et 100 %). Les résultats indiquent qu'il y a une augmentation de

la perte de masse avec l'augmentation de la teneur en RAP fin. Cette augmentation est d'environ 33 %, 45,8 %, 62,5 % et 75 % pour les taux de remplacement (25 % ; 50 % ; 75 % et 100 %) de RAP fin, respectivement par rapport au mélange témoin (figure II.59).

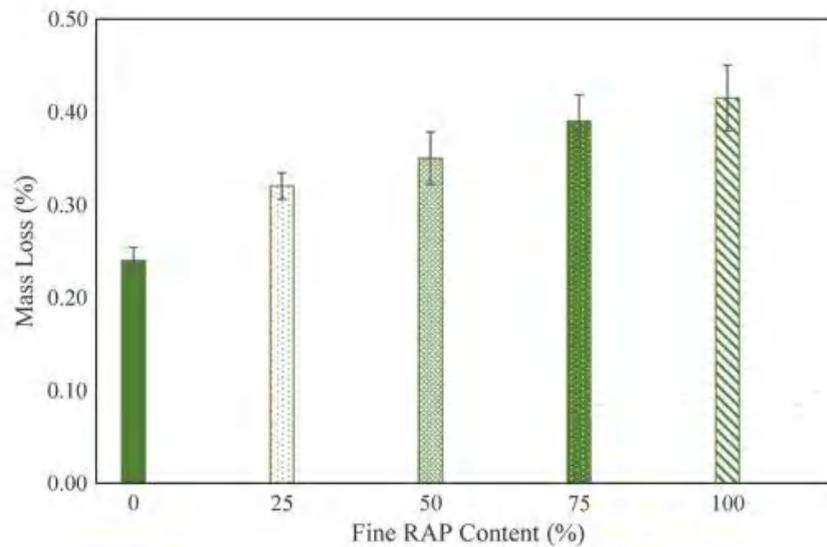


Figure II.59 : Perte de masse due à l'abrasion [123].

Singh et al. [119] ont observé que le remplacement des granulats naturels par des granulats RAP a entraîné une augmentation de la perte de masse. La diminution de la résistance à l'abrasion du béton était de 75 % lorsque les granulats naturels fins étaient remplacés complets par des granulats fins (FRAP). Alors que pour le remplacement à 100 % des granulats naturels grossiers par des granulats grossiers d'asphalte récupéré (CRAP), la diminution était de 67 % (figure II.60).

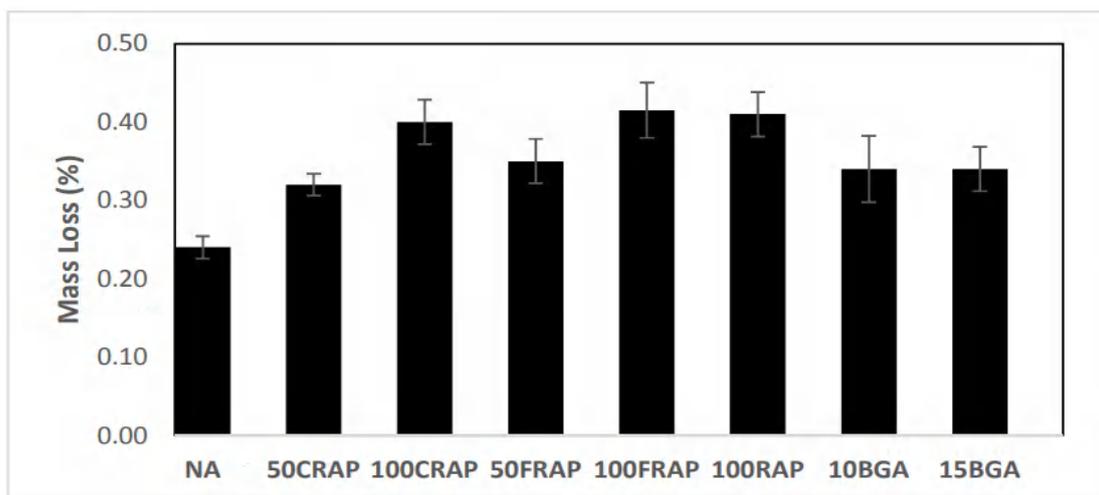


Figure II.60 : Perte de masse due à l'abrasion [119].

II.5.6 Récapitulatif sur l'évaluation des performances des RAP

Les recherches menées antérieurement sur l'utilisation des granulats de RAP et leurs principaux résultats comme substitut d'agrégat dans le béton sont résumées dans le tableau II.26.

Tableau II.26 : Utilisation du RAP dans différents domaines et principaux résultats de la recherche [137].

Applications	% d'articles ($N_{\text{tot}} = 46$ articles)	Principales conclusions
Trottoirs Routes	72 %	<ul style="list-style-type: none">• La résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, la résistance à la flexion et le module d'élasticité diminuent lorsque le pourcentage de RAP augmente.
Utilisations structurelles	28 %	<ul style="list-style-type: none">• Un pourcentage plus élevé de RAP a une incidence négative sur la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, la résistance à la flexion et le module d'élasticité.• Il manque encore des études sur la durabilité de l'effet du RAP sur le béton.

II.6 Conclusion partielle

Ce chapitre met en lumière les différentes approches d'évaluation des performances des matériaux recyclés dans les MGT LH.

Concernant l'emploi des granulats de RAP, il est évident que leur utilisation offre des avantages potentiels en termes de durabilité environnementale. Cependant, une évaluation minutieuse de leurs propriétés mécaniques s'avère nécessaire, étant donné la diversité des résultats observés. En effet, la substitution des granulats traditionnels par des granulats de briques recyclées peut influencer des caractéristiques telles que la résistance à la compression, la porosité, la résistance à la traction, et la résistance au gel-dégel.

Par ailleurs, l'évaluation des performances des granulats de RAC révèle une variété de résultats en fonction des critères étudiés. Les méthodes de test de performance typiques montrent des réponses variables, ce qui souligne l'importance d'une analyse détaillée pour chaque aspect mécanique évalué.

En ce qui concerne l'utilisation des granulats de RAP, les études antérieures mettent en évidence des résultats contrastés, notamment en ce qui concerne la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion et le module d'élasticité. Ces variations soulignent la nécessité de poursuivre les recherches sur la durabilité de l'effet du RAP sur le béton.

Ainsi, cette analyse des performances des différents matériaux recyclés souligne l'importance de mener des évaluations approfondies pour chaque type de déchet afin de mieux comprendre leur impact sur les propriétés des mélanges traités aux liants hydrauliques. Malgré les résultats prometteurs présentés dans ce chapitre, il est important de noter que peu de travaux ont été réalisés sur l'incorporation de ces déchets en tant que grave ciment pour les couches de base et de fondation des routes. La plupart des études se concentrent sur leur utilisation dans le béton. C'est précisément ce constat qui justifie l'intérêt de notre plan expérimental à suivre. Ce dernier vise à combler cette lacune en évaluant spécifiquement l'incorporation de ces déchets dans les mélanges de grave ciment pour les couches de base et de fondation des routes.

III. Chapitre III : Analyse cycle de vie et développement durable

Le développement durable est devenu un enjeu majeur dans le domaine de la construction routière, où la préservation de l'environnement et la gestion efficace des ressources sont essentielles. Dans ce contexte, l'analyse du cycle de vie (ACV) émerge comme un outil précieux pour évaluer l'impact environnemental des matériaux utilisés et des processus de construction. Ce chapitre se concentre sur deux aspects cruciaux : l'impact environnemental des déchets utilisés dans la construction routière et l'application de l'analyse du cycle de vie pour évaluer la durabilité de ces matériaux. Nous examinerons en détail la méthodologie de l'ACV, sa standardisation, ainsi que ses avantages et inconvénients. Tout d'abord, nous aborderons l'impact environnemental des déchets, mettant en lumière les conséquences de leur utilisation dans les mélanges traités aux liants hydrauliques. Ensuite, nous plongerons dans l'analyse du cycle de vie, en retraçant son évolution historique et en définissant ses principes fondamentaux. Nous explorerons également comment cette méthodologie peut être appliquée spécifiquement dans le domaine des matériaux cimentaires et de la construction routière. Enfin, nous conclurons en soulignant l'importance de l'ACV comme un outil crucial pour promouvoir le développement durable dans la construction routière, offrant ainsi des perspectives pour des pratiques plus respectueuses de l'environnement et une gestion plus efficace des ressources.

Sommaire partiel

III.1	<u>IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DECHETS</u>	86
III.2	<u>ANALYSE CYCLE DE VIE (ACV)</u>	88
III.2.1	<u>Bref historique de l'ACV</u>	88
III.2.2	<u>Définition de l'ACV</u>	89
III.2.3	<u>Standardisation de l'ACV</u>	90
III.2.4	<u>La méthodologie de l'ACV</u>	92
III.2.5	<u>Evaluation des impacts environnementaux</u>	92
III.2.6	<u>Avantages et inconvénients</u>	93
III.2.7	<u>Application de l'ACV dans les matériaux cimentaires</u>	94
III.2.8	<u>Application de l'ACV en technique routière</u>	95
III.3	<u>Conclusion partielle</u>	99
	<u>Synthèse bibliographique</u>	101

III.1 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES DECHETS

La demande de matières premières augmente en raison du développement technologique et économique. Après des décennies de production, le béton qui consomme une grande partie de ces matériaux reste le matériau le plus utilisé dans l'industrie de la construction à ce jour [146].

Les composants les plus importants du béton sont les granulats. En raison de la production et de l'utilisation rapide de béton, la consommation de granulats naturels a également augmenté. La figure III.1 montre l'origine et la quantité des granulats naturels dans divers pays. Les granulats les plus courants sont le sable de rivière, le gravier et les roches concassées. Cependant, leur quantité diminue et leur extraction cause des problèmes importants [57].

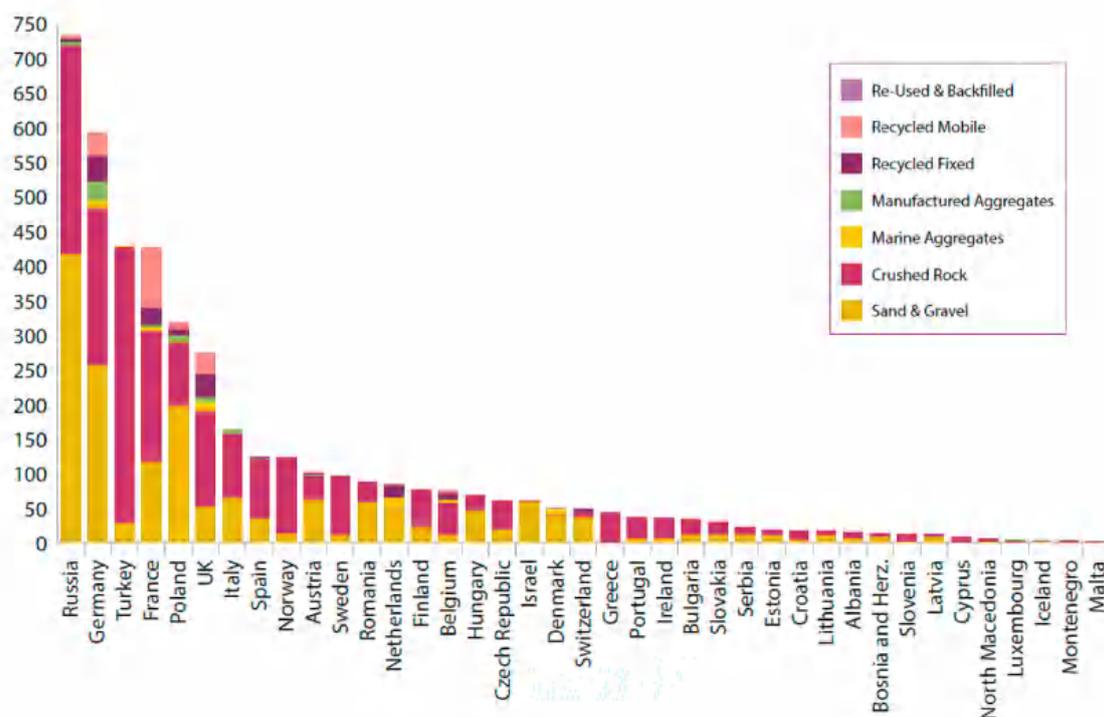


Figure III.1 : Production de granulats 2018 (en millions de tonnes par pays et par type) [57].

La modification du cours de l'eau, l'érosion du littoral, la création de déviations et de fosses en cul-de-sac sont tous des dommages environnementaux causés par l'extraction du sable fluvial. Par exemple, la figure III.2 montre l'impact significatif de l'extraction de sable et du dragage dans la branche nord du plus grand lac d'eau douce de Chine en l'espace de 18 ans. La topographie et les caractéristiques hydrologiques ont été considérablement modifiées par le dragage du

sable en réduisant le niveau de l'eau et en augmentant la turbidité et les concentrations de sédiments [147].

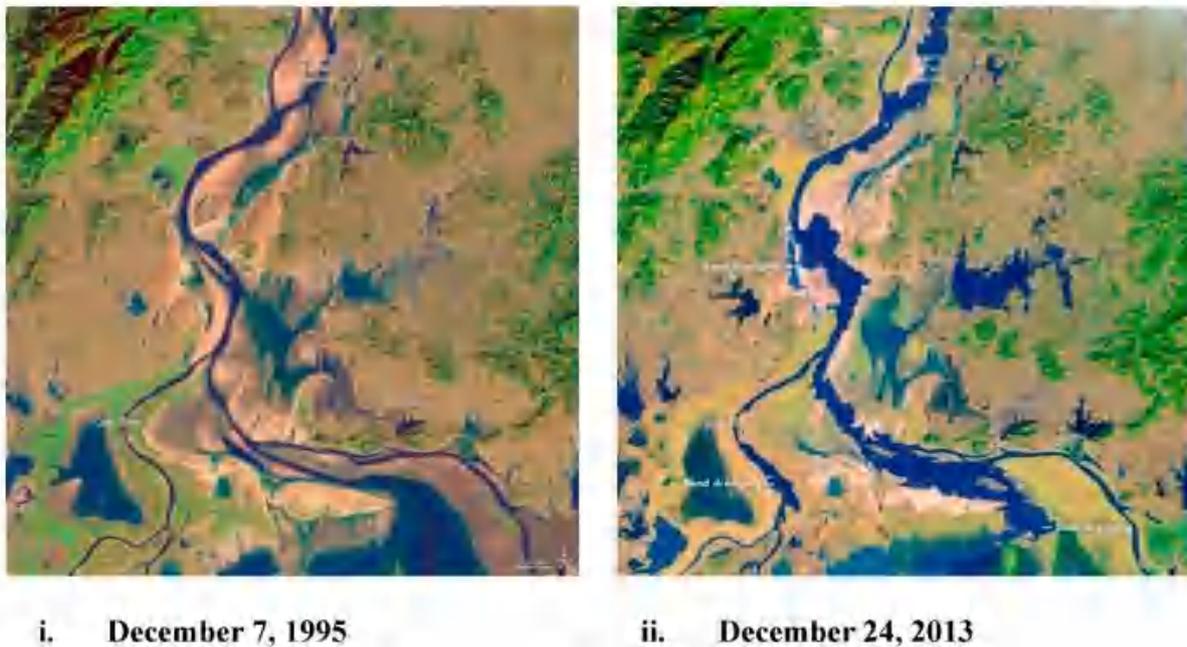


Figure III.2 : L'impact de l'extraction intensive de sable et du dragage sur le canal qui relie le lac Poyang au fleuve Yangtze [148].

Les sources alternatives sont de plus en plus importantes compte tenu de la demande de béton et de l'impact de l'extraction de granulats naturels fins (0-4 mm) dans les rivières et les mers.

Par conséquent, la question qui se pose est jusqu'à quand les matières premières diminuant continuellement suffiront-elles ? Il est impossible de déterminer le volume des ressources naturelles ni la durée pendant laquelle elles peuvent être consommées sans être épuisées puisqu'elles ne sont pas renouvelables. Ainsi, les experts s'attendent à ce que le problème du déséquilibre entre la demande de ces matériaux et leur volume s'aggrave, il est donc nécessaire de trouver une alternative [149]. De nombreux pays ont souligné le besoin vital de nouveaux matériaux pour soutenir l'économie de la construction, étant donné que les décharges disponibles ne suffisent plus et sont en diminution rapide. Alors, une relation a été établie entre ce problème et la demande de récupération du flux de déchets solides non dégradables, pour faire face aux problèmes de durabilité, d'énergie et d'environnement à la fois.

L'utilisation des déchets dans la construction a appelé à de plus grands débats sur la satisfaction des conditions d'économie d'énergie qui en résultent et la réduction des émissions

de CO₂, pour répondre aux exigences environnementales. Les économies d'énergie associées au processus de recyclage sont similaires à la production de granulats broyés et la demande d'énergie sera similaire pour les deux procédés. Il est généralement admis que les matériaux de construction les plus utilisés actuellement ainsi que les méthodes de construction ne sont pas durables, avec des impacts environnementaux importants tels que la consommation d'énergie, la pollution, les poussières, l'épuisement des ressources naturelles et les émissions de CO₂. Meddah [150] a souligné que l'augmentation de la consommation d'énergie de toutes les sources pourrait même contribuer au changement climatique mondial. Il a également révélé que la réduction des émissions mondiales de CO₂ pourrait être réalisée en sélectionnant des matériaux ayant un impact environnemental plus faible [150].

III.2 ANALYSE CYCLE DE VIE (ACV)

Actuellement, les questions environnementales occupent une place de plus en plus centrale dans les décisions politiques, industrielles et économiques. Le respect de l'environnement est essentiel pour garantir la préservation des ressources pour les générations à venir. Le concept de développement durable, largement débattu, repose sur trois piliers fondamentaux : l'économie, l'environnement et le social. Sa mise en œuvre se traduit par des actions concrètes visant à réduire les impacts environnementaux et à préserver notre planète. Dans ce contexte, ce chapitre aborde l'ACV, un outil essentiel d'évaluation environnementale qui permet des comparaisons quantitatives. Il présente le cadre méthodologique de l'ACV et le compare à d'autres approches d'analyse environnementale.

III.2.1 Bref historique de l'ACV

En 1960, les premières initiatives en ce qui concerne l'ACV, des initiatives ont été lancées au Royaume-Uni (UK) et aux États-Unis d'Amérique (USA) respectivement, sous l'égide de [151, 152]. Harry E. Teastley Jr. a mené la première étude d'ACV pour Coca-Cola en 1969. Même si cette étude n'a jamais été complètement publiée, un résumé a été présenté dans le Science Magazine en avril 1976. Elle a comparé les bouteilles en verre et en plastique en termes d'impact environnemental depuis l'extraction des matériaux jusqu'à la fin de leur cycle de vie. Selon les résultats, le bilan environnemental de la bouteille en plastique est moins néfaste que celui de la bouteille en verre. À la suite de cette étude, un référentiel d'évaluation environnementale appelé

Analyse des Ressources et du Profil Environnemental (ARPE), basé sur l'approche de Harry E. Teastley Jr [153], a été établi. Environ quinze études ont été réalisées en utilisant ce référentiel.

Le premier choc pétrolier en 1973 a sensibilisé à la problématique de gestion des ressources énergétiques, devenue une évidence [154].

Les années 1980 ont marqué l'émergence des premières données de bilans écologiques fournies par l'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP) (BUS, 1984). Jusqu'au début des années 1990, [150] ont proposé un guide intitulé "Environmental Life Cycle Assessment of Products", publié par le Centre des Sciences de l'Environnement (CML) de l'Université de Leyde aux Pays-Bas. Ils ont présenté une nouvelle approche d'évaluation des impacts environnementaux, et la publication de "The LCA Sourcebook" a suivi en 1993. En parallèle, la Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) a contribué à l'évolution de la méthode et a publié un guide pour la réalisation de l'ACV [155]. Au cours de cette période, les premiers logiciels permettant de lier les inventaires (Input/Output) de matières et les méthodes de calcul d'ACV ont été développés.

En 1997, la première norme internationale établissant un cadre structuré pour l'ACV a été publiée (ISO 14040 :1997), rapidement suivie par l'ISO 14041, 14042 et 14043 (ISO 14043 :1998 ; ISO 14043 :1999). Depuis le début des années 2000, la méthodologie de l'ACV a été mise à jour et consolidée dans les normes ISO 14040 et ISO 14044 (ISO 14040 :2006 ; ISO 14044 :2006). De plus, la méthodologie intègre le calcul de l'incertitude et de la sensibilité, tout en suivant l'évolution des bases de données d'inventaires et des méthodes de calcul.

III.2.2 Définition de l'ACV

L'ACV émerge comme la méthodologie prédominante pour évaluer les performances environnementales d'un produit, d'un service, ou d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie [156-159]. Il s'agit d'une approche multicritère et à plusieurs étapes, ancrée dans le concept de développement durable tout au long du cycle de vie du produit ou du service. Cette méthode englobe la quantification des entrées et sorties (consommation de ressources, émissions dans l'air, l'eau, le sol, etc.) depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie.

L'ACV représente un outil d'aide à la décision répondant à la nécessité d'identifier les actions prioritaires, particulièrement lorsque les dirigeants ne sont pas disposés à investir dans les enjeux environnementaux. En accord avec les normes ISO 14040-14044, l'ACV est la méthodologie de référence la plus exhaustive pour réaliser l'inventaire des flux, quantifier et évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou service. Elle se décompose en quatre étapes distinctes [159] :

- a) La définition des objectifs et du système d'étude.
- b) L'inventaire du cycle de vie des émissions et des extractions.
- c) L'évaluation des impacts environnementaux.
- d) L'interprétation des résultats.

III.2.3 Standardisation de l'ACV

Le tableau III.1 présente la méthodologie de l'ACV, qui découle de l'évaluation continue selon une série de normes (Série des normes ISO 14040). Il est essentiel de souligner que l'ACV permet la quantification des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un processus, impacts qui contribuent directement ou indirectement à la fabrication du produit. L'objectif de cette méthode est d'éviter le déplacement des pollutions [160]. Cependant, l'ACV permet de quantifier les impacts potentiels plutôt que réels, dépendant des hypothèses formulées lors de la définition de l'unité fonctionnelle et du périmètre d'étude. Ceci présente un risque significatif d'influencer les résultats obtenus et d'engendrer des interprétations erronées [161].

L'absence de données fiables, en raison de la confidentialité ou de l'absence de données dans certains domaines, entraîne des simplifications dans l'inventaire et l'utilisation de données génériques ou bibliographiques simples [162].

Tableau III.1 : Document normatif relatif à l'ACV [163].

Numéro	Type	Intitulé	Année
14040	ISO	Management environnemental : analyse du cycle de vie : principes et cadre	1996, 2006
14041	14041	Management environnemental : analyse du cycle de vie : définition de l'objectif et du Champ d'étude et analyse de l'inventaire	1998
14042	ISO	Management environnemental : analyse du cycle de vie – Évaluation de l'impact du cycle de vie	2000
14043	ISO	Management environnemental : analyse du cycle de vie : interprétation du cycle de vie	2000
14044	ISO	Management environnemental : analyse du Cycle de vie : exigences et lignes directrices	2006
14047	Rapport technique	Management environnemental : analyse du cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 aux situations d'évaluation de L'impact du cycle de vie	2003, 2012
14048	Rapport technique	Management environnemental : analyse du cycle de vie – Format de documentation de Données	2002
14049	Rapport technique	Management environnemental : analyse du Cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à la définition de l'objectif et du champ d'étude et à l'analyse de l'inventaire	2000, 2012

III.2.4 La méthodologie de l'ACV

La méthodologie de l'ACV d'un produit ou d'un système est résumé à la figure III.3.

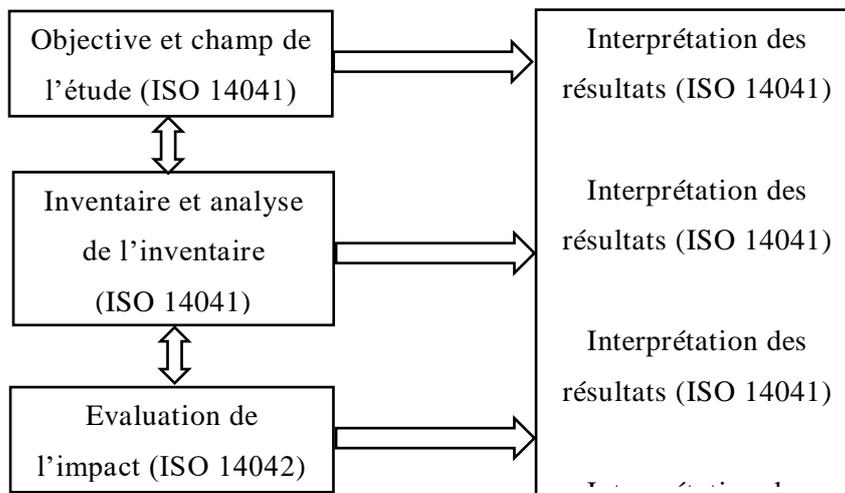


Figure III.3 : Les étapes de processus d'analyse cycle de vie [164].

III.2.5 Evaluation des impacts environnementaux

Cette phase implique la conversion des données relatives à la consommation de matières premières et d'énergie ainsi que des émissions répertoriées lors de l'inventaire en impacts environnementaux tels que l'effet de serre, l'acidification et l'eutrophisation. Ces impacts sont destinés à refléter les performances environnementales du système examiné en établissant des liens entre les données de l'inventaire et les catégories d'impacts [164].

Le schéma général du cadre méthodologique, qui lie tous les résultats d'inventaire aux catégories intermédiaires (problèmes) et dommages, est représenté à la figure III.4.

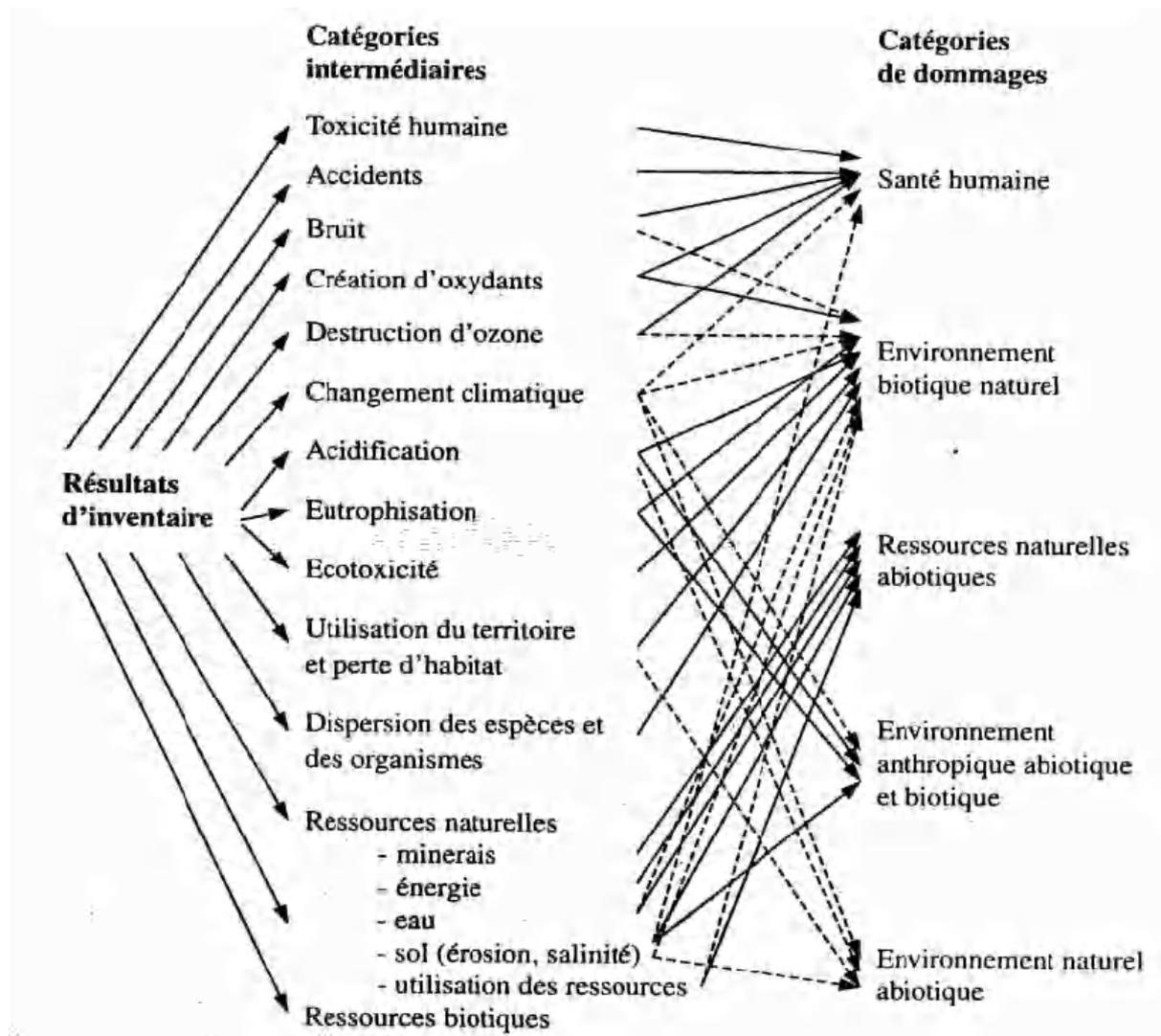


Figure III.4 : Structure générale des catégories d'évaluation des impacts environnementaux [164].

III.2.6 Avantages et inconvénients

La réalisation d'une analyse de cycle de vie vise principalement à obtenir une vision globale de l'impact environnemental d'une filière. Elle permet d'anticiper la répartition des polluants, d'identifier le type prédominant d'impact environnemental dans la création d'un produit et de déterminer les étapes (production, utilisation, élimination) ou les composants spécifiques du produit ayant le plus d'impact environnemental. Cette approche est réalisée de manière exhaustive et documentée. De plus, elle offre une perspective holistique sur les divers types d'impacts plutôt que de se limiter à une catégorie particulière.

L'analyse de cycle de vie se révèle être un outil précieux pour prendre des décisions à différentes échelles, aussi bien à un niveau global (comme l'adoption de politiques environnementales ou

l'intérêt du recyclage de certains produits) qu'à un niveau local (comme le choix de conception et de production d'un produit).

Cependant, plusieurs obstacles limitent l'universalité de cette méthode. La collecte exhaustive des flux utilisés dans la fabrication d'un produit est quasiment impossible, conduisant parfois à l'utilisation de données limitées ou génériques, manquant de précision.

Les logiciels actuels d'analyse de cycle de vie régionalisent généralement les processus, bien que les impacts soient géographiquement indifférenciés. Ces logiciels présentent souvent plusieurs instances pour un même processus, en fonction du lieu d'utilisation. Malgré cela, toutes les régions du monde ne sont pas toujours représentées pour un même type de processus, rendant difficile, voire impossible, une analyse de cycle de vie prenant pleinement en compte les particularités de chaque pays. Néanmoins, la substitution de processus dans une analyse de cycle de vie reste aisée dans la mesure où les processus requis sont disponibles.

En outre, certains choix méthodologiques demeurent subjectifs, tels que les choix d'imputation et les méthodes de caractérisation des impacts, de normalisation et de pondération le cas échéant. Dans le cadre d'une comparaison, le classement entre plusieurs produits peut s'inverser selon la méthode d'évaluation choisie, principalement au niveau de la caractérisation.[165]

III.2.7 Application de l'ACV dans les matériaux cimentaires

L'ACV a été couramment utilisée pour estimer les impacts des industries d'infrastructure, des industries minières, de la production de matériaux, des activités et de l'exploitation de construction et de la fin de vie. Certaines études récentes ont vérifié les avantages environnementaux associés à l'utilisation de sous-produits et de déchets de C&D comme granulats dans le béton en utilisant une approche ACV [166].

Parmi ces recherches, on peut mentionner l'étude menée par Boubaker et al. [167], qui ont suggéré une approche d'analyse environnementale de toutes les activités d'une entreprise afin de mesurer les conséquences sur l'environnement. Dans cette étude, l'ACV permet de mener une analyse quantitative. Les auteurs étaient particulièrement préoccupés par la diminution et le contrôle des émissions de gaz et de poussières. Les résultats ont démontré que les émissions de CO₂ sont la plus importante, ce qui signifie qu'il est néces-

saire de réduire la part de clinker. Serres et al. [168] se concentrent sur les impacts environnementaux des déchets de béton issus de la démolition dans le contexte de la fabrication d'un nouveau béton. Leurs résultats d'ACV mettent en évidence les avantages de l'utilisation de sable et de graviers recyclés pour réduire les impacts environnementaux. Ils notent également que le micro-béton de brique présente un impact environnemental plus faible par rapport aux autres types de micro-bétons.

Chevalier [169] a exposé les principales applications de l'ACV dans le domaine de la construction, que ce soit pour les produits ou pour les quartiers. Selon lui, l'ACV constitue donc l'un des outils de l'approche du cycle de vie et l'un des fondements du développement durable dans le domaine de la construction. Guo [170] a examiné comment les différents types de moules de corps creux en béton se répartissent en un (1) kg. Il a démontré que l'écotoxicité marine est l'indicateur le plus influent pour tous les types de moules pendant la phase de production.

Khelifa et al. [171] ont étudié les propriétés environnementales et mécaniques de deux bétons fibrés, à savoir les fibres d'Alfa et les fibres de polypropylène. Dans cette étude, la méthode d'ACV a été utilisée, puisque ce procédé est susceptible de quantifier les impacts environnementaux du béton ou de l'industrie de production du béton.

Les résultats ont montré que les fibres d'alfa génèrent moins d'impacts que les fibres de polypropylène.

III.2.8 Application de l'ACV en technique routière

Parmi ces travaux, on peut citer le travail réalisé par To [172] comparant les impacts environnementaux de sept mélanges recyclés avec divers contenus de RAS (résidus d'asphalte stockés) et RAP à la version vierge des mélanges tout au long du cycle de vie, et les résultats ont été présentés dans Tableau III.2. Comme représenté sur le tableau II.32, les avantages de l'utilisation du RAS et du RAP dans le mélange d'asphalte pour la chaussée construction, avec une réduction des émissions de GES allant jusqu'à 16 %. De plus, cette plus grande réduction des pourcentages d'incorporation des deux RAP (20 %) et RAS (7 %).

Tableau III.2 : Résultat ACV [172].

Mélanges d'asphalte	Teneur en RAP (%)	Teneur en RAS (%)	Émissions de GES (pounds/short ton)
HMA 1	0	0	164.5
HMA 2	20	0	155.4
HMA 3	20	3	130.5
HMA 4	20	5	124.1
HMA 5	20	7	117.5
HMA 6	17	3	132.6
HMA 7	0	5	150.3
WMA 1	20	0	155.4

Mroueh et al. [173] ont constaté que l'utilisation de RCP diminuait les charges environnementales de la construction des chaussées par rapport aux granulats naturels.

Chiu et al. [174] effectuent l'ACV pour évaluer l'impact environnemental de la réhabilitation de la chaussée à l'aide de différents matériaux recyclés (l'asphalte à chaud traditionnel, l'asphalte recyclé à chaud, le caoutchouc d'asphalte et le glassphalte). Les résultats montrent que l'asphalte mélangé à chaud peut réduire la charge écologique de 23 % dans les mêmes conditions. L'utilisation de caoutchouc asphaltique augmente la charge écologique de 16 %, alors que la charge écologique reste essentiellement la même (réduite de moins de 1 %) en utilisant Glassphalt.

Mladenovic et al. [175] réalisent une ACV afin de comparer les impacts environnementaux de la construction de parcours d'usure de l'asphalte avec l'utilisation d'agrégats siliceux (le « scénario conventionnel ») et l'utilisation d'agrégats de laitier d'acier alternatifs. Les résultats montrent que l'utilisation de laitier d'acier agrégé (scénario de rechange) entraîne une diminution des impacts sur l'acidification, l'eutrophisation, l'ozone photochimique. La création et la toxicité humaine et, sous conditions, le réchauffement de la planète (en fonction de la distance de livraison du granulat de laitier d'acier). Les impacts du scénario alternatif sont réduits d'environ 20 % par rapport aux impacts du scénario conventionnel.

Tait et Cheung [176]. Réalisé une étude comparative ACV sur plusieurs conceptions de mélanges de béton pour la chaussée : la traditionnelle composée à 100 % de ciment Portland et l'alternative contenant 70 % de substitut du laitier de haut fourneau granulé broyé GGBFS. Les résultats ont montré que le remplacement du GGBFS (laitier granulé de haut-fourneau moulu) pourrait significativement réduire les émissions de GES générées lors de la phase de production du béton, tout en maintenant des performances satisfaisantes. De

plus, en raison des conceptions de mélange de béton permettant un ajout élevé de GGBFS, cela a également indiqué un effet positif substantiel sur la gestion des déchets.

Mroueh et al. [173] ont remplacé les agrégats non liés, tels que la pierre concassée, le gravier et le sable, par du laitier de haut fourneau (BFS) dans les couches de base et de sous-couche. Ils ont constaté que l'utilisation de BFS dans ces applications pourrait réduire la consommation d'énergie ainsi que les émissions atmosphériques, par rapport au scénario traditionnel utilisant des agrégats naturels.

Aux États-Unis, une autre étude similaire sur le mâchefer de charbon (CBA) a été menée par Carpenter et al. [177] cette étude a utilisé le logiciel PaLATE, et CBA a remplacé la roche concassée dans la couche de fondation. Les résultats ont indiqué que le remplacement des agrégats naturels par des CBA permettait de réduire la consommation d'énergie, les émissions de GES, le potentiel d'acidification, l'eutrophisation et la toxicité humaine non cancéreuse. Cependant, il a également augmenté le potentiel de toxicité humaine en raison de la lixiviation des contaminants de l'CBA dans les eaux souterraines. Par conséquent, bien que le mâchefer puisse permettre des économies d'énergie et une réduction des émissions de GES lorsqu'il est réutilisé dans la construction des chaussées d'autoroutes, il pourrait également représenter un risque pour la santé humaine en raison de son potentiel de lessivage.

Chiu et al. [174] réalisent une ACV qui vise à étudier la charge environnementale induite par la réutilisation des déchets de verre, sorte de granulats alternatifs pour réhabiliter la chaussée en asphalte. En considérant une période d'analyse de 40 ans, l'utilisation de déchets de verre a augmenté la charge environnementale de 19 %. Cette augmentation pourrait être attribuée à une durabilité plus faible et à un entretien et à une remise en état plus fréquents des "glasphalte" chaussées. Par conséquent, la production d'un nouveau revêtement HMA nécessitait plus de liant bitumineux et de chaleur pour le mélange, qui étaient les deux principales sources de charges environnementales.

Guignone et al. [178] proposent une technique et une solution durable pour la rénovation du Troisième Pont de Vitoria. Cette étude évalue à la fois les performances techniques et environnementales des éléments en béton, compte tenu de la substitution partielle du ciment avec de la poudre de déchets de verre et du béton conventionnel. Les impacts environnementaux ont été évalués par l'outil d'évaluation du cycle de vie.

Les résultats indiquent que l'incorporation de poudre de verre dans des dalles à âme creuse précontrainte comme un remplacement partiel de ciment peut améliorer la durabilité des

propriétés et atténuer l'impact environnemental. Il montre également que la phase de fabrication est la plus percutante et que la poudre de verre peut réduire considérablement l'impact de l'entretien.

Sudrano et al. [179] réalisent une ACV de la mise en œuvre de la couche de fondation supérieure (couche de base) avec l'ancienne chaussée asphaltée en agrégat de ciment. Le but de cette étude était de déterminer la quantité d'énergie consommée et de déterminer la quantité d'émissions (CO₂) dans la mise en œuvre de la couche de fondation (couche de base) avec l'ancienne chaussée asphaltée (recyclage Base traitée au ciment (CTRB)).

Les résultats ont montré que la consommation d'énergie dans la mise en œuvre du recyclage des chaussées (CTRB) est de 225,46 MJ/km de voirie et les émissions de GES qui en résultent 17,43Ton CO₂/km de voirie.

Les recherches précédentes ont estimé que la consommation d'énergie pour les travaux routiers utilisant des méthodes conventionnelles (Hotmix) est de 383,46 MJ par kilomètre de route, avec des émissions de GES associées de 28,24 tonnes de CO₂ par kilomètre. Si une différence est calculée entre les méthodes conventionnelles et le CTRB (Cement Treated Base), une comparaison peut alors être réalisée, la consommation d'énergie du CTRB est de 158 MJ/km de route, cela se produit 70,07 % d'économies et d'émissions de GES, la différence résultante est de 10,81 tonnes de CO₂ / km de route, soit une diminution de 62,02%.

Masi et al [180] ont montré que l'incorporation de 40 % RAP dans la production de béton a conduit à un effet bénéfique en termes d'impacts environnementaux, avec une réduction significative (valeur moyenne de 15 %) dans des catégories telles que le potentiel de réchauffement climatique, l'écotoxicité terrestre, le caractère non cancérigène pour l'homme. Toxicité et rareté des ressources fossiles.

Singh et coll. [181] ont démontré que l'utilisation de RAP pouvait réduire les coûts ainsi que les émissions de gaz à effet de serre, en permettant la production d'un mètre cube de mélange DLC avec des réductions d'environ 8 % et 34 % respectivement.

Shi et coll. [182] ont conclu que l'utilisation des chaussées RAP-PCC apporte plusieurs avantages environnementaux et économiques tels que la consommation de granulats vierges, moins de RAP transporté vers la décharge, la consommation de matériaux, moins de CO₂ produit, moins d'émissions de gaz à effet de serre, réduction de la toxicité, etc.

De même, d'autres chercheurs révèlent qu'en utilisant le RAP comme granulats recyclés dans les routes en béton à faible et grand volume, on obtient une réduction drastique d'environ 42 % des gaz à effet de serre (GES) et une consommation d'énergie minimisée sur 30 ans [183] [139].

L'application de différents déchets et l'analyse de leur durée de vie dans les chaussées rigides ont été résumées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Résultat ACV

Auteurs	Déchets	Remplacement	Outil utilisé	Des économies (%)
Aurangzeb et al. [184]	RAP	NA	Real cost 2.5	40
Yang et al. [185]	RAS	NA	PaLATE	30
Lie et al. [186]	Cendre de charbon	NA	Real cost 2.5	60
Sayagh et al. [187]	Laitier de haut fourneau	NA	PaLATE	65
Shi et al. [188]	RAC	NA	EIO LCA	30

III.3 Conclusion partielle

L'évaluation environnementale des déchets, réalisée au moyen d'outils d'ACV, représente une étape essentielle dans la gestion durable des ressources et la promotion du développement durable. Grâce à ces logiciels spécialisés, il est possible de modéliser et d'analyser de manière exhaustive les flux de matières et d'énergie associés à un produit ou à un système, permettant ainsi d'estimer précisément leurs impacts environnementaux.

En effet, les logiciels d'ACV offrent la possibilité de quantifier et de comparer les consommations de ressources ainsi que les émissions de polluants générées par différentes options de gestion des déchets. Cette approche permet de prendre des décisions éclairées en matière de sélection des matériaux et de conception des infrastructures, en privilégiant les solutions les plus respectueuses de l'environnement.

Ainsi, l'utilisation de l'ACV dans l'évaluation environnementale des déchets offre une opportunité précieuse d'orienter les pratiques de construction routière vers des solutions plus

durables. En fournissant des données tangibles sur les impacts environnementaux des différentes options disponibles, ces outils contribuent à promouvoir une gestion efficace des ressources et à favoriser la transition vers une économie circulaire et respectueuse de l'environnement.

Synthèse bibliographique

L'intégration des granulats recyclés (RAB, RAC et RAP) dans les matériaux cimentaires constitue une réponse significative aux défis environnementaux et économiques rencontrés dans le domaine de la construction routière. Cette démarche s'inscrit dans une vision globale de développement durable, visant à réduire l'accumulation de déchets, à préserver les ressources naturelles et à minimiser l'empreinte carbone des infrastructures.

Dans le chapitre I, nous avons exploré les considérations techniques de l'utilisation des matériaux et déchets dans les techniques routières. Nous avons souligné la nécessité de substituer les matériaux naturels par des déchets industriels ou de démolition, tout en examinant les normes et les réglementations associées à cette pratique. Cette compréhension approfondie a jeté les bases de notre étude, en nous préparant à explorer les performances des MGTLH dans les projets de construction routière.

Dans le chapitre II, nous nous sommes penchés sur l'emploi spécifique des granulats recyclés (RAB, RAC et RAP) dans les MGTLH, en examinant leurs effets sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires. Nous avons constaté que bien que ces granulats offrent des avantages potentiels en termes de durabilité environnementale, leur utilisation nécessite une évaluation minutieuse en raison de résultats variables. De plus, nous avons relevé le manque de recherches sur l'incorporation de ces déchets dans les couches de base et de fondation des routes, ce qui motive notre plan expérimental à suivre.

Dans le chapitre III, nous avons abordé l'évaluation environnementale des matériaux cimentaires, en mettant en évidence l'importance de l'ACV pour évaluer l'impact environnemental des déchets utilisés dans la construction routière. Nous avons souligné le rôle crucial des logiciels d'ACV dans la modélisation et l'analyse des flux de matières et d'énergie, permettant ainsi de quantifier et de comparer les impacts environnementaux des différentes options de gestion des déchets. Cette approche offre une perspective prometteuse pour orienter les pratiques de construction vers des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement.

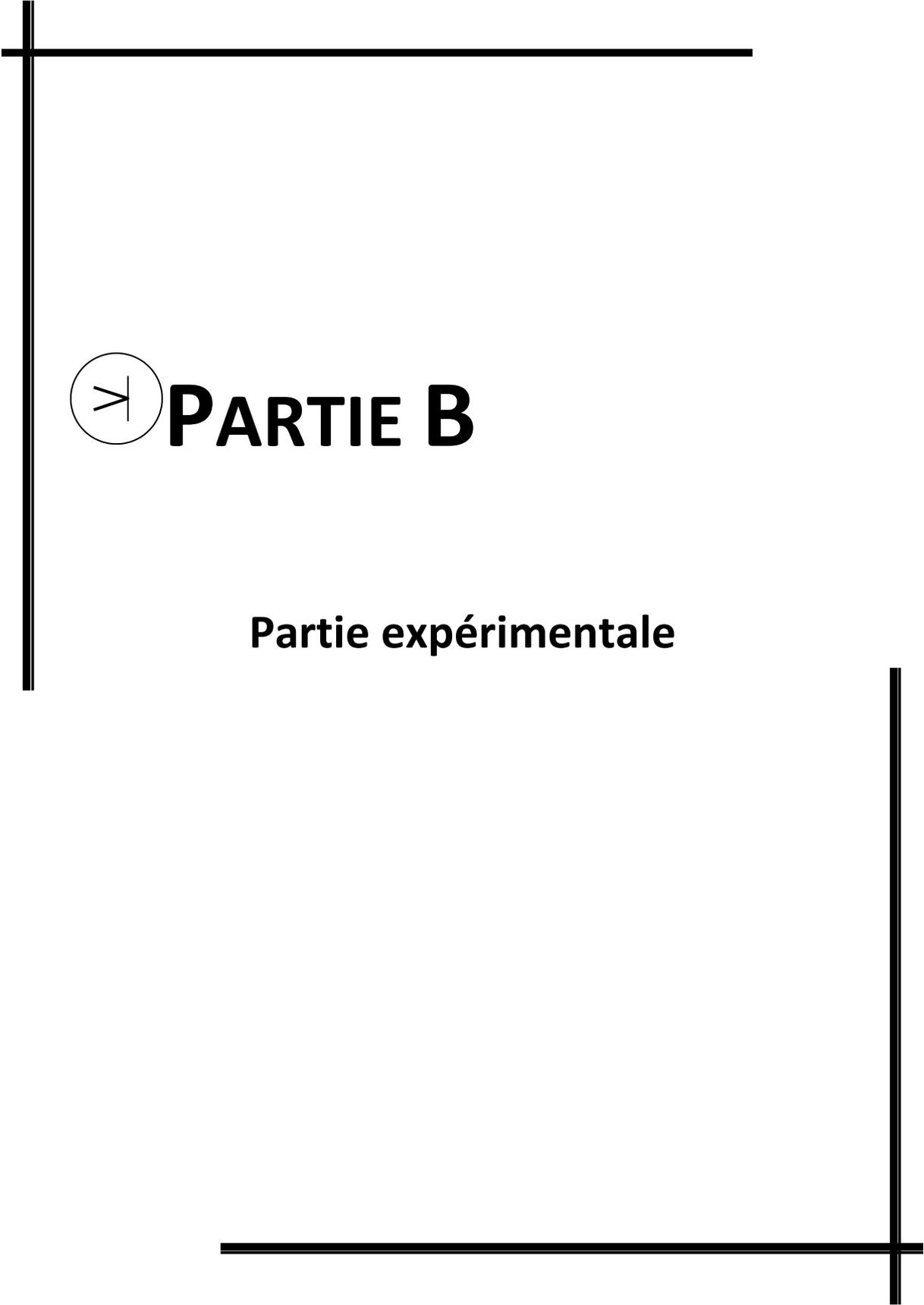
D'après l'analyse documentaire effectuée, il apparaît que toutes les études expérimentales se sont jusqu'à présent penchées soit sur l'effet des RAB, RAC et RAP, soit sur l'analyse

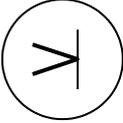
du cycle de vie ; il n'y a aucune étude comparable examinant la combinaison d'approches expérimentales et d'études environnementales pour ces matériaux. Par conséquent, notre recherche portera sur l'influence de ces matériaux sur les propriétés mécaniques, la durabilité et la propriété environnementale des GC.

De manière générale, l'étude bibliographique a mis en évidence les constatations suivantes:

- La plupart des études ont montré que le granulat de RAB présente une grande capacité d'absorption d'eau, faible densité et grande porosité qui affectent négativement la propriété mécanique des matériaux cimentaires.
- La composition chimique du RAB se caractérise par la présence des principaux oxydes suivants : la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et la ferrite (Fe_2O_3). Ces oxydes assurent l'action pouzzolanique entre la silice et les produits d'hydratation du ciment. Cela conduit à la formation de produits additionnels, renforçant ainsi le matériau cimentaire.
- La présence d'anciens mortiers qui adhèrent à la surface des particules RAC est la principale cause de la différence de propriétés du RAC par rapport aux NA. Ce mortier a un impact négatif sur les caractéristiques RAC, comme une densité plus faible, une absorption d'eau plus élevée et une abrasion plus élevée de Los Angeles. La réduction de la quantité de mortier associée aux RAC est l'un des moyens d'améliorer leurs propriétés.
- L'influence de RAC sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires dépend de l'origine de ces granulats.
- La présence de bitume attaché aux granulats compromet les caractéristiques physiques et mécaniques des RAP.
- Les granulats de RAP se différencient des granulats naturels en raison de la présence de la gangue de bitume qui demeure attachée aux granulats naturels suite au fraisage de la chaussée en béton bitumineux. Cette quantité de bitume pourrait compromettre les performances du matériau cimentaire.
- Les études d'ACV ont montré que l'utilisation de granulats recyclés plutôt que de granulats naturels peut réduire l'impact environnemental de diverses applications de construction et d'infrastructure.
- Les granulats recyclés peuvent offrir plusieurs avantages environnementaux.

En conclusion, cette synthèse bibliographique met en évidence les avancées significatives réalisées dans le domaine de l'utilisation des granulats recyclés dans les matériaux cimentaires, tout en soulignant les défis persistants et les perspectives d'avenir pour une construction routière plus durable et écologique.



 **PARTIE B**

Partie expérimentale

IV. Chapitre VI MATERIAUX ET ESSAIS

Ce chapitre se concentre sur les fondements de la fabrication des graves cimentées (GC), en mettant en lumière les matériaux utilisés et leurs caractéristiques essentielles. Nous débuterons par une exposition détaillée des différents composants employés dans la confection des GC, en analysant leurs propriétés spécifiques. Ensuite, nous explorerons les processus de formulation des mélanges de GC, mettant en évidence les méthodes et les principes directeurs qui sous-tendent cette étape cruciale. Dans une deuxième partie, nous aborderons les méthodes expérimentales de fabrication des GC, en décrivant les étapes de malaxage, de mise en place et de conservation des échantillons. Cette section fournira un aperçu complet des pratiques de laboratoire utilisées pour préparer les différents types de GC, garantissant ainsi la reproductibilité et la fiabilité des résultats obtenus. Enfin, nous conclurons en exposant les essais effectués en laboratoire sur les GC à l'état frais et durci. Ces tests sont essentiels pour évaluer les propriétés mécaniques, la durabilité et les performances globales des GC, fournissant ainsi des informations précieuses pour orienter nos analyses et nos recommandations ultérieures.

Sommaire partiel

<u>IV.1</u>	<u>Identification des matériaux utilisés</u>	106
IV.1.1	<u>Ciment</u>	106
IV.1.2	<u>Granulats</u>	106
<u>IV.2</u>	<u>Etude de formulation des GC</u>	114
IV.2.1	<u>Plan d'essais du mélange</u>	115
IV.2.2	<u>Formulation des mélanges</u>	116
IV.2.3	<u>Conception des mélanges</u>	119
IV.2.4	<u>Procédure de malaxage et cure</u>	119
<u>IV.3</u>	<u>Cadre normatif du plan expérimental</u>	121
IV.3.1	<u>Essais effectués sur les GC à l'état frais</u>	121
IV.3.2	<u>Essais effectués sur les GC à l'état durci</u>	122
<u>IV.4</u>	<u>Variables étudiées</u>	129
<u>IV.5</u>	<u>Conclusion</u>	131

IV.1 Identification des matériaux utilisés

IV.1.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland (CEM II-42.5 N), qui est conforme à la norme EN 197-1 2000 [189]. Sa surface spécifique est de 3100 kg/m^3 , sa densité est de 3.13. La composition chimique a été caractérisée par fluorescence X (XRF) comme indiqué dans la figure IV.1.

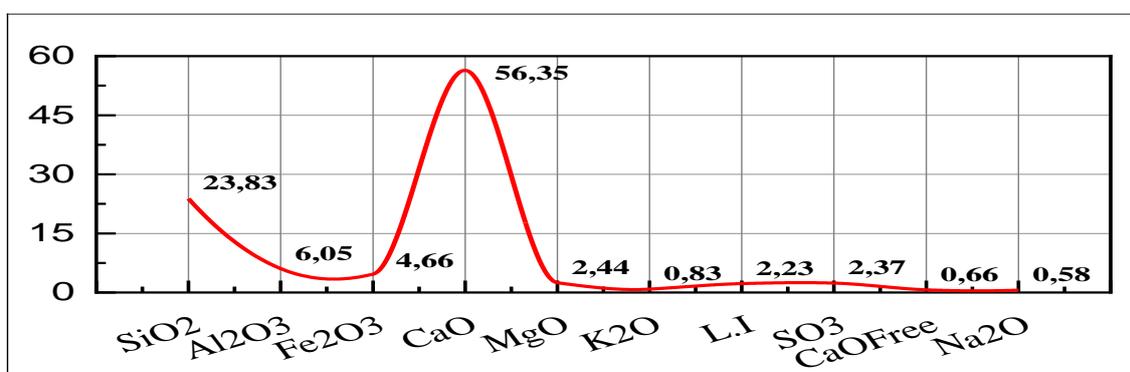


Figure IV.1 : Composition chimique de ciment.

Cette figure montre que la composition chimique du ciment utilisé, qui est composé de plusieurs oxydes minéraux, parmi lesquels on retrouve principalement la chaux (CaO), qui a une fonction basique, et la silice (SiO₂), qui a une fonction acide. L'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃) sont également présents.

IV.1.2 Granulats

Dans notre étude, nous avons utilisé quatre types de granulats :

- 1) Granulats naturels (NA) : il est constitué de sable concassé de classe 0/5 et gravier concassé de classe (3/8, 8/15 et 15/20) provenant de carrière EPTRC tamolgha.
- 2) Granulats recyclés de brique (RAB) : il est constitué de sable recyclé de classe 0/5 et gravier recyclé de classe (3/8, 8/15 et 15/20) produit par le concassage de la brique cuite de la briqueterie de Médéa par le concassage à mâchoire.



Figure IV.2 : Déchet de brique.

- 3) Granulats recyclés de béton (RAC) : il est constitué de sable recyclé de classe 0/5 et gravier recyclé de classe (3/8, 8/15 et 15/20) produit par le concassage des éprouvettes de béton autoplaçant fabriqué en laboratoire de Médéa par le concassage à mâchoire.
- 4) Granulats recyclés de fraisât routière (RAP) : il est constitué de sable recyclé de classe 0/5 et gravier recyclé de classe (3/8, 8/15 et 15/20) produit par le fraisage de la route nationale N° 01 de Médéa, il a été tamisé sur des tamis 0/20.



Figure IV.3 : Déchet fraisât routière.

Les granulats utilisés doivent respecter les critères indiqués dans le guide « ASSISES DE CHAUSSEES », LCPC SETRA, décembre 1994. Les normes des granulats utilisés sont indiquées dans le tableau IV-1.

Tableau IV.1 : Exigences normatives pour les granulats (XP P18 545).

AFNOR	Nature des essais	Signe	Valeur exigée
EN 1097-6	Granulats – Mesure des masses volumiques, du coefficient d'absorption d'eau.	/	/
EN 933-1	Granulats – Analyse granulométrique par tamisage	/	/
EN 1097-2	Granulats – Essai Los Angeles (une compensation de 5, avec MDE est tolérée)	LA	≤ 30
EN 1097-1	Granulats – Essai micro-Deval	MDE	≤ 25
EN 933-3	Granulats – Coefficient d'aplatissement	FL	$\leq 35\%$
EN 933-8	Granulats – Equivalent de sable.	SE	$\geq 50\%$
EN 933-9	Granulats – Partie 9 : Bleu de méthylène.	MB	≤ 2.5

Les caractéristiques physiques des sables utilisés sont résumées dans le tableau IV.2.

Les valeurs moyennes de la masse volumique apparente montrent que le sable concassé a une densité plus élevée, tandis que le sable de RAB présente une densité moindre par rapport à d'autres types de sable. Les valeurs des modules de finesse indiquent que les sables recyclés sont plus fins que le sable concassé et les valeurs de l'équivalent de sable démontrent que les sables utilisés sont propres.

Tableau IV.2 : Propriétés physiques d'identification des sables utilisés.

Caractéristiques	Type de sable			
	NA	RAB	RAC	RAP
Provenances	NA	RAB	RAC	RAP
Module de finesse	3.04	2.63	2.69	2.85
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.69	2.34	2.43	1.78
Masse volumique apparent (g/cm ³)	1.57	1.073	1.28	1.17
ES (%)	78	69.11	78	75
MB	0.5	0.5	0.25	0.25
Coefficient d'absorption d'eau (%)	3.5	18.2	14.27	0.91
Compacité (%)	57	46	52.44	66.03
Porosité (%)	43	54	47.56	33.97
% de fins		18	10.6	

La figure IV.2 présente l'analyse granulométrique effectuée sur les sables utilisés et montre qu'ils sont des sables relativement grossiers présentant une granulométrie étalée.

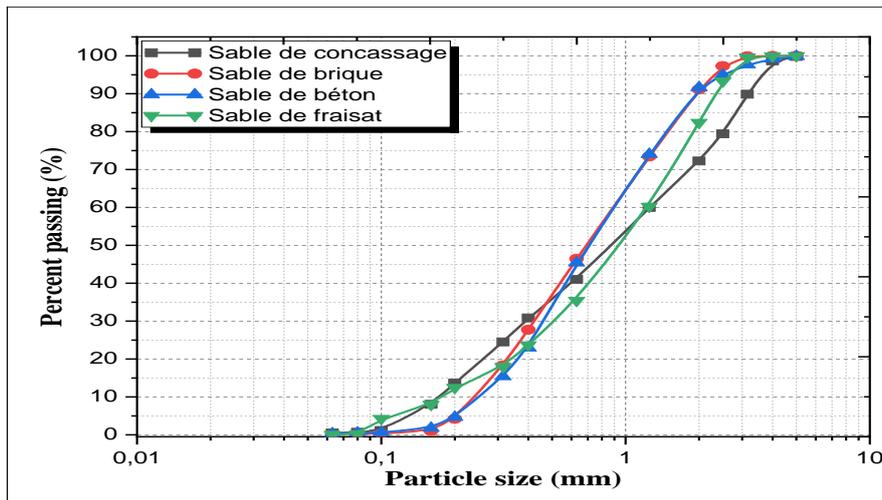


Figure IV.4 : Courbes granulométriques des sables utilisés.

La Figure IV.5 présente les résultats de l'observation par microscope électronique à balayage (MEB) des sables utilisés. Les grains de sable de brique ont une forme arrondie, tandis que ceux du sable concassé et du sable de béton sont angulaires et présentent une surface rugueuse. Morphologiquement, les grains de sable de fraisât sont une accumulation de plusieurs grains de sable ordinaires, liés entre eux par le bitume.

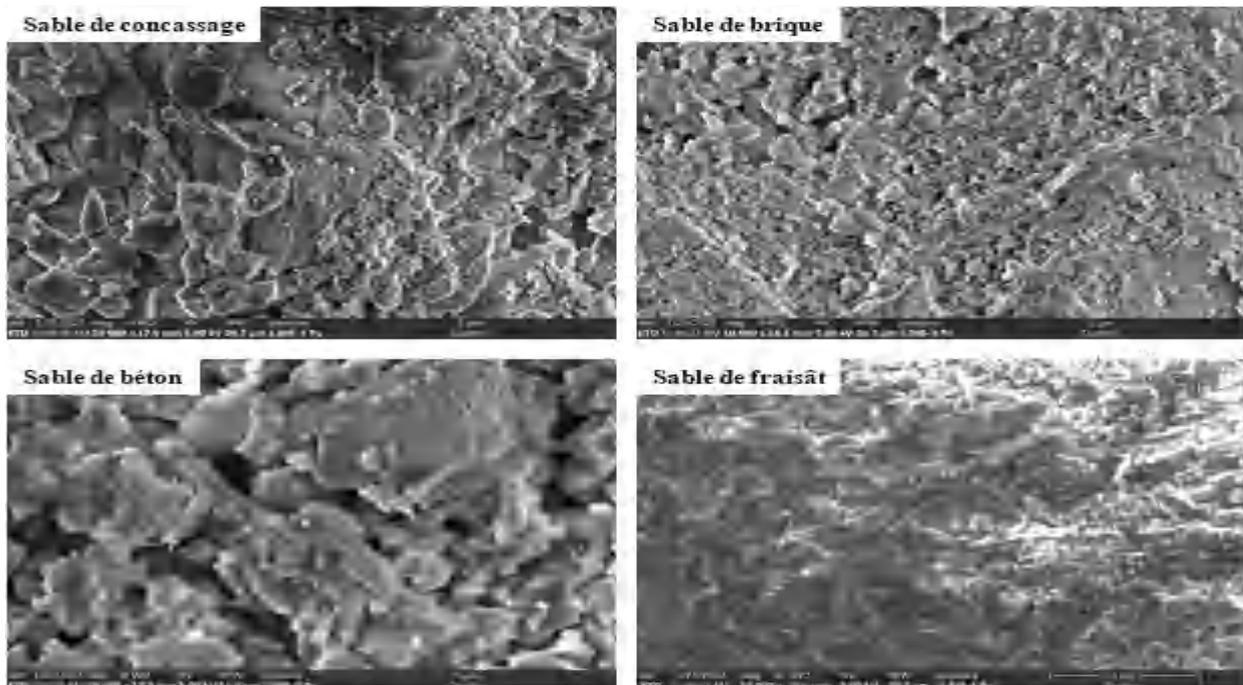


Figure IV.5 : Photo MEB des sables utilisés.

Les caractéristiques physiques des graviers de classe (3/8) et les courbes de l'analyse granulométrique sont présentes également dans le tableau IV.3 et la figure IV.6 respectivement.

Tableau IV.3 : Propriétés physiques d'identification des graviers (3/8) utilisés.

Caractéristiques	Type de gravier			
	NA	RAB	RAC	RAP
Provenances	NA	RAB	RAC	RAP
Class granulaire	3/8	3/8	3/8	3/8
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.59	2.28	2.75	2.43
Masse volumique apparent (g/cm ³)	1.39	0.93	1.11	1.23
LA (%)	32.2	34.2	35	33
MDE (%)	22	10	29.8	4
FL (%)	28	19.4	11.55	9.02
Coefficient d'absorption d'eau (%)	2	16.8	6.98	1.12
Compacité (%)	52	41	41	50.5
Porosité (%)	48	59	59	49.5

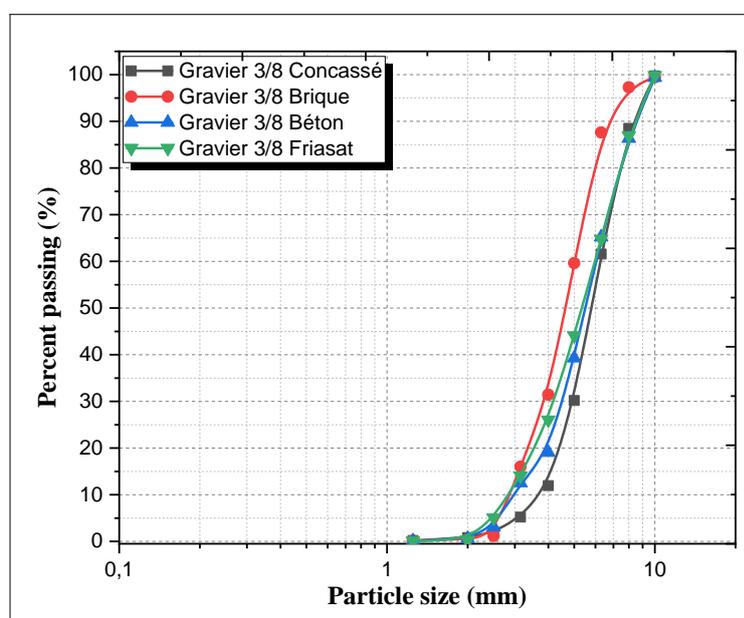


Figure IV.6 : Courbes granulométriques des graviers 3/8 utilisées.

Les caractéristiques physiques des graviers de classe (8/15) et les courbes de l'analyse granulométrique sont présentes également dans le tableau IV.4 et la figure IV.7 respectivement.

Tableau IV.4 : Propriétés physiques d'identification des graviers classe (8/15) utilisés.

Caractéristiques	Type de gravier			
	NA	RAB	RAC	RAP
Provenances	NA	RAB	RAC	RAP
Class granulaire	8/15	8/15	8/15	8/15

Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.61	2.15	2.15	2.34
Masse volumique apparent (g/cm ³)	1.38	1	1	1.10
LA (%)	26	23.7	26.23	28.56
MDE (%)	15	12	27	8
FL (%)	19.3	8.0	1.18	10
Coefficient d'absorption d'eau (%)	1	14.1	4.29	1.51
Compacité (%)	52	47	46	53
Porosité (%)	48	53	54	47

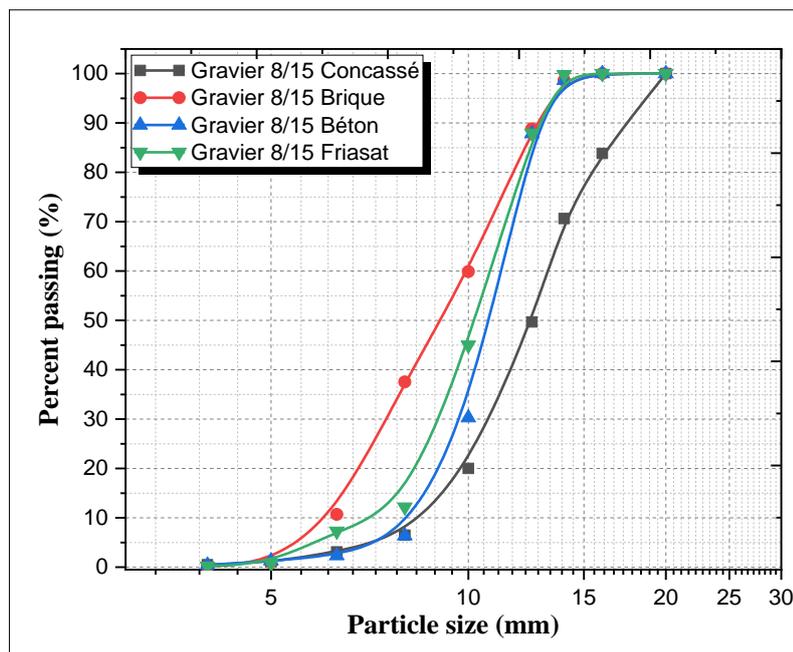


Figure IV.7 : Courbes granulométriques des graviers 8/15 utilisées.

Les caractéristiques physiques des graviers de classe (15/20) et les courbes de l'analyse granulométrique sont présentes également dans le tableau IV.5 et la figure IV.8 respectivement.

Tableau IV.5 : Propriétés physiques d'identification des graviers classe (15/20) utilisés.

Caractéristiques	Type de gravier			
	NA	RAB	RAC	RAP
Provenances	NA	RAB	RAC	RAP
Class granulaire	15/20	15/20	15/20	15/20
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.65	2.00	2.55	2.25

Masse volumique apparent (g/cm ³)	1.43	0.98	1.18	1
LA (%)	28.4	30.2	23.57	22.58
MDE (%)	/	/	/	/
FL (%)	13.3	13.60	3.34	14.16
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.5	10.21	4.02	1.36
Compacité (%)	54	49	46	55
Porosité (%)	46	51	54	45

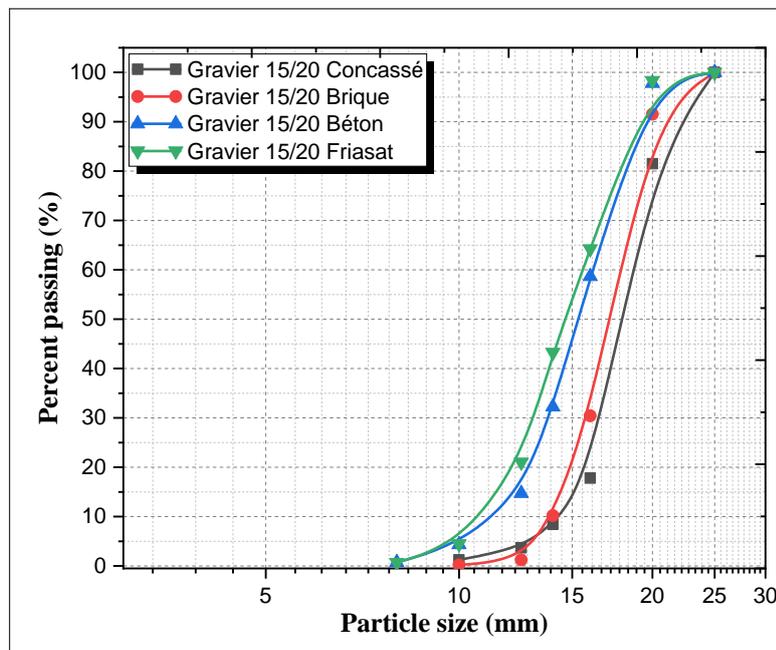


Figure IV.8 : Courbes granulométriques des graviers 15/20 utilisées.

La composition chimique des granulats utilisés a été caractérisée par fluorescence X (XRF) comme indiqué dans la figure IV.9.

Les analyses révèlent que le sable concassé (NA) est caractérisé par une forte teneur en chaux (CaO). Quant aux sables recyclés (RAC et RAP), la chaux (CaO) constitue l'élément prédominant dans leur composition chimique, accompagnée d'un faible pourcentage de silice (SiO₂). En revanche, le sable recyclé (RAB) est principalement riche en silice (SiO₂), avec des proportions variables mais moindres de chaux (CaO), d'alumine (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃).

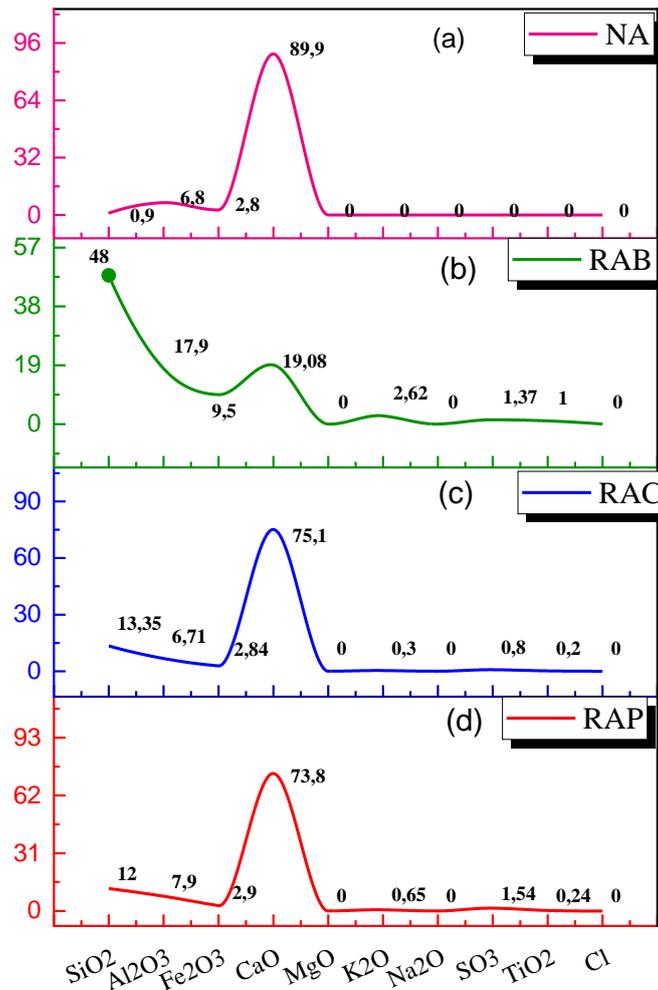


Figure IV.9 : Composition chimique des granulats par FRX.

La Figure IV.10 présente les résultats de l'observation par microscope électronique à balayage (MEB) des graviers utilisés.

Morphologiquement, le gravier concassé et le RAC sont angulaires et présentent une surface rugueuse, tandis que le gravier de brique a une forme arrondie. De plus, le gravier recyclé de RAP est également constitué de l'assemblage de plusieurs grains de gravier ordinaires.

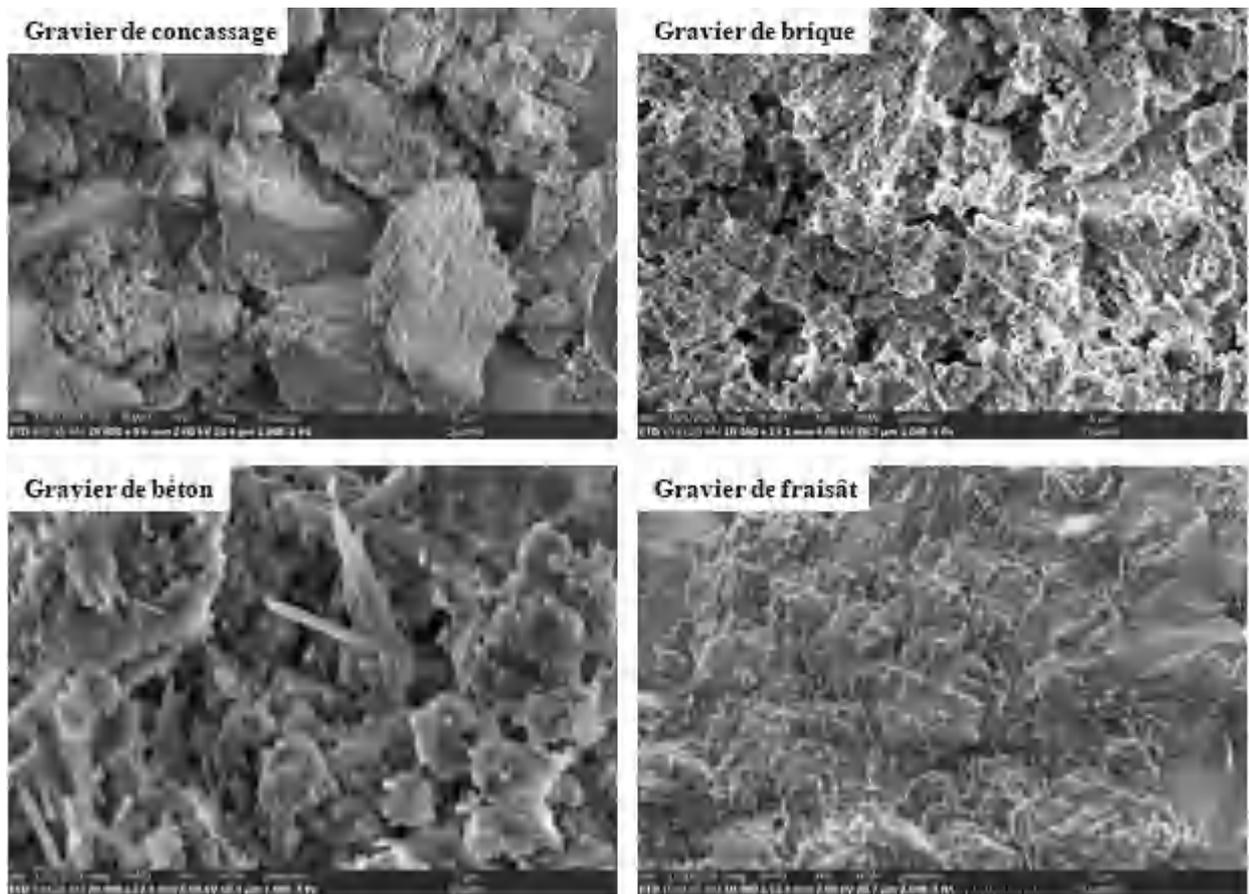


Figure IV.10 : Photo MEB des graviers utilisés.

IV.2 Etude de formulation des GC

L'étude de formulation a pour but de définir un mélange dont les performances répondent aux exigences de dimensionnement de la chaussée. Le choix d'une méthode appropriée permet d'avoir des résultats homogènes et prévisibles. Nous avons choisi de suivre les prescriptions adoptées par les normes EN 14-247 et NFP 98-114-2. La méthodologie est basée sur le respect de diverses spécifications (densité du mélange, définition du fuseau granulométrique et des dosages en eau, liant, granulats). Les conditions d'obtention des performances mécaniques du matériau visé sont définies par ces dernières et prises en considération lors du dimensionnement. Il est essentiel de les respecter rigoureusement sur place (notamment celles concernant la nature du liant).

IV.2.1 Plan d'essais du mélange

La figure IV.11 présente le plan d'essais des mélanges GC.

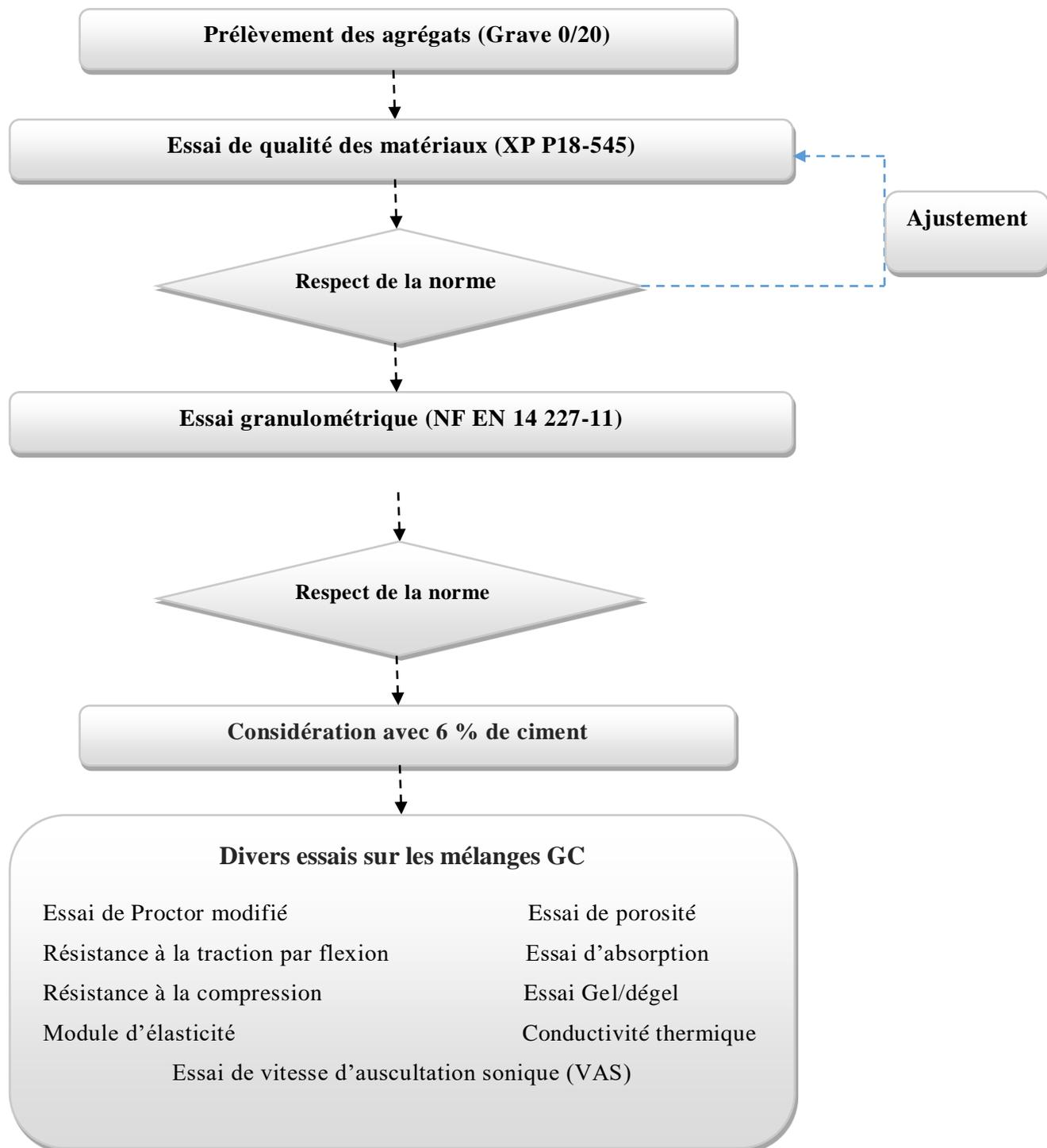


Figure IV.11 : Organigramme des plans des essais de formulation du GC.

IV.2.2 Formulation des mélanges

IV.2.2.1 Dosage de ciment

Le dosage de ciment est fixé à 6 % qui vérifie le seuil acceptable des performances physiques et mécaniques stipulées par les normes (NF EN 14 227-11) [190].

IV.2.2.2 La granularité du mélange

La granularité du mélange reconstitué doit être conforme au fuseau de la figure IV.12.

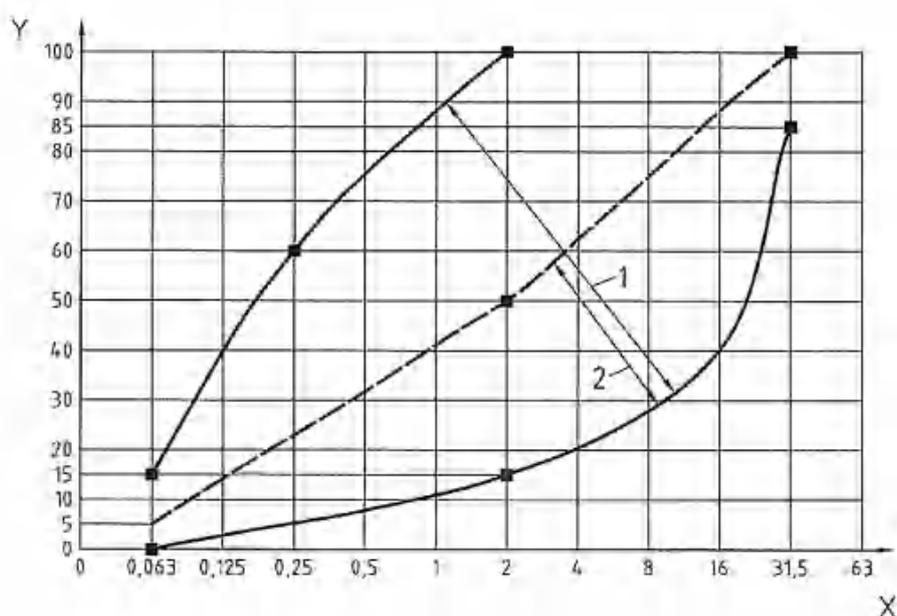


Figure IV.12 : Spécification normative (NF EN 14227-1) [190].

Pour constituer la courbe médiane. Chaque fraction doit avoir un poids bien déterminé. Le résultat de calcul de son poids (pour 1 tonne) est présenté dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Reconstitution granulaire de la grave classe (0/20) utilisée.

Fraction (mm)	Quantité (%)
0/3	44
3/8	20
8/15	17
15/20	19

Une fois reconstitué le mélange. Nous avons réalisé une analyse granulométrique pour confirmer le calcul et puis pour vérifier que la courbe de l'analyse s'insère dans le fuseau de spécification de la norme (NF EN 13285).

La courbe de l'analyse granulométrique des mélanges est représentée dans les figures IV.13, V.14 et V.15.

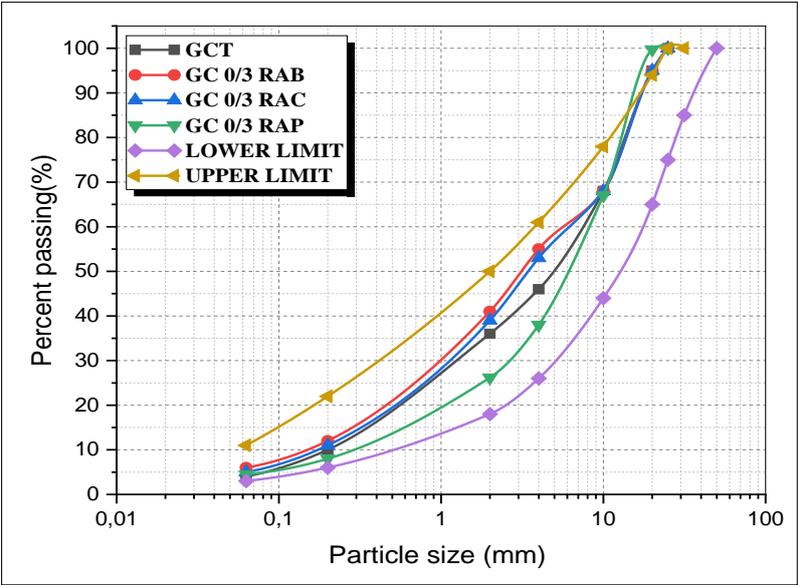


Figure IV.13 : Courbes granulométriques des mélanges (sables variables).

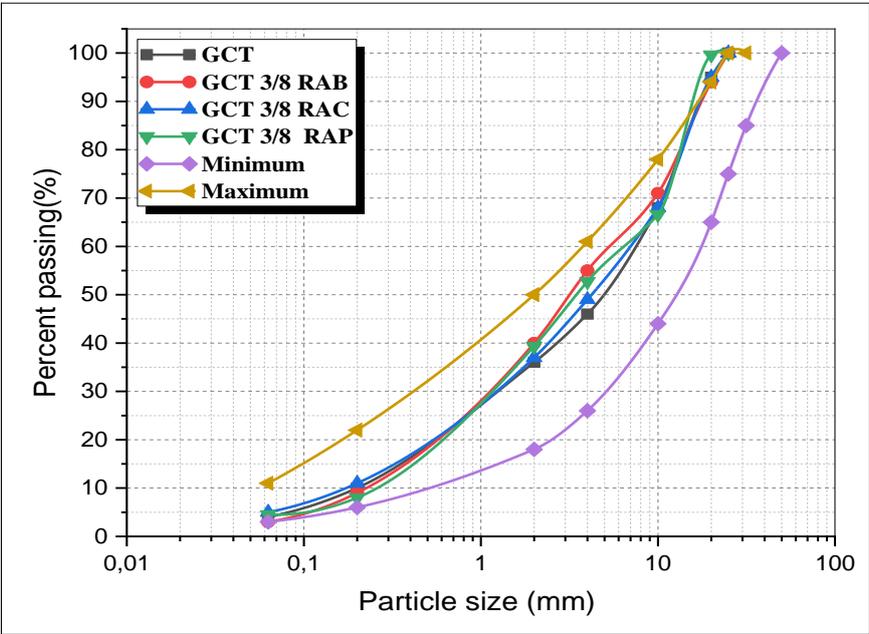


Figure IV.14 : Courbes granulométriques des mélanges (gravier 3/8 variable).

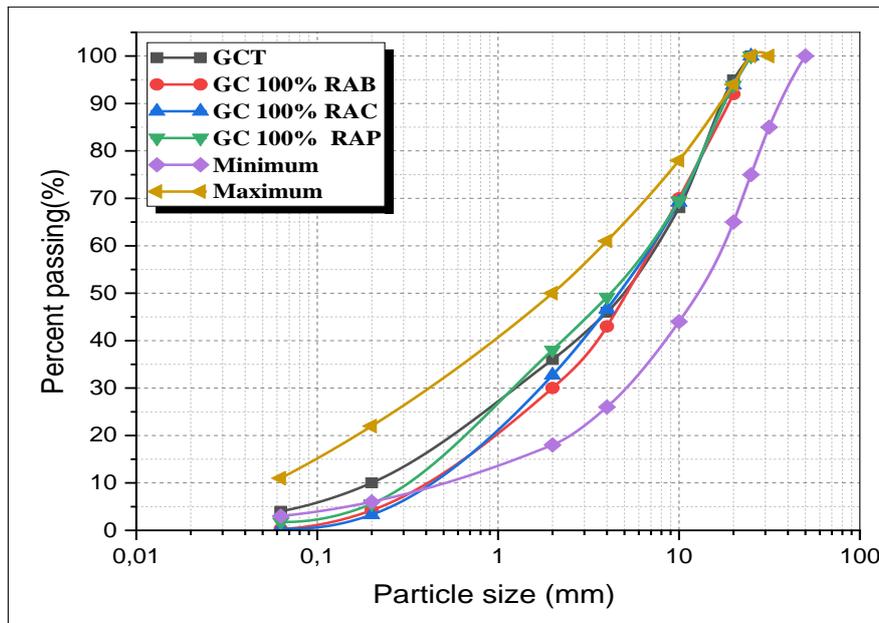


Figure IV.15 : Courbes granulométriques des mélanges recyclés.

On remarque que les fuseaux granulométriques des GC utilisés sont inclus dans le fuseau de spécification normatif.

IV.2.2.3 Eau

La quantité d'eau nécessaire pour chaque mélange est optimisée d'après l'essai de Proctor modifié de chaque mélange comme représenté dans le tableau IV.7 :

Tableau IV.7 : Quantité d'eau nécessaire pour chaque mélange.

Mélange	La teneur en eau optimale (%)
GCT	6
GCT 0/3RAB	9
GC 0/3RAC	8
GC 0/3RAP	5
GC 3/8RAB	7.5
GC 3/8RAC	7
GC 3/8RAP	5.5
GC 100%RAB	14.5
GC 100%RAC	11
GC 100%RAP	6.5

IV.2.3 Conception des mélanges

Plusieurs mélanges sont formulés (Tableau IV.8) dont les variables sont : 1) l'origine et la granulométrie des granulats. Le pourcentage de ciment est fixé 6 %. L'objectif sera de vérifier également l'effet de la nature et de la granulométrie des granulats sur les performances physiques, mécaniques et environnementales.

Tableau IV.8 : Reconstitution granulaire des mélanges.

Code du mélange	NA				RAB				RAC				RAP			
	0/3	3/8	8/15	15/20	0/3	3/8	8/15	15/20	0/3	3/8	8/15	15/20	0/3	3/8	8/15	15/20
GCT	x	x	x	x												
GC0/3RAB		x	x	x	x											
GC0/3RAC		x	x	x					x							
GC0/3RAP		x	x	x									X			
GC3/8RAB	x		x	x		x										
GC3/8RAC	x		x	x						x						
GC3/8RAP	x		x	x										x		
GC100%RAB					x	x	x	x								
GC100%RAC									x	x	x	x				
GC100%RAP													X	x	x	x

IV.2.4 Procédure de malaxage et cure

L'importance de la séquence de malaxage et de la composition du GC réside dans leur capacité à assurer une hydratation correcte, ce qui entraîne un grave ciment performant et durable. Les mélanges ont été réalisés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres. Selon les caractéristiques désirées et les composants du GC, les auteurs ont suivi plusieurs séquences. Dans notre cas, la séquence suivie correspond à celle décrite dans la figure IV.16 et elle comprend les étapes suivantes :

- Malaxer les granulats (sable et gravier) pendant 1 minute pour homogénéiser le mélange.
- Après 30 secondes de repos, ajouter le ciment et mélanger pendant 1 minute.
- Ajouter l'eau pendant 1 minute.
- Arrêter le malaxeur pendant 30 secondes.

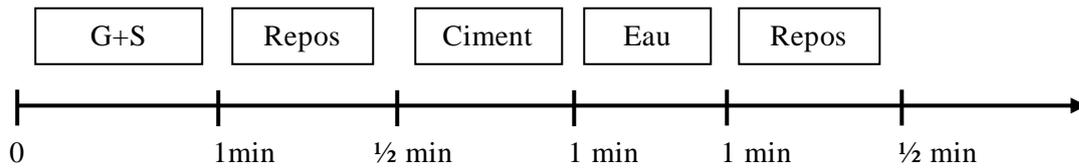


Figure IV.16 : Séquence de malaxage du GC [16]

La réalisation des corps d'épreuve (éprouvettes cubiques et prismatiques), conformément aux normes EN 13286-50 à EN 13286-53. Les mélanges sont gâchés dans un malaxeur approprié. Les éprouvettes sont moulées par vibro compression (EN13286-52), comme le montre la figure IV.17, cette méthode comprend les étapes suivantes :

- Placer le moule sur la table vibrante.
- Placer une quantité connue (la moitié du volume du moule) de grave ciment frais dans le moule avec piquage.
- Placer un poids de 10 kg dans le moule.
- Activez la table vibrante pendant une durée de 1 minute.
- Placer la deuxième quantité de grave ciment dans le moule avec piquage.
- Placer un poids de 10 kg dans le moule.
- Activez la table vibrante pendant une durée de 1 minute.
- À la fin de la vibration, assurez-vous de bien lisser la surface supérieure du moule.



Figure IV.17 : Confection des éprouvettes des GC.

La mise en cure des éprouvettes, qui seront conservées jusqu'à l'échéance des essais à une température de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, dans des moules, en atmosphère avec 90 à 100 % d'humidité (figure IV.18).



Figure IV.18 : Conservation des éprouvettes des GC.

IV.3 Cadre normatif du plan expérimental

IV.3.1 Essais effectués sur les GC à l'état frais

IV.3.1.1 Proctor modifié

L'essai Proctor modifié est très important pour avoir la quantité d'eau nécessaire pour faire le compactage de manière adéquate conformément à la norme ASTM [191].



Figure IV.19 : Essai Proctor modifié.

IV.3.2 Essais effectués sur les GC à l'état durci

IV.3.2.1 *Résistance à la compression*

Les mesures de résistance à la compression ont été effectuées conformément à la norme européenne EN 196-1 [192] sur des éprouvettes cubiques de dimensions $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Les valeurs obtenues étaient de 7, 28 et 90 jours. Pour réaliser ces mesures, les éprouvettes ont été soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture, en utilisant une presse hydraulique d'une capacité maximale de 2000 KN.



Figure IV.20 : Mesure de la résistance à la compression.

IV.3.2.2 *Résistance à la traction*

La résistance à la traction par flexion a été mesurée à 7, 28 et 90 jours sur des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) conformément à la norme européenne EN 196-1 [192]. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture, en utilisant une presse hydraulique d'une capacité maximale de 2000 KN.



Figure IV.21 : Mesure de la résistance à la traction par flexion.

IV.3.2.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité a été mesuré à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques (16x32 cm) conformément à la norme ASTM C469-14[193].



Figure IV.22 : Mesure du module d'élasticité.

IV.3.2.4 CBR

Le CBR est un essai qui évalue la résistance à la déformation d'un matériau sous des charges spécifiques. Il est souvent utilisé pour évaluer la performance des sous-couches.

Il convient de noter que le CBR est l'une des méthodes de test les plus courantes pour évaluer les granulats destinés aux applications routières. Il fournit des informations sur la résistance du matériau traité au ciment et son aptitude à supporter les charges de circulation. Il donne les

valeurs de capacité portante - la capacité de charge ultime des agrégats d'essai. La méthode de test CBR a été standardisée dans des codes de test tels que (ASTM D1883, 2016) [194].



Figure IV.23 : Mesure de l'indice de CBR.

IV.3.2.5 Vitesse d'auscultation sonore (VAS)

La mesure de la vitesse de propagation des ondes dans le GC est réalisée à l'aide d'un appareil d'auscultation sonore. Cette méthode est conforme à la norme ASTM C597-16 [195]. L'essai a été effectué à 28 jours sur des éprouvettes cubiques de 10x10 x10 cm³.

L'appareil d'auscultation sonore utilise un transducteur émetteur qui est appliqué sur une surface plane de l'échantillon de béton. Ce transducteur génère des impulsions électriques qui traversent le béton. Lorsque ces impulsions rencontrent des interfaces entre les différentes couches ou les défauts présents dans le béton, une partie de l'énergie des ondes est réfléchiée et une autre partie est transmise à travers le matériau.

Un transducteur récepteur est placé à une certaine distance du transducteur émetteur pour recevoir les ondes transmises à travers le béton. En mesurant le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et sa réception, La vitesse de propagation des ondes est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t} \text{ (m/s)}$$

d : Distance entre faces de l'éprouvette ;

t : Temps de propagation d'onde.



Figure IV.24 : Appareil de mesure de la vitesse d'auscultation sonique.

IV.3.2.6 Porosité

Les demi-prismes d'éprouvette $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ ont été choisis pour évaluer la porosité accessible à l'eau après une période de 90 jours, conformément à la norme NF P18-459 [196].

Après avoir été soumis à une imbibition sous vide, l'échantillon est ensuite pesé lorsqu'il est saturé d'eau (M_{eau}) et à l'état sec dans l'air (M_{air}). Ensuite, l'échantillon est séché dans une étuve ventilée à une température de $105 \pm 5 \text{ °C}$ jusqu'à atteindre un poids constant, ce qui correspond à la masse sèche (M_{sec}) (Figure III.25). Le calcul de la porosité est exprimé par l'équation suivante :

$$\text{Porosité (\%)} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} * 100$$

M_{air} : la masse d'éprouvette imbibée pesée dans l'air

M_{sec} : la masse d'éprouvette sèche

M_{eau} : la masse d'éprouvette immergée dans l'eau.



Figure IV.25 : Essai de porosité.

IV.3.2.7 Absorption par immersion

L'absorption par immersion d'un GC fait référence à la capacité d'absorption massique, exprimée par la quantité d'eau absorbée par un échantillon de béton. Selon la norme ASTM C642-06 [197], l'essai implique la mise en place d'éprouvettes prismatiques en GC de dimensions 7x7x28 cm et âgées de 28 jours dans une étuve à 105 ± 5 °C. Ces éprouvettes sont pesées jusqu'à atteindre un poids constant. Ensuite, elles sont totalement immergées dans un bac d'eau pendant 24 heures à une température de 20 ± 2 °C, jusqu'à saturation du matériau (figure IV.26).



Figure IV.26 : Absorption d'eau par immersion.

La formule suivante permet de calculer l'absorption en pourcentage :

$$W (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

M_h : la masse d'éprouvette après 24 h imbibée dans l'eau ;

M_s : la masse d'éprouvette sèche.

IV.3.2.8 Conductivité thermique

La conductivité thermique a été mesurée en utilisant la méthode du fil chaud en accord avec la norme (NF EN 993-15) [198]. L'appareil utilisé pour la mesure est appelé « CT mètre ». Grâce à cette essais, nous pouvons évaluer la conductivité thermique du GC étudié en observant l'évolution de la température à l'aide d'une sonde placée entre deux échantillons superposés (Figure IV.27).



Figure IV.27 : Essai de conductivité thermique par CT mètre.

IV.3.2.9 Résistance à l'abrasion

La mesure de la résistance à l'abrasion des GC étudiés a été réalisée en utilisant l'essai Cantabro [199]. Cet essai vise à évaluer la perte de masse d'une éprouvette cylindrique de dimensions identiques (Diamètre = Hauteur = 100 mm) comme illustré dans la figure IV.28. Les éprouvettes sont soumises à 300 rotations dans un tambour Los Angeles.



Figure IV.28 : Mesure de la résistance à l'abrasion.

IV.3.2.10 Gel/dégel

Des éprouvettes cubiques de $7 \times 7 \times 7$ cm³ ont été utilisées. Après le démoulage, les spécimens ont été conservés dans un bac d'eau pour un durcissement à 20 °C sur une période de 28 jours. Ensuite, les spécimens ont été placés dans un bac à eau avant de commencer

les cycles de gel-dégel. Dans cette étude, la procédure d'essai de congélation et de décongélation était conforme à la norme ASTM C666 [200].



Figure IV.29 : Echantillons pendant les cycles gel-dégel.

Le cycle de gel-dégel est clair dans (Figure IV.30), la durabilité a été calculée à la fin de 300 cycles de gel-dégel (de 18 °C à +9 °C), l'aspect visuel, la perte de poids et la résistance à la compression ont été mesurés.

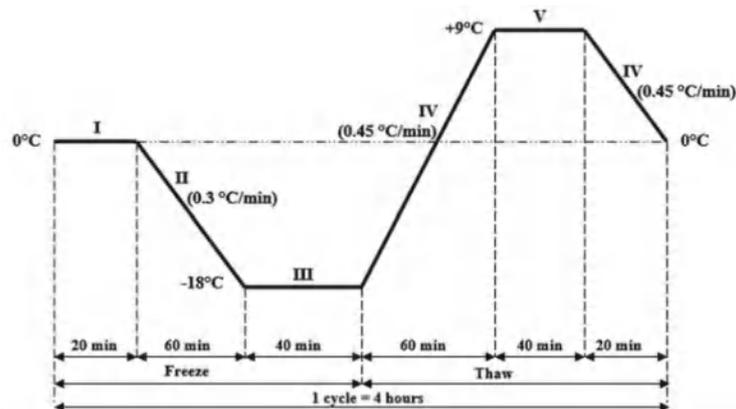


Figure IV.30 : Cycle de température de gel-dégel.

IV.3.2.11 Essais d'analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

Des analyses de microscopie électronique à balayage (MEB) sont effectuées après une période de conservation de 90 jours afin d'examiner les microstructures de certains mélanges durcis.



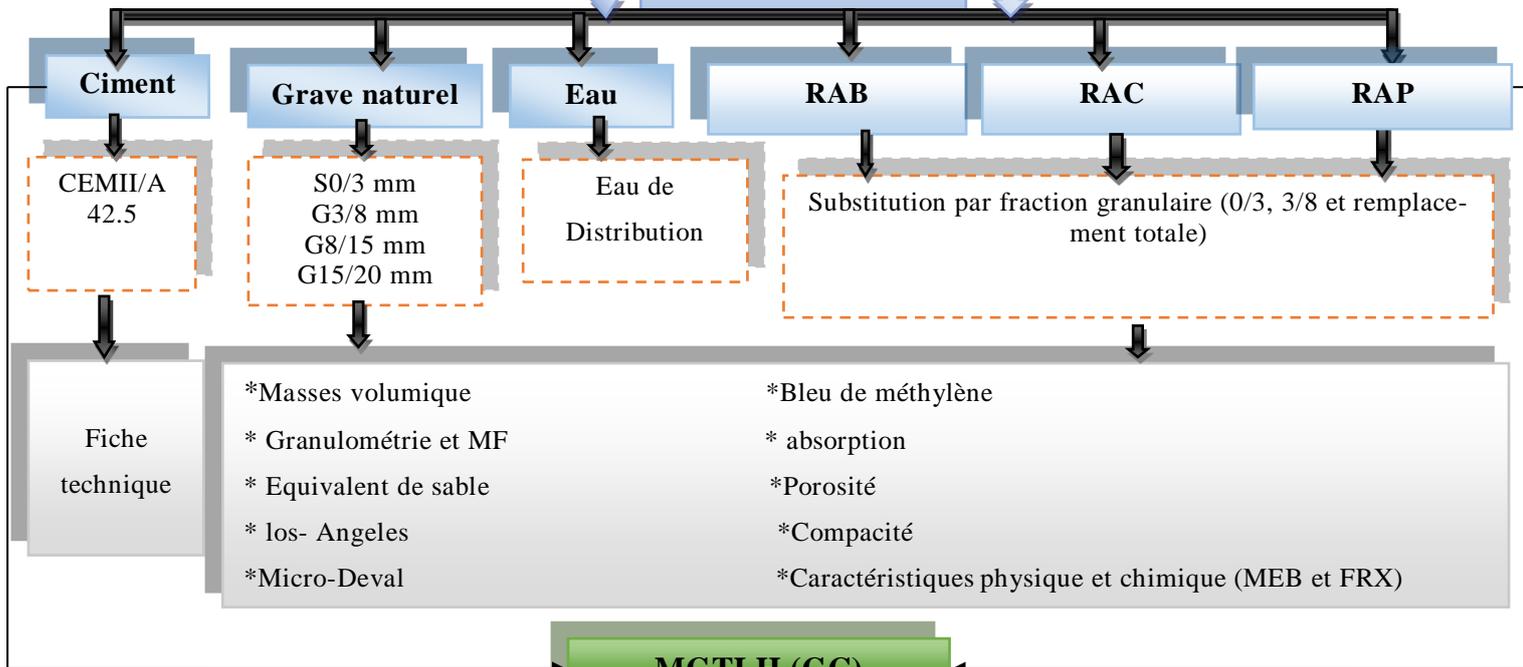
Figure IV.31 : Microscopie électronique à balayage (MEB).

IV.4 Variables étudiées

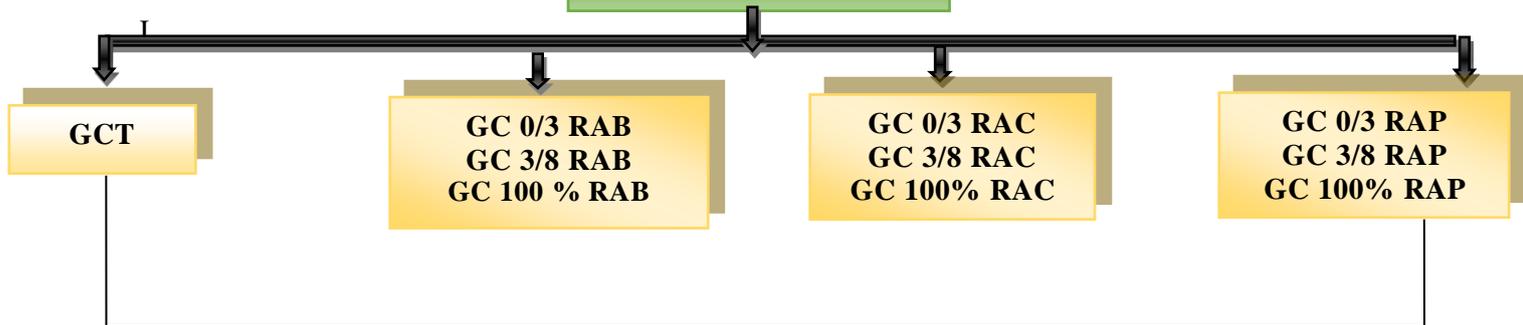
L'organigramme ci-dessous présente les variables d'étude expérimentale menée au laboratoire, notamment les différents matériaux utilisés, les essais réalisés et les différents composites obtenus.

Étude Expérimentale au Laboratoire

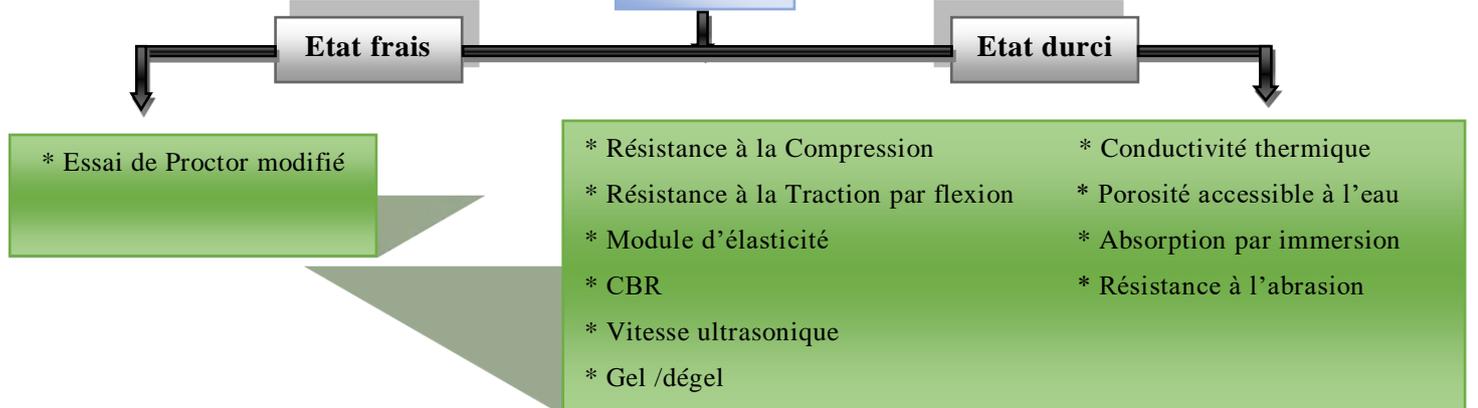
Matériaux utilisés



MGTLH (GC)



Essais



IV.5 Conclusion

Ce chapitre a joué un rôle essentiel dans notre recherche en détaillant minutieusement les différentes phases de fabrication et d'évaluation des GC. Nous avons choisi d'employer des matériaux locaux et des déchets industriels recyclés dans la fabrication de ces mélanges, dans le but d'étudier leur impact sur les performances mécaniques, la durabilité et l'empreinte environnementale des GC.

Nous avons débuté par une caractérisation physique et chimique approfondie des matériaux utilisés, ce qui nous a permis de mieux comprendre leurs propriétés et leur influence sur les mélanges finaux. Ensuite, nous avons suivi une méthode de formulation conforme à la norme NF EN 14 227, assurant ainsi une approche méthodique et standardisée dans nos expérimentations. Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les différents types de GC, à l'état frais et à l'état durci, ont été rigoureusement documentés. Nous avons mis l'accent sur la cohérence avec les normes en vigueur, garantissant ainsi la fiabilité et la comparabilité des résultats obtenus. Enfin, nous avons abordé des essais de durabilité cruciaux, visant à évaluer les performances des GC sous différentes conditions, notamment à travers des tests de porosité, de microstructure, d'absorption d'eau et de résistance au gel/dégel.

Dans l'ensemble, ce chapitre constitue une pierre angulaire de notre étude, offrant des bases solides pour l'analyse des résultats à venir et la formulation de recommandations pratiques pour l'utilisation des GC dans les projets de construction routière. Les connaissances acquises ici seront indispensables pour orienter nos travaux ultérieurs vers des solutions plus durables et efficaces sur le plan environnemental.

V. Chapitre V Résultats expérimentaux

Le chapitre V constitue une étape importante de notre étude, où nous présentons et analysons les résultats des essais effectués sur les GC à base de granulats recyclés. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de l'utilisation de granulats recyclés, tels que les granulats de RAB, de RAC et de RAP, sur le comportement des GC. Nous examinerons les différentes propriétés mécaniques, la durabilité et les caractéristiques environnementales des GC en fonction de l'emploi de ces granulats recyclés. De plus, nous chercherons à comparer nos résultats avec ceux d'autres chercheurs existants dans la littérature, afin d'enrichir notre compréhension et d'établir des références pour évaluer la performance des mélanges que nous avons étudiés.

Sommaire partiel

V.1	Effet de l'emploi de brique recyclé sur le comportement des GC	133
<u>V.1.1</u>	<u>Essai Proctor modifié</u>	133
<u>V.1.2</u>	<u>Résistance à la compression</u>	134
<u>V.1.3</u>	<u>Résistance à la traction</u>	135
<u>V.1.4</u>	<u>Indice de CBR</u>	136
<u>V.1.5</u>	<u>Module d'élasticité</u>	138
<u>V.1.6</u>	<u>Auscultation dynamique</u>	139
<u>V.1.7</u>	<u>Absorption par immersion</u>	139
<u>V.1.8</u>	<u>Résistance à l'abrasion</u>	140
<u>V.1.9</u>	<u>Porosité</u>	141
<u>V.1.10</u>	<u>Conductivité thermique</u>	142
<u>V.1.11</u>	<u>Gel/dégel</u>	144
<u>V.1.12</u>	<u>Corrélation entre les propriétés du GC</u>	146
<u>V.1.13</u>	<u>Microstructure</u>	149
V.2	Effet de l'emploi du béton recyclé sur le comportement des GC	151
<u>V.2.1</u>	<u>Essai Proctor modifié</u>	151
<u>V.2.2</u>	<u>Résistance à la compression</u>	152
<u>V.2.3</u>	<u>Résistance à la traction</u>	153
<u>V.2.4</u>	<u>Indice de CBR</u>	154
<u>V.2.5</u>	<u>Module d'élasticité</u>	155
<u>V.2.6</u>	<u>Auscultation dynamique</u>	156
<u>V.2.7</u>	<u>Absorption par immersion</u>	157
<u>V.2.8</u>	<u>Porosité</u>	158
<u>V.2.9</u>	<u>Conductivité thermique</u>	158
<u>V.2.10</u>	<u>Résistance à l'abrasion</u>	159
<u>V.2.11</u>	<u>Gel/dégel</u>	161
<u>V.2.12</u>	<u>Corrélation entre les propriétés du GC à base des RAC</u>	163
<u>V.2.13</u>	<u>La microstructure</u>	165
V.3	Effet de l'emploi de RAP sur le comportement des GC	166

<u>V.3.1</u>	<u>Essai Proctor modifié</u>	166
<u>V.3.2</u>	<u>Résistance à la compression</u>	167
<u>V.3.3</u>	<u>Résistance à la traction</u>	168
<u>V.3.4</u>	<u>Indice de CBR</u>	169
<u>V.3.5</u>	<u>Module d'élasticité</u>	171
<u>V.3.6</u>	<u>Vitesse d'auscultation sonore (VAS)</u>	172
<u>V.3.7</u>	<u>Porosité</u>	173
<u>V.3.8</u>	<u>Conductivité thermique</u>	173
<u>V.3.9</u>	<u>Absorption par immersion</u>	174
<u>V.3.10</u>	<u>Résistance à l'abrasion</u>	175
<u>V.3.11</u>	<u>Gel/dégel</u>	176
<u>V.3.12</u>	<u>Corrélation entre les propriétés du GC</u>	178
<u>V.3.13</u>	<u>La microstructure</u>	181
V.4	<u>Étude comparative des performances de GC à base des trois types de granulats recyclés</u>	182
V.5	<u>Conclusion</u>	184

V.1 Effet de l'emploi de brique recyclé sur le comportement des GC

V.1.1 Essai Proctor modifié

La figure V.1 présente les résultats de la densité sèche et la teneur en eau de différents mélanges de GC.

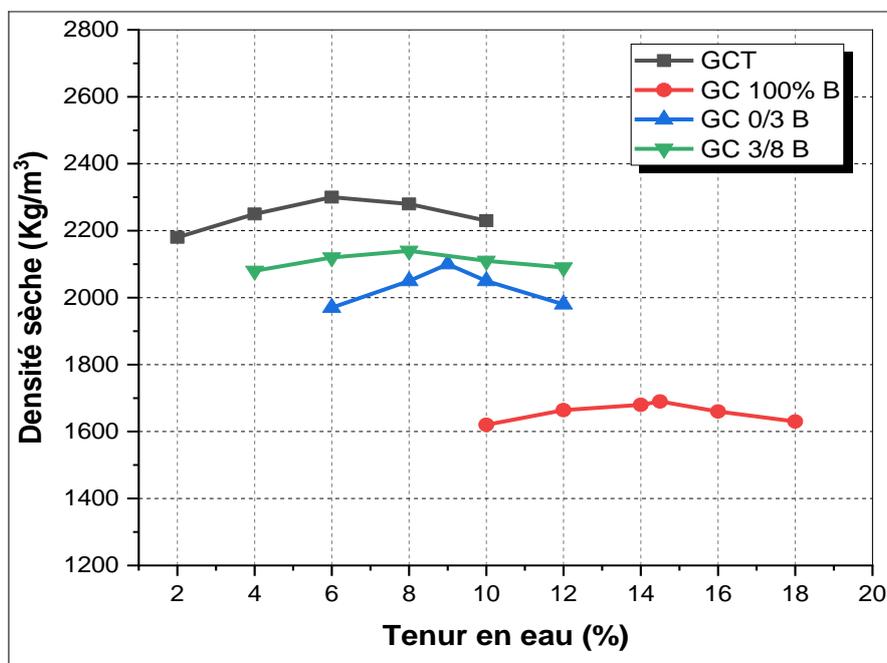


Figure V.1 : Optimisation de la teneur en eau optimale des GC.

Les résultats montrent que la densité a diminué d'environ 7 %, 9 % et 26 % pour GC 3/8 RAB, GC 0/3 RAB et GC 100 % RAB respectivement par rapport à GCT. En revanche, la teneur en eau a augmenté lorsque les granulats naturels sont remplacés complètement par des RAB, avec une augmentation d'environ 59 % par rapport au GCT. Cette teneur en eau a également augmenté de 33 % et 25 % pour les mélanges GC 0/3 RAB et GC 3/8 RAB respectivement. L'utilisation de RAB a conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et à une diminution de la densité sèche maximale, probablement en raison de la forte absorption d'eau et de la faible densité des particules de RAB.

En outre, la forme irrégulière des particules RAB peut avoir augmenté la quantité de vides à l'intérieur du matériau et entraîné une diminution de la densité sèche maximale. Les vides à l'intérieur du matériau ont entraîné une diminution de la densité sèche maximale. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes menées par Poon et al.[42] et Hu et al.[43].

V.1.2 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression à différents âges (7, 28 et 90 jours) pour les différents GC sont présentés dans la Figure V.2. Une diminution de la résistance à la compression est obtenue pour tous les échantillons contenant de différentes fractions de granulats de RAB en comparaison avec le GC contenant seulement du granulat de NA.

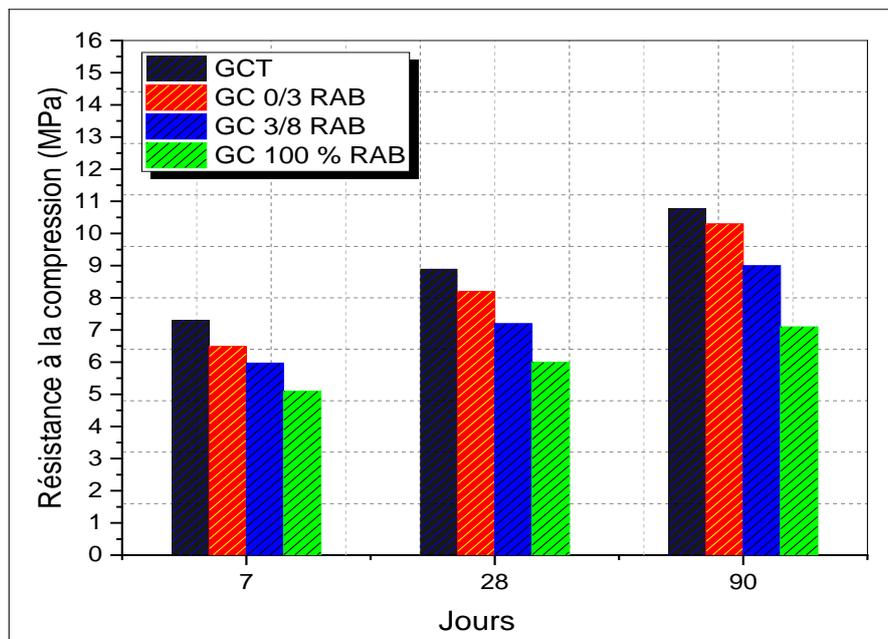


Figure V.2 : Résistance à la compression des GC.

On constate que la substitution des NA par une fraction de 0/3 de sable de RAB et une fraction de 3/8 de gravier de RAB, ont diminué la résistance à la compression à 90 jours d'environ 5 % et 16 % respectivement par rapport au GCT de référence. L'échantillon contenant 100 % RAB présente la valeur la plus faible de la résistance à la compression par rapport aux autres échantillons. Cette diminution de résistance à la compression est due principalement aux différentes propriétés physiques et mécaniques des RAB qui présentent des valeurs faibles par rapport à celles de NA. De plus les granulats de RAB sont considérés comme des granulats légers avec une porosité élevée. Par ailleurs, cette porosité induit une augmentation de la quantité d'eau dans le mélange au cours de malaxage. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par d'autres chercheurs : [42], [43], [31], [44].

Il peut également être démontré que l'utilisation de RAB en tant que sable conduit à une résistance à la compression supérieure par rapport à l'utilisation de RAB en tant que gravier. Cela peut être dû à la moindre résistance du RAB, utilisé comme granulats grossiers avec une granulométrie plus grande et plus faible, ce qui réduit la résistance du GC [44].

V.1.3 Résistance à la traction

L'évolution de la résistance à la traction par flexion des différentes GC fabriquées avec matériaux RAB à 7, 28 et 90 jours est représentée dans la Figure V.3.

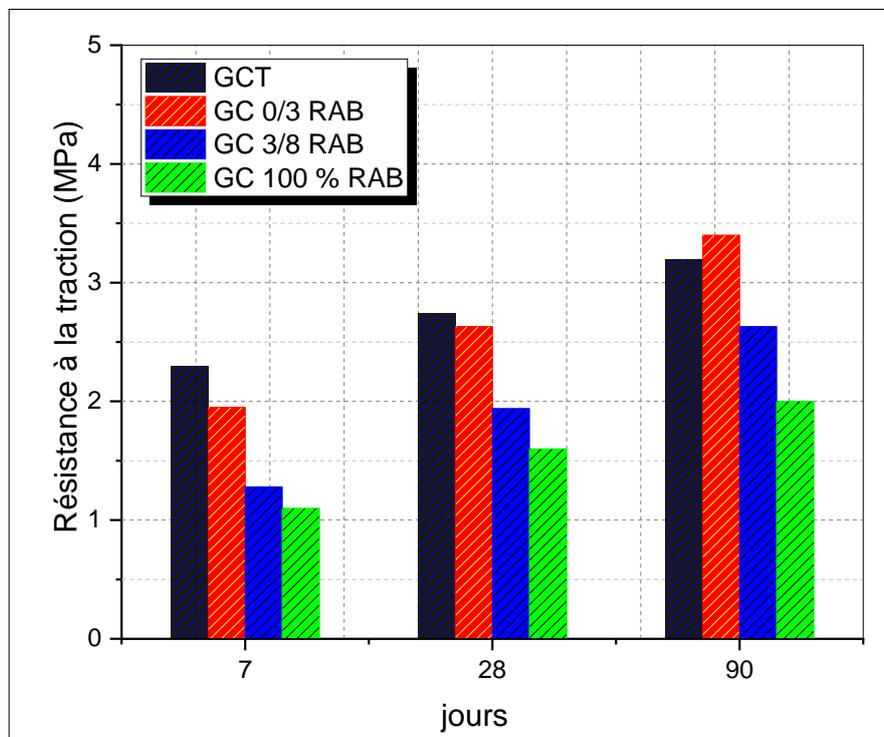


Figure V.3 : Résistance à la traction des GC.

L'ajout de RAB aux mélanges GC a diminué la résistance à la traction des mélanges GC 0/3 RAB et GC 3/8 RAB de 5 % et 30 %, respectivement à 28 jours par rapport aux mélanges GCT. L'utilisation de 100 % de RAB a diminué la résistance à la traction de 42 %. On a constaté que la résistance à la traction dépendait principalement de la cohésion des mélanges et moins de la résistance des particules agrégées [43]. La surface du RAB est moins rugueuse que celle du NA, ce qui a eu un effet négatif sur la résistance à la traction. Le mélange GC 0/3 RAB a montré un taux plus élevé de développement de la résistance à la traction entre 28 et 90 jours en raison de son action pouzzolanique entre la silice et l'alumine active et les produits d'hydratation du ciment. Khatib et al [26] ont observé un taux de développement plus élevé de la résistance entre 28 et 90 jours dans le cas de béton contenant du RAB sous forme de granulats fins. Ce phénomène est attribué à l'action pouzzolanique du RAB, impliquant sa silice active et son alumine, en interaction avec les produits d'hydratation du ciment.

V.1.4 Indice de CBR

Les mélanges de GC ont été soumis à des essais CBR après avoir été compactés à leur teneur en eau optimale correspondante. Les essais CBR ont été réalisés dans des conditions de trempage pendant 4 jours et les résultats sont résumés dans la Figure V.4.

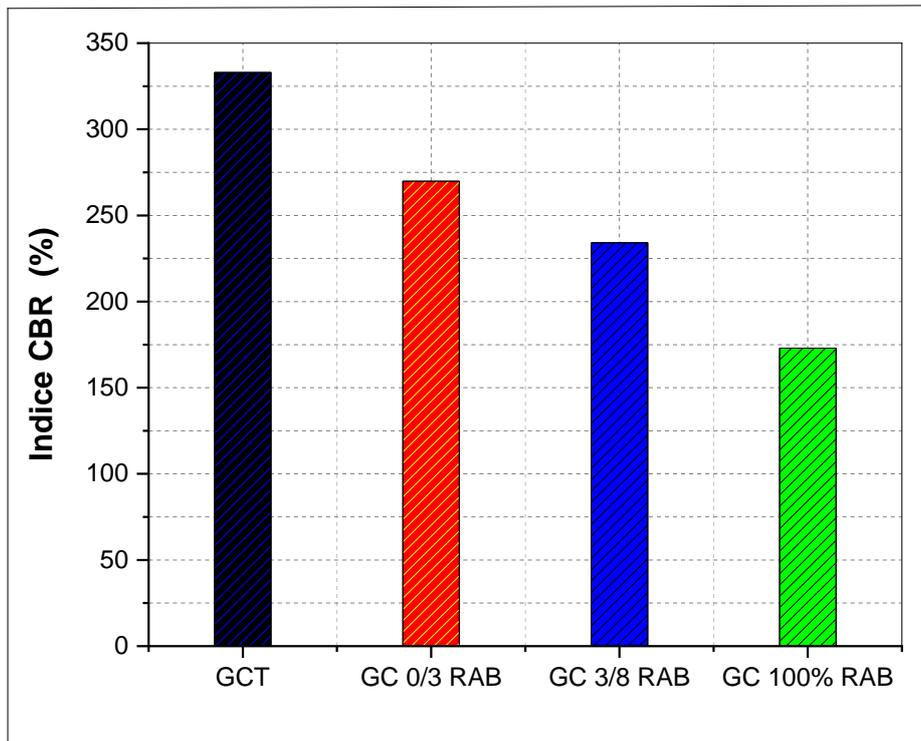


Figure V.4 : Indice de CBR des GC.

L'utilisation de RAB dans les mélanges GC a diminué l'indice CBR. L'indice CBR du GC 100 % RAB était inférieur de 46 % à celui du GCT. Le remplacement de NA par RAB dans les niveaux de granulats fins (0/3) mm et grossiers (3/8) a diminué l'indice CBR de 30 % et 50 %, respectivement, par rapport au mélange utilisant 100 % de NA. Cette diminution est due aux propriétés mécaniques plus faibles des RAB et à la densité plus faible des GC à base de RAB par rapport au GCT. Ce résultat est cohérent avec les résultats obtenus par de Poon et Chan [42].

En ce qui concerne les classes GC, le Manuel Caltrans [37] fournit des spécifications basées sur l'indice CBR. Les classes de GC vont de la classe 1 à la classe 4, chaque classe ayant des exigences spécifiques pour les valeurs CBR et d'autres caractéristiques de performance. Ces spécifications permettent d'assurer la conception et la construction appropriées des couches GC dans les projets de transport, en tenant compte des conditions du sol et de la capacité de charge nécessaires pour une infrastructure sûre et durable. Les classes de GC sont classées comme suit : 1. Les GC de classe 1 sont conçues pour un trafic intense, avec des valeurs CBR supérieures à 100 % ; 2. les GC de classe 2 conviennent pour un trafic modéré à intense, avec des valeurs CBR comprises entre 80 % et 100 % ; 3. les GC de classe 3 sont destinées à un trafic modéré, avec des valeurs CBR comprises entre 50 % et 80 % ; et 4. les GC de classe 4 sont conçues pour un trafic léger à intense,

avec des valeurs CBR II apparaît clairement que l'utilisation de matériaux RAB dans les GC peut fournir des matériaux adaptés à un trafic intense et à des conditions de forte contrainte. L'incorporation de RAB peut améliorer la résistance et les performances des GC, ce qui les rend aptes à des applications avec des charges de trafic importantes et des conditions exigeantes.

V.1.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité du GC varie de la même manière que la résistance à la compression et les résultats sont présentés dans la Figure V.5.

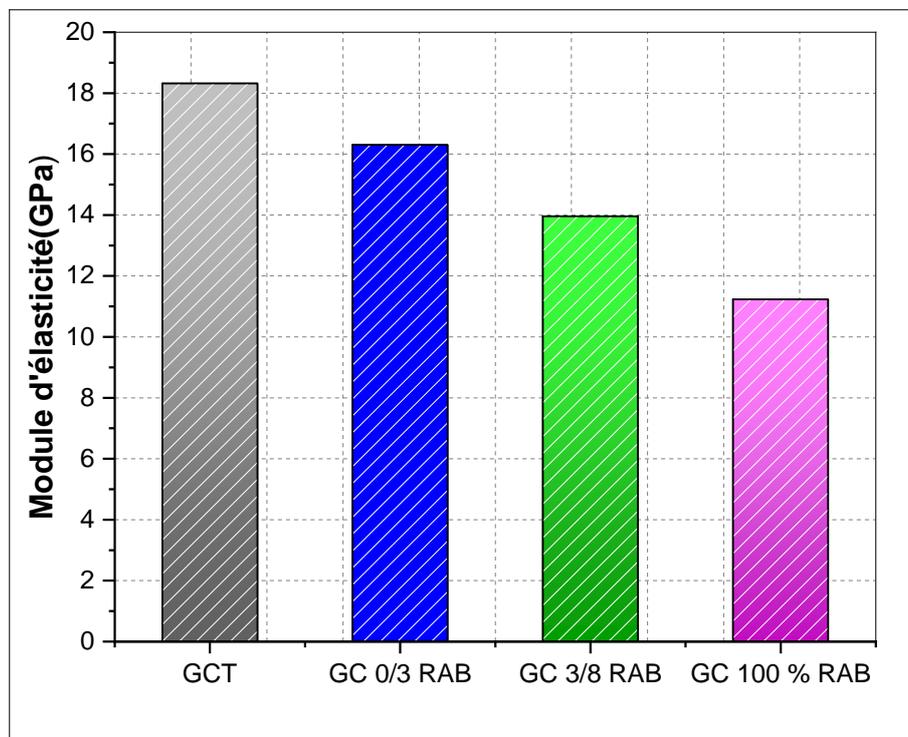


Figure V.5 : Module d'élasticité des GC.

On constate que le module d'élasticité à 28 jours diminue avec le remplacement des agrégats fins (0/3 mm) et des agrégats grossiers (3/8 mm) et le remplacement total (100 % RAB) respectivement, et la valeur maximale de 28 jours était de 18.32 GPa, la valeur minimale de 28 jours était de 11.23 GPa. La diminution du module d'élasticité à 28 jours pour les granulats fins (0/3 mm) et grossiers (3/8) et les niveaux de remplacement à 100 % était de 12 %, 24 % et 39 %, respectivement, par rapport aux mélanges utilisant 100 % de NA. Cette diminution du module d'élasticité est due à la plus grande porosité du RAB

par rapport au NA. Le matériau présentant une porosité plus élevée a toujours un potentiel de déformation plus important sous charge. Ce résultat est cohérent avec les études précédentes [4], [44].

V.1.6 Auscultation dynamique

La Figure V.6 représente les différentes valeurs de l'VAS pour les différents GC à 28 jours d'âge.

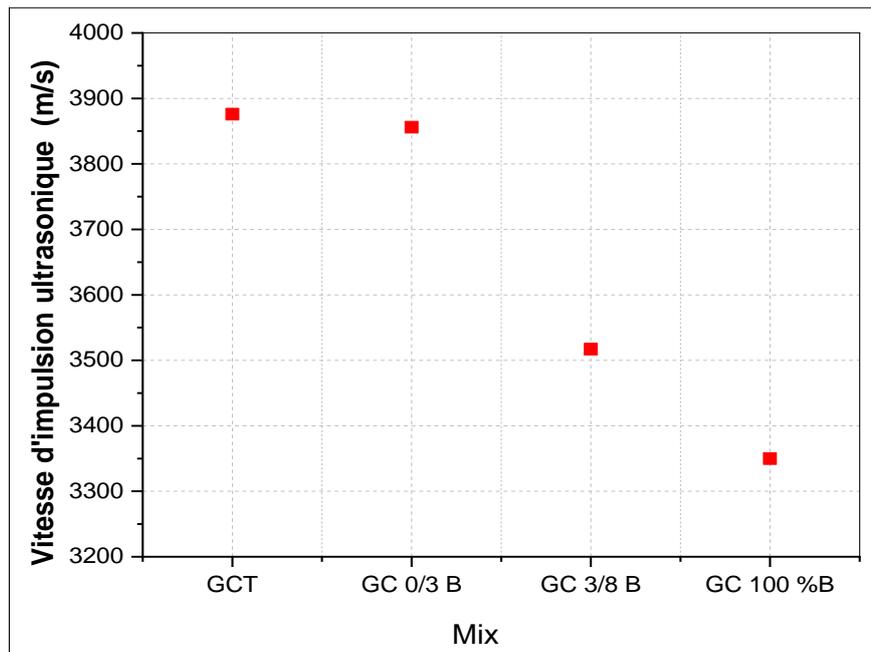


Figure V.6 : Auscultation dynamique des GC.

L'utilisation de RAB sous forme de sable (0/3), de gravier (3/8) ou en remplacement total de NA dans les mélanges GC a entraîné une diminution des valeurs VAS. Les valeurs UPV des mélanges GC sont diminués en raison de la plus grande porosité du RAB par rapport à la NA. Cette constatation est cohérente avec les recherches antérieures d'Atyia et al [44].

V.1.7 Absorption par immersion

La Figure V.7 illustre l'absorption d'eau par immersion de divers mélanges GC après 28 jours de durcissement.

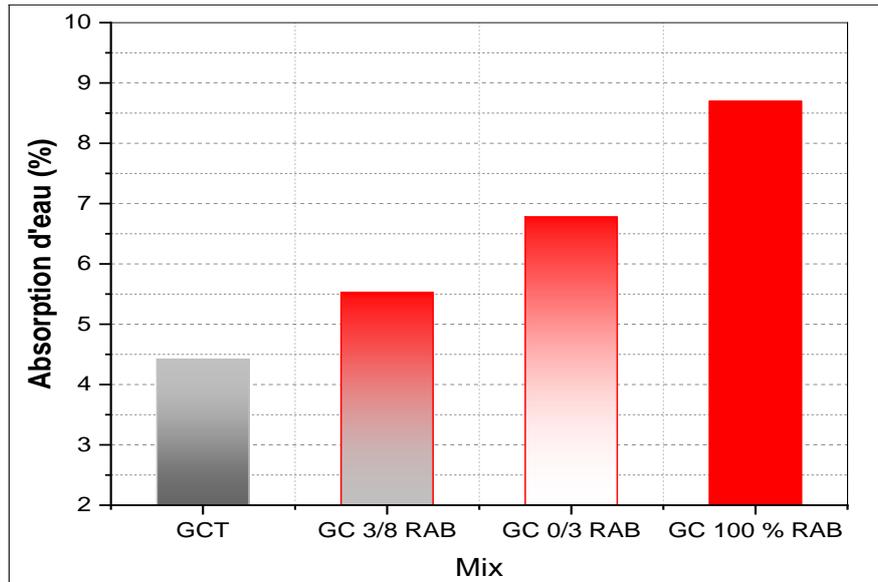


Figure V.7 : Absorption de l'eau des GC.

Les résultats montrent une augmentation progressive des valeurs d'absorption avec l'utilisation de RAB comme gravier (3/8 mm), sable (0/3 mm), et le remplacement total de NA par RAB. Les valeurs d'absorption ont augmenté de 20 %, 54 % et 95 %, respectivement, par rapport au mélange utilisant 100 % de granulats naturels.

Cette tendance peut être expliquée par l'augmentation de la porosité interne causée par l'utilisation de RAB, qui se caractérise par une porosité élevée et une plus grande absorption d'eau par rapport à NA. Ce résultat est cohérent avec celui de [201], qui a conclu que la porosité des RAB et leur plus grande rétention d'eau conduiront à une plus grande absorption d'eau dans le béton de RAB.

V.1.8 Résistance à l'abrasion

La Figure V.8 illustre l'effet de l'incorporation des granulats RAB sur la résistance à l'abrasion de divers mélanges GC après 28 jours de durcissement.

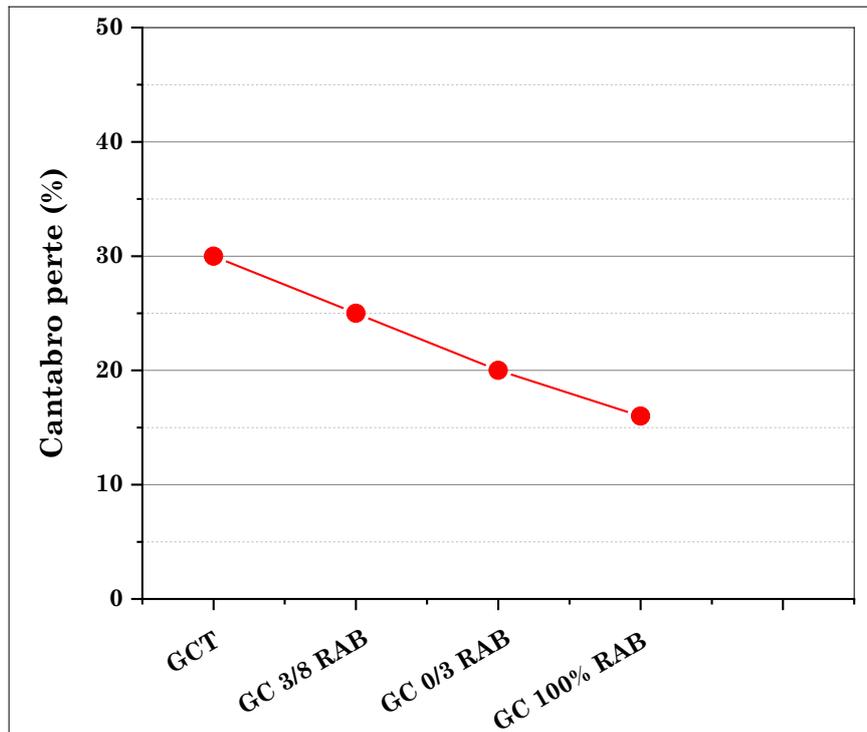


Figure V.8 : Résistance à l'abrasion des GC à base de granulats de RAB

Le mélange GC 3/8 RAB a montré une réduction de la perte par abrasion d'environ 17 % par rapport au mélange GCT. Cependant, les mélanges GC 0/3 RAB et GC 100 % RAB ont montré une réduction de 33 % et 47 %, respectivement, par rapport au mélange GCT. La résistance à l'abrasion a été affectée dans notre cas par la nature des agrégats utilisés. Les mélanges contenant des RAB présentaient une résistance à l'abrasion plus élevée que les mélanges contenant des NA. On peut conclure que les agrégats légers de bonne qualité ont une meilleure résistance à l'abrasion.

V.1.9 Porosité

La Figure V.9 est représentée l'effet du RAB sur la porosité pour les différents mélanges du GC à 28 jours.

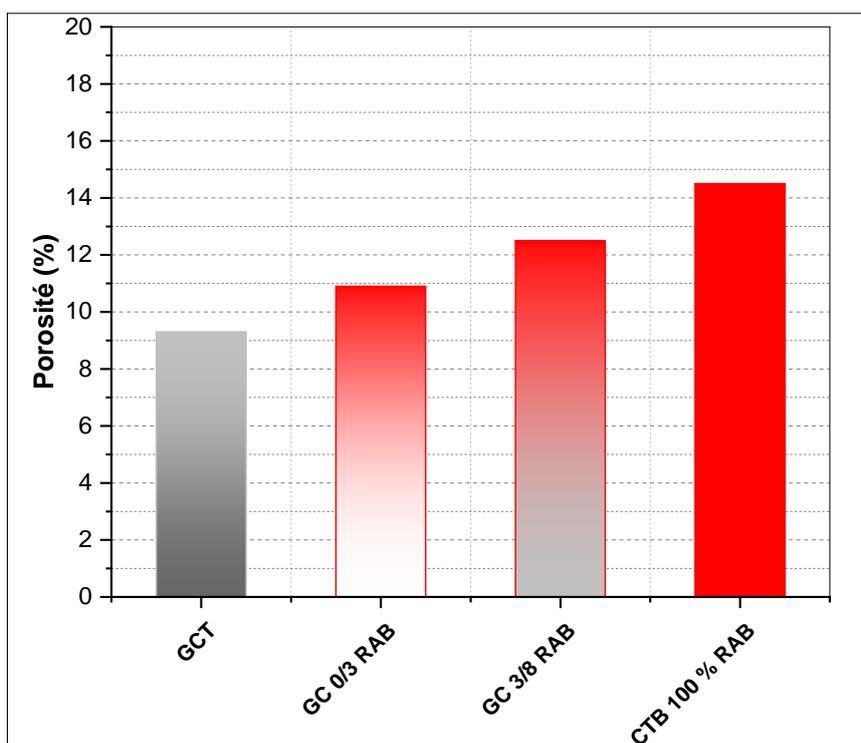


Figure V.9 : Porosité des GC à base de granulats de RAB.

Les résultats indiquent que la porosité augmente avec l'utilisation des RAB. Lorsque les RAB ont été utilisés comme sable (0/3 mm) dans le GC 0/3 RAB, la porosité a augmenté de 17 %. Lorsque les RAB ont été utilisés comme gravier (3/8 mm) dans le GC 3/8 RAB, la porosité a augmenté de 34 %. Le remplacement complet de NA par RAB dans le GC 100 % RAB augmente la porosité d'environ 56 % par rapport aux GCT. Cette augmentation de la porosité est due à l'utilisation de RAB, qui se caractérisent par une porosité plus élevée que les granulats naturels.

La porosité globale du mélange de béton contenant des RAB est augmentée en raison de la porosité élevée des RAB, selon les résultats de [202] et [44].

V.1.10 Conductivité thermique

Les résultats de la conductivité thermique du GC produit à base de granulats de brique sont présentés dans la Figure V.10.

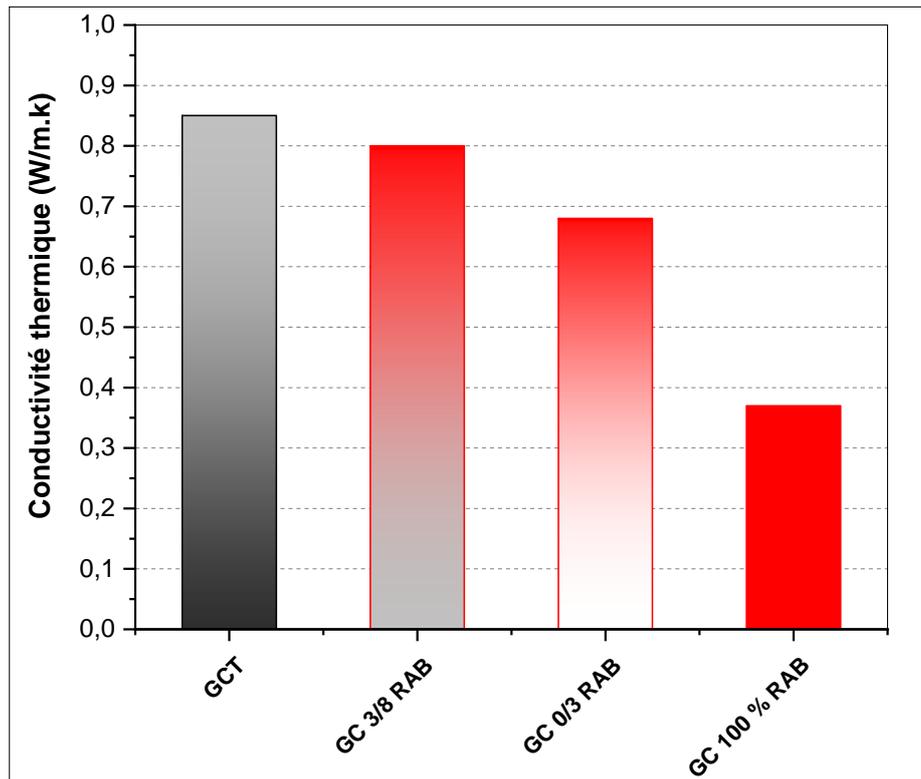


Figure V.10 : Conductivité thermique des GC à base de granulats de RAB.

Le remplacement des NA par des RAB conduit à une diminution de la conductivité thermique des mélanges GC, où lors de l'utilisation de RAB comme gravier (3/8 mm) et sable (0/3 mm), les valeurs de conductivité thermique de GC 3/8 RAB et GC 0/3 RAB étaient inférieures à GCT de 6 % et 20 % respectivement. La conductivité thermique est réduite de plus de 55 % pour une substitution complète de NA par RAB.

Ce résultat démontre que le type d'agrégat a une influence importante sur la conductivité thermique du GC.

Cette amélioration de la conductivité thermique avec l'introduction de RAB s'explique par la faible densité et la porosité élevée des RAB par rapport aux NA [44],[203] .

Atyia et al [44] ont rapporté que la densité sèche et la porosité sont directement liées à la conductivité thermique du béton. Ce sont les principaux facteurs qui influencent les propriétés thermiques du béton. Avec l'augmentation de la densité, la porosité diminue et la conductivité thermique augmente, et vice-versa.

V.1.11 Gel/dégel

Les résultats des pertes de masse après 300 cycles de gel/dégel des éprouvettes de GC avec les RAB sont illustrés sur la figure V.11.

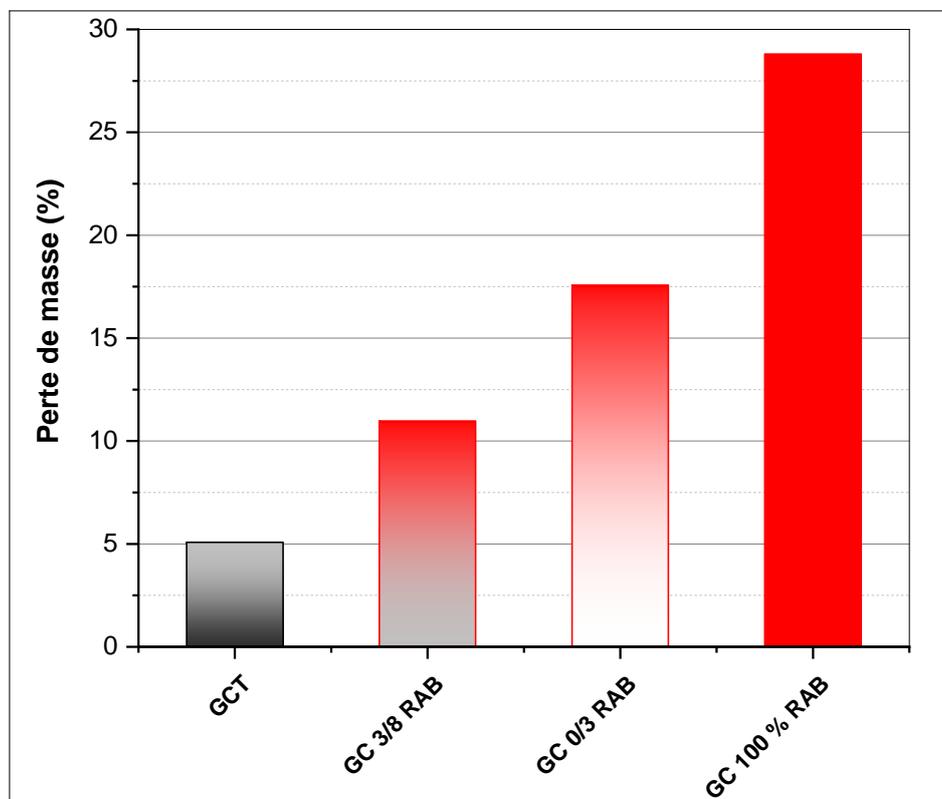


Figure V.11 : Perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAB.

D'après les résultats obtenus, on observe que les valeurs de la perte de masse des GC qui contiennent les RAB sont plus élevées que celles des GCT. La perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des GCT, GC 3/8 RAB, GC 0/3 RAB et GC 100 % RAB est de l'ordre de 5,07 %, 10,97 %, 17,57 % et 28,8 % respectivement.

Ces résultats montrent une tendance croissante régulièrement vers un taux de remplacement des RAB sous forme de gravier 3/8, de sable et de remplacement total des NA dans les GC.

Hu et al [43] ont constaté que lors du gel, l'eau commence à geler dans une cavité capillaire de l'échantillon et la pression hydraulique est générée en raison de l'augmentation du volume de l'eau accompagnant le gel. L'ampleur de la pression est également liée à la teneur en eau de l'échantillon. Généralement, plus l'échantillon contient d'eau, plus la pression hydraulique dans l'échantillon est élevée pendant la congélation. La pression provoque

souvent une détérioration de l'échantillon et affecte sa résistance. Étant donné que l'RAB a une absorption d'eau plus élevée que l'NA, l'échantillon contenant l'RAB absorbe souvent plus d'eau pendant l'expérience. Cela conduit au fait que l'utilisation de granulats de RAB exercerait une influence négative sur les performances de résistance au gel des granulats traités au ciment.

Examen visuel des éprouvette

La figure V.12 et V.13 montrent l'état des éprouvettes avant et après 300 cycles gel/dégel respectivement.

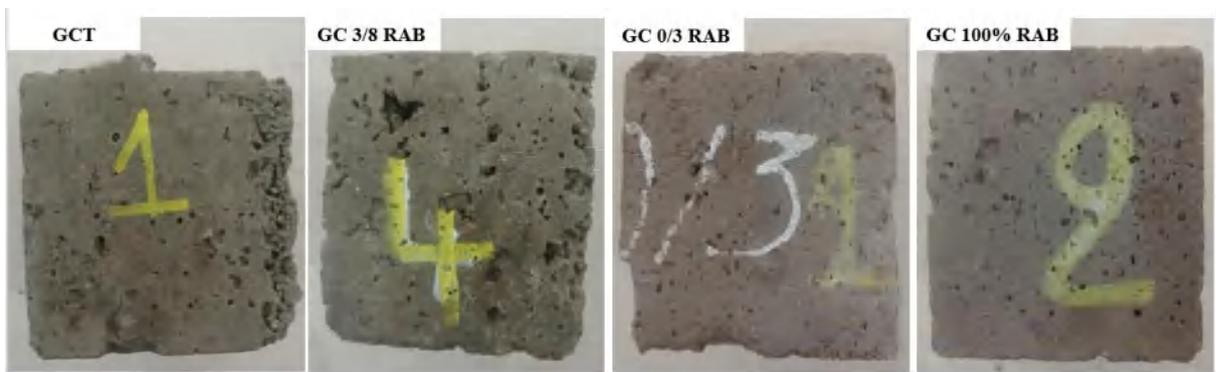


Figure V.12 : Aspect des éprouvettes avant cycle de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAB.



Figure V.13 : Aspect des éprouvettes après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAB.

On constate que les éprouvettes ont subi une dégradation remarquable, à cause des éclatements et d'un gonflement provoqué par le gel de l'eau interne. Ces dégradations sont importantes et augmentent de manière progressive dans les mélanges GC 0/3 RAB et GC 100 % RAB, à cause de la forte absorption d'eau et de la porosité des RAB par rapport aux NA. L'absorption d'eau des granulats se reflète dans l'absorption d'eau du GC. De ce

fait, il en résulte une perte de masse des échantillons. On peut conclure que le mélange faiblement poreux est plus durable vis-à-vis de l'effet cyclique gel/dégel, puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau.

V.1.12 Corrélation entre les propriétés du GC

De nombreux chercheurs s'accordent sur l'existence de relations ou de modèles mathématiques entre les propriétés des GC à l'état durci. Les résultats du GC à l'état durci sont interconnectés, ce qui permet une analyse plus approfondie du comportement du matériau, ainsi que l'étude des corrélations entre les différentes caractéristiques de ce matériau.

V.1.12.1 Corrélation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et l'auscultation dynamique

L'auscultation dynamique est représentée en fonction du module d'élasticité et de la résistance à la compression sur la Figure V.14. D'après la figure, on observe une très bonne corrélation linéaire entre le module d'élasticité et l'auscultation dynamique et entre la résistance à la compression et l'auscultation dynamique avec $R^2 = 0.93$ et $R^2 = 0.94$ respectivement. Cette relation suggère que l'augmentation de la vitesse d'auscultation sonore conduit à une augmentation du module d'élasticité et de la résistance à la compression.

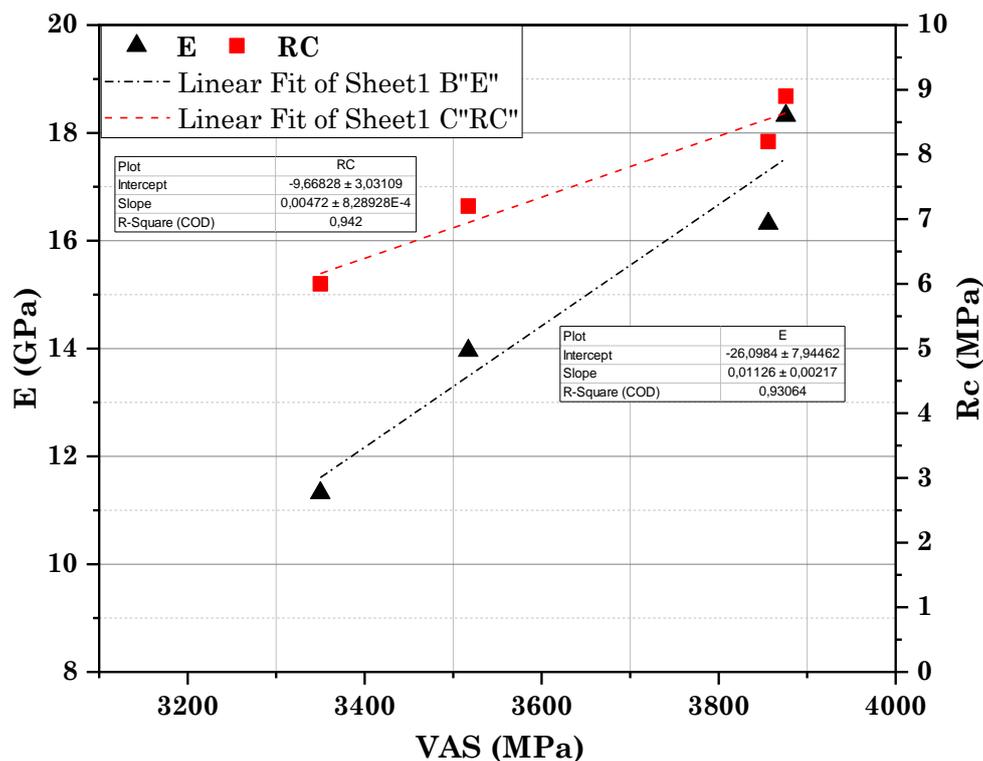


Figure V.14 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et VAS des GC à base de granulats de RAB.

V.1.12.2 Corrélation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la porosité

La porosité accessible à l'eau est représentée en fonction du module d'élasticité et de la résistance à la compression sur la Figure V.15. Une forte corrélation a été établie entre le module d'élasticité et la porosité, ainsi qu'entre la résistance à la compression et la porosité, avec des coefficients de $R^2 = 0,99$ pour les deux relations. On peut observer que la résistance à la compression et le module d'élasticité du GC sont très sensibles à la porosité induite par l'utilisation de matériaux RAB. La résistance à la compression a tendance à diminuer à mesure que la porosité augmente. Christen et al [202] qui ont rapporté une diminution de la résistance du béton avec l'augmentation de la porosité. L'ajout de RAB poreux au mélange de béton réduit donc sa résistance, ce qui confirme les résultats obtenus.

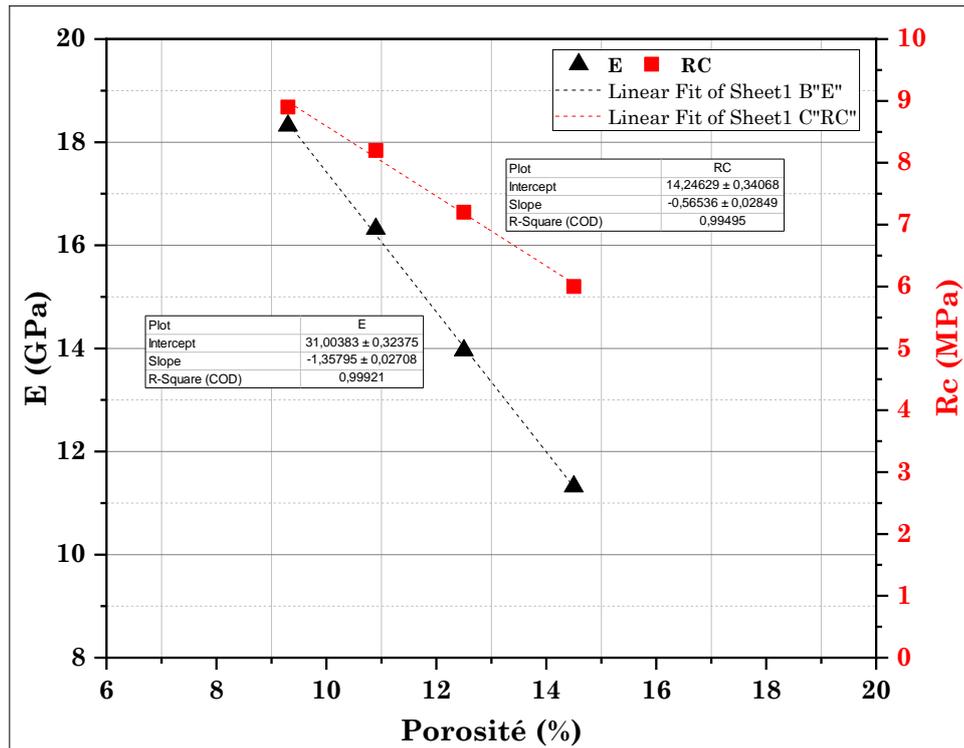


Figure V.15 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la porosité des GC à base de granulats de RAB.

V.1.12.3 Corrélation entre la conductivité thermique et la porosité

La Figure V.16 illustre la relation entre la conductivité thermique et la porosité à travers l'échantillon des GC fabriqués avec les RAB à l'âge de 28 jours. Une forte corrélation a été établie entre la conductivité thermique et la porosité, avec $R^2 = 0.90$. Ce qui nous permet de prédire la conductivité thermique du béton à partir de la mesure de la porosité. Plus la porosité est élevée, plus les valeurs de conductivité thermique sont faibles, et inversement, ce qui suggère une corrélation directe entre les deux.

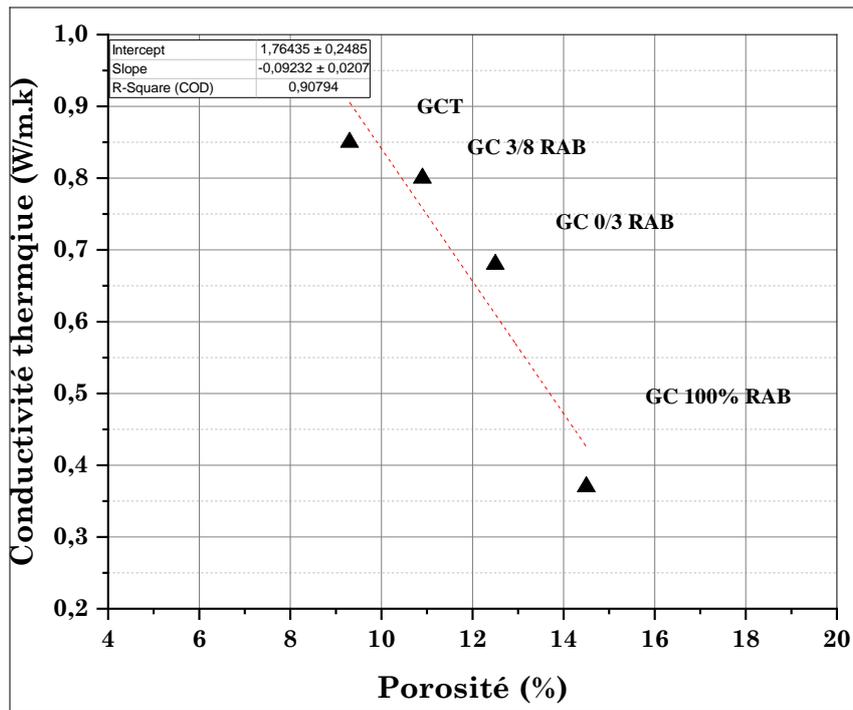


Figure V.16 : Corrélation établie entre la conductivité thermique et la porosité des GC à base de granulats de RAB.

V.1.13 Microstructure

La microstructure du GC produit avec RAB a été examinée par analyse MEB après 90 jours de durcissement et les résultats sont présentés sur la Figure V.17.

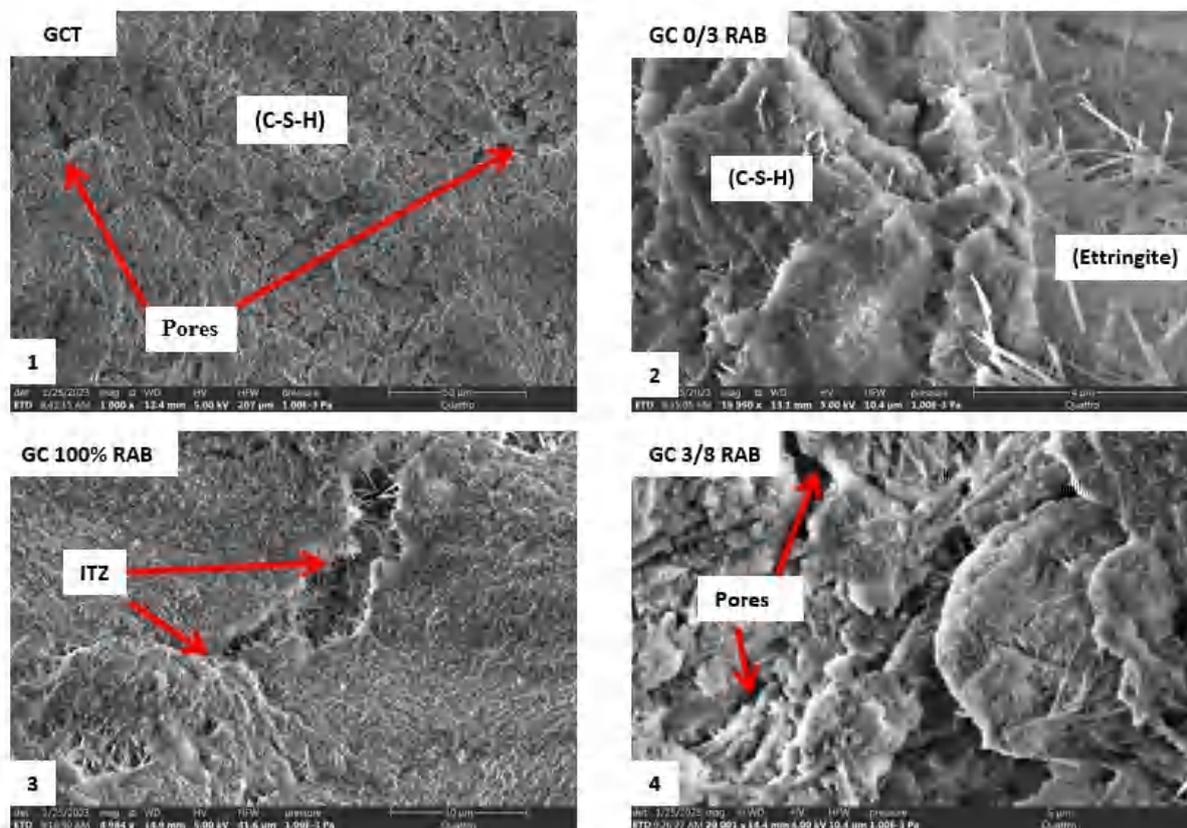


Figure V.17 : Examen au MEB des mélanges GC.

La Figure V.17 (1) illustre que le mélange GCT présente une matrice plus dense avec une porosité minimale. Cependant, lorsque le RAB est utilisé comme agrégat fin (sable) dans le mélange GC 0/3 RAB, comme le montre la Figure V.17 (2), de nouveaux hydrates de CSH ont été créés en raison de l'impact pouzzolanique élevé des particules de RAB (l'analyse de la composition chimique du RAB a montré une quantité plus élevée de SiO_2 et Al_2O_3 par rapport à NA).

L'utilisation de RAB comme agrégat grossier dans le mélange GC 3/8 RAB, comme indiqué dans la Figure V.17 (3), a entraîné davantage de pores par rapport au mélange GCT en raison de l'effet de RAB sur la liaison interne des particules. Le mélange GC 100 % RAB, produit en remplaçant entièrement NA par RAB, a révélé une surface plus lisse et moins compacte ainsi qu'un plus grand nombre de pores dans la microstructure, comme le montre la Figure V.17 (4).

Ces observations sont cohérentes avec les caractéristiques mécaniques des mélanges GC et peuvent être utilisées pour expliquer leurs performances. Ce résultat est en accord avec des études précédemment menées par d'autres chercheurs [36, 55, 204].

V.2 Effet de l'emploi du béton recyclé sur le comportement des GC

V.2.1 Essai Proctor modifié

La figure V.18 présente les résultats de la densité sèche et la teneur en eau de différents mélanges de GC.

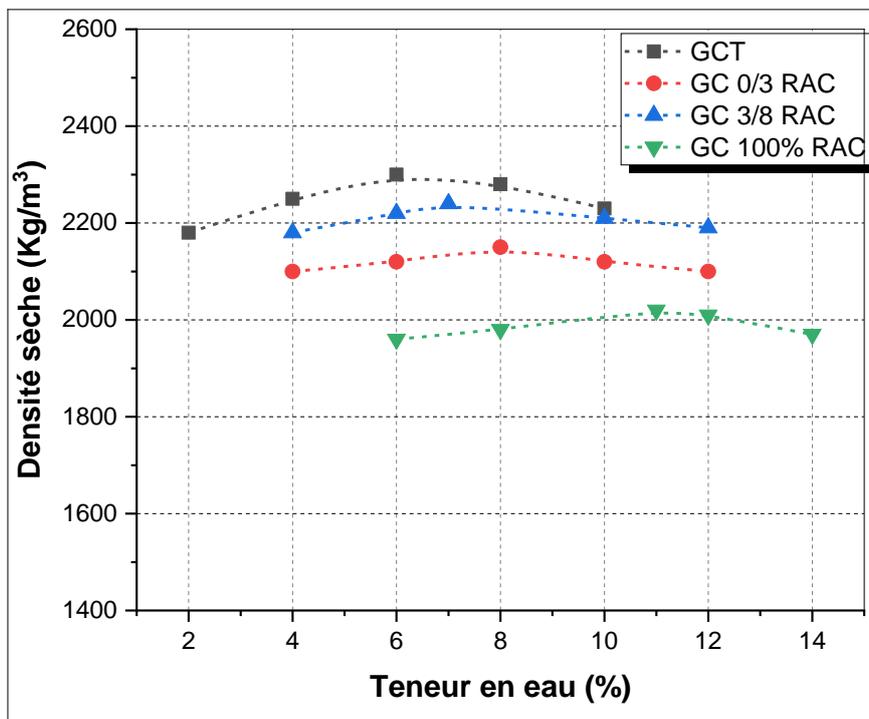


Figure V.18 : Optimisation de la teneur en eau optimale des GC.

Les résultats montrent que l'utilisation de RAC a conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et à une diminution de la densité sèche maximale, la diminution de la densité sèche d'environ 3 %, 7 % et 12 % pour un GC 3/8 RAC, GC 0/3 RAC et GC 100 % RAC respectivement par rapport à GCT, cette différence s'explique principalement par les propriétés physiques des granulats naturels qui ont la plus forte densité de particules et qui sont moins poreux par rapport aux RAC.

L'augmentation de la teneur en eau d'environ 16 %, 33 % et 83 % pour un GC 3/8 RAC, GC 0/3 RAC et GC 100 % RAC respectivement par rapport à GCT, en raison du fait que la RAC a une teneur en eau supérieure et peut absorber près du double de la quantité d'eau par rapport aux NA. D'autres chercheurs ont également confirmé ce résultat [76],[77].

Selon Lime et al [205], une teneur en eau plus élevée est observée pour les mélanges RAC par rapport aux NA en raison de l'absorption d'eau plus élevée de RAC.

V.2.2 Résistance à la compression

La figure V.19 montre l'évolution de la résistance à la compression des différentes GC à 7, 28 et 90 jours.

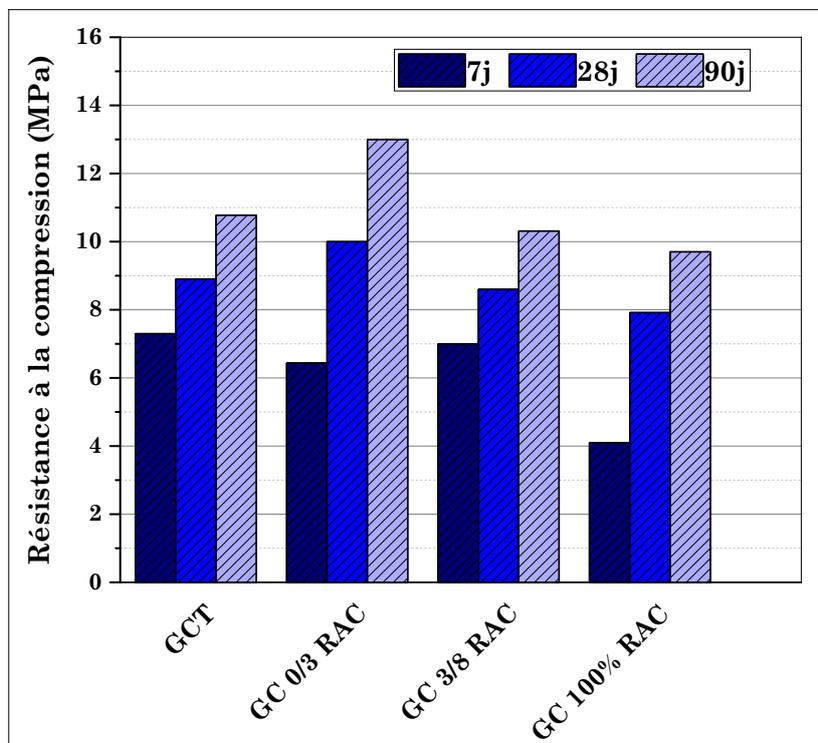


Figure V.19 : Résistance à la compression des GC.

D'après cette figure, on constate que l'incorporation de RAC donnait des résultats comparables à celle de NA. La réduction de la résistance à la compression est d'environ 10 % à 90 jours pour le GC 100 % RAC. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Pérez et al [62], Meddah et al [150].

Si on substitue les NA par une fraction de 0/3 de sable de RAC (GC 0/3 RAC), on constate un taux de développement plus élevé de la résistance à la compression à 28 et 90 jours de l'ordre 12 % à 20 % respectivement par rapport au GCT.

En revanche, le remplacement du gravier concassé (fraction 3/8) par du gravier recyclé réduit légèrement la résistance à la compression d'ordre 5 % à 90 jours par rapport au GCT. Cela était dû à la capacité d'absorption du mortier adhérent présent dans les granulats recyclés et à l'efficacité de la nouvelle ITZ du béton de granulats recyclés [206], [99].

L'amélioration de la résistance à la compression pour le mélange GC 0/3 RAC peut être expliquée par la présence de ciment non hydraté dans l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés, ainsi que par la qualité des granulats recyclés provenant du béton autoplaçant

montrent que le coefficient d'aplatissement des RAC inférieur à celui NA qui conduit à une résistance à la compression pour les autres mélanges comparable à celui GCT.

Ces facteurs peuvent contribuer à renforcer les propriétés mécaniques du GC. La capacité d'auto-cimentation des granulats recyclés peut également avoir contribué à l'augmentation de la résistance [207].

Par ailleurs, plusieurs études ont rapporté que la résistance à la compression du béton à base de granulat recyclé est supérieure à celle du béton conventionnel, en particulier à long terme. En effet, des réactions pouzzolaniques du RAC avec la portlandite se produisent lors de l'hydratation du ciment [208].

Kou et al [209] ont suggéré que le gain de résistance plus élevé du RAC pourrait être dû au fait que la présence de granulats de béton recyclés a amélioré la microstructure de la zone de transition interfaciale (ITZ) et augmentait la force d'adhérence entre la nouvelle pâte de ciment et les anciens granulats après hydratation continue.

V.2.3 Résistance à la traction

La figure V.20 montre l'évolution de la résistance à la traction des différentes GC à 7, 28 et 90 jours.

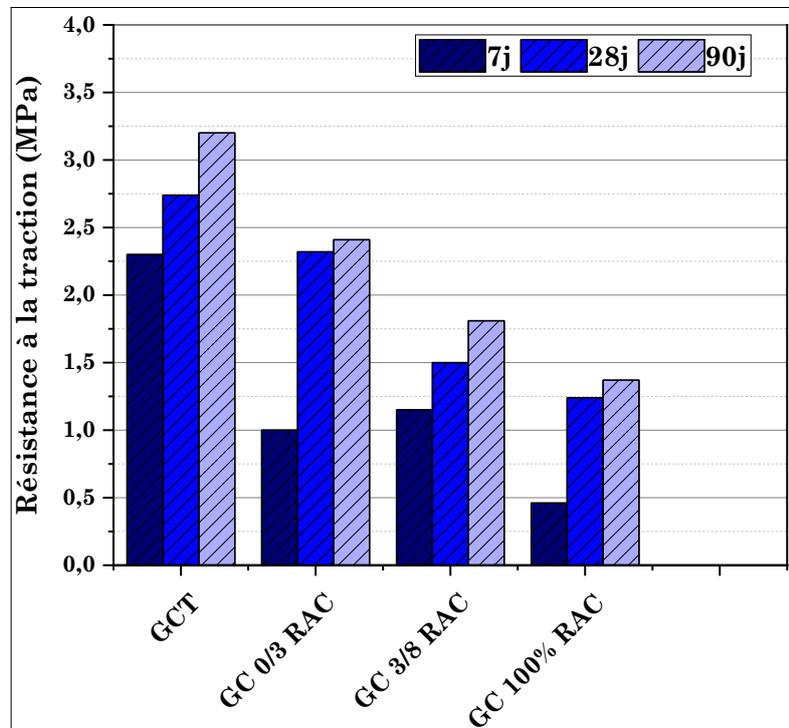


Figure V.20 : Résistance à la traction des GC.

D'après cette figure, il est observable que la résistance à la flexion des GC diminue lorsqu'on incorpore du granulat recyclé (RAC) dans les mélanges à tous les âges, en particulier avec un remplacement total (100 % RAC). En comparaison au mélange GCT, la résistance à la traction des mélanges GC 0/3 RAC, GC 3/8, et GC 100 % RAC a diminué de 25 %, 43 % et 57 %, respectivement.

Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par d'autres chercheurs [9, 14, 15], qui ont également observé une réduction d'environ 24 à 35 % des propriétés mécaniques du béton lorsqu'il est constitué à 100 % de granulats recyclés.

Matias et al. [210] ont constaté que la résistance plus faible du Béton recyclé par rapport au Béton témoins est liée à la moindre densité du BR, qui contient une plus grande quantité de mortier attaché.

V.2.4 Indice de CBR

La figure V.21 montre les valeurs CBR des différentes GC.

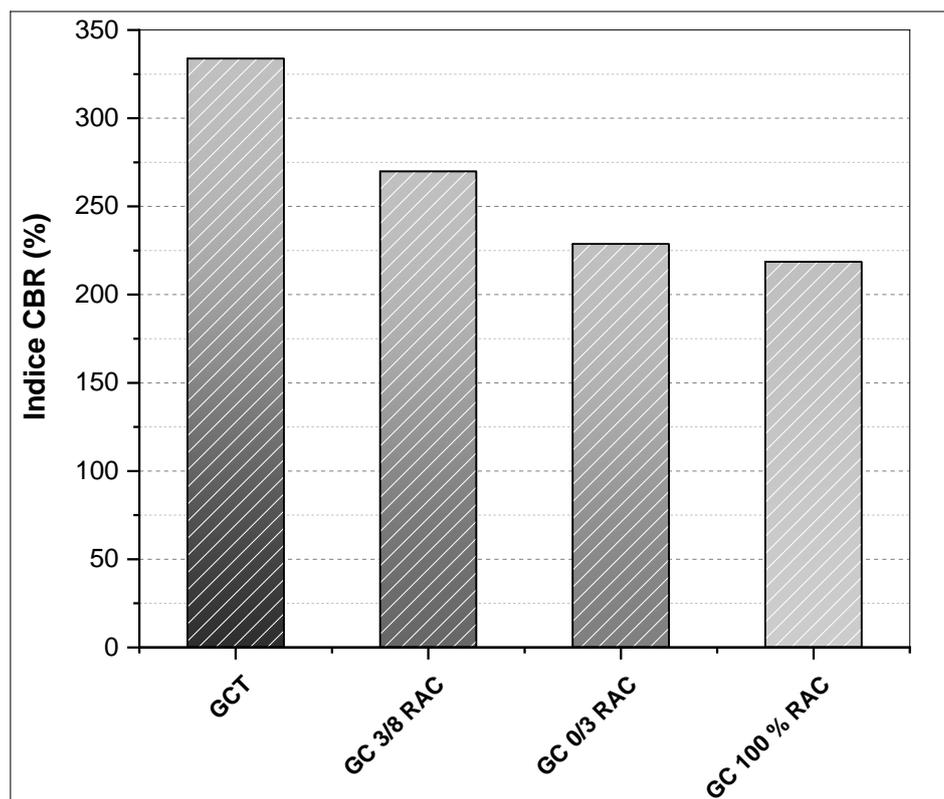


Figure V.21 : Indice de CBR des GC.

Les valeurs CBR étaient comprises entre 218 et 333 % et satisfaisaient aux exigences minimales souhaitées des autorités routières pour le CBR, fixées à 80 % pour la couche de base. Le remplacement de NA par RAC dans les niveaux de granulats grossiers (3/8), fins (0/3) et de remplacement total (GC 100 % RAC) a diminué l'indice CBR de 19 %, 32 % et 35 %, respectivement, par rapport au mélange GCT. Cette diminution est due aux propriétés mécaniques plus faibles des RAC et à la densité plus faible des GC à base de RAC par rapport au GCT. Cette constatation est cohérente avec les résultats rapportés par [76, 77].

V.2.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité du GC varie de la même manière que la résistance à la compression et les résultats sont présentés dans la figure V.22.

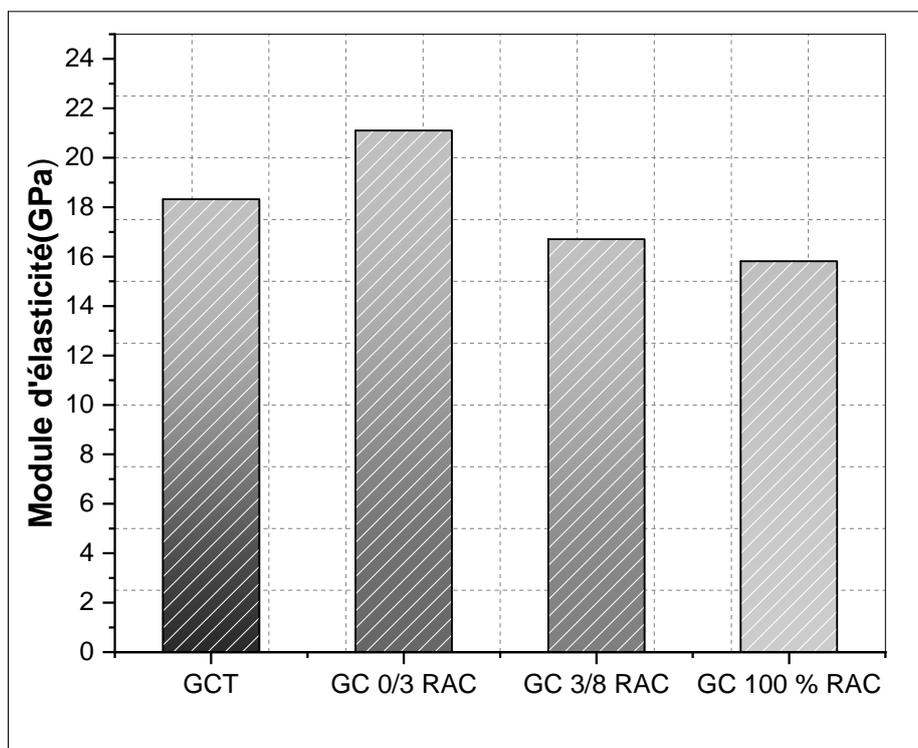


Figure V.22 : Module d'élasticité des GC.

D'après cette figure, on remarque que l'incorporation de granulats recyclés (RAC) donne des résultats similaires à ceux des granulats naturels (NA). La réduction du module d'élasticité est d'environ 9 % et 14 % à 90 jours pour le GC 3/8 RAC et GC 100 % RAC,

respectivement. Si l'on remplace l'intégralité du sable concassé par du sable 100 % recyclé, on observe un taux de développement plus élevé du module d'élasticité à 90 jours, d'environ 15 % par rapport au GCT.

Haider et al [78] ont montré que l'augmentation de la rigidité dans les mélanges contenant des granulats recyclés est attribuée à la poursuite des réactions d'hydratation, également appelées réactions de cimentation, au sein du RAC.

V.2.6 Auscultation dynamique

La figure V.23 représente les différentes valeurs de l'UPV pour les différents GC à 28 jours d'âge.

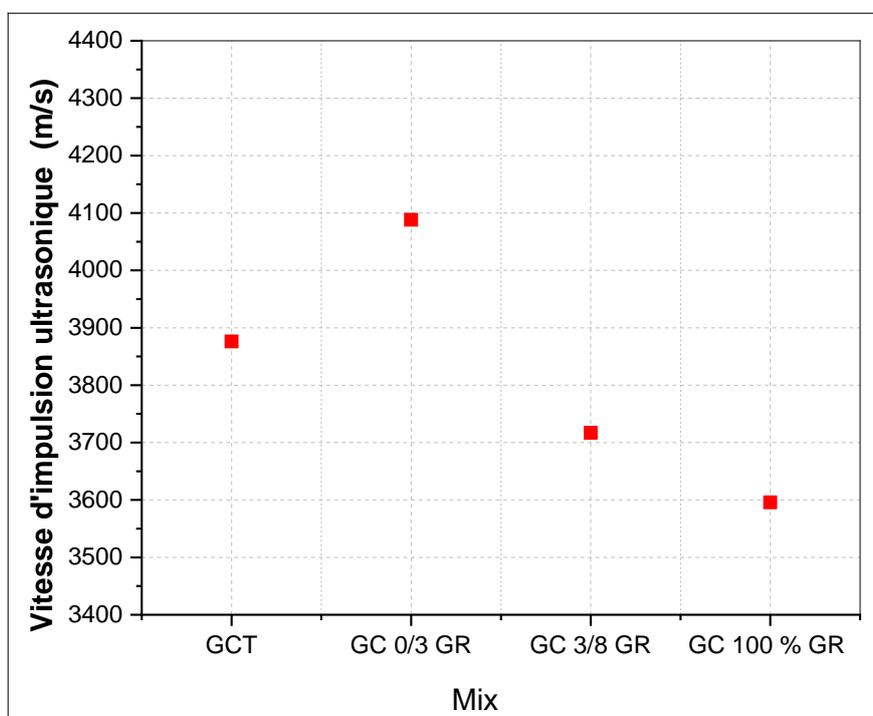


Figure V.23 : Auscultation dynamique des GC.

Il est à noter que tous les GC recyclés présentant une vitesse du son comprise entre 3500 et 4500 mètres par seconde (m/s) sont considérés comme étant de bonne qualité pour la fabrication des bétons routiers.

V.2.7 Absorption par immersion

La figure V.24 illustre l'absorption d'eau par immersion de divers mélanges GC après 28 jours de durcissement.

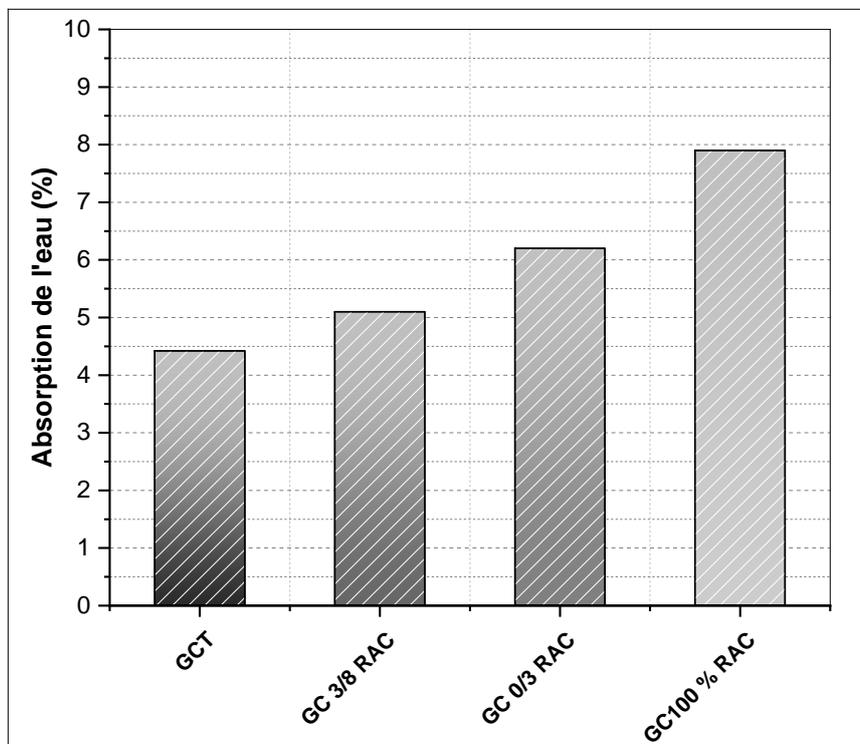


Figure V.24 : Absorption de l'eau des GC.

Les résultats indiquent une augmentation progressive des valeurs d'absorption lorsque les RAC sont utilisés en tant que gravier (3/8 mm) ou sable (0/3 mm), et lorsqu'il y a un remplacement complet des NA par des RAC. Les valeurs d'absorption ont augmenté respectivement de 15 %, 40 % et 78 % par rapport au GCT.

Plus les pores sont nombreux, plus l'eau sera absorbée par le béton, ce qui explique pourquoi le GC recyclé présente une capillarité plus élevée.

Cette augmentation est due à la forte absorption d'eau des gros et fins granulats recyclés que celle des granulats naturels. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par d'autres chercheurs [84, 211, 212].

Il a été démontré dans les études expérimentales menées par plusieurs auteurs [101, 213, 214] que la présence d'ancien mortier attaché à la surface des particules RAC augmente leur capacité d'absorption.

V.2.8 Porosité

La figure V.25 est représentée de l'effet du RAC sur la porosité pour les différents mélanges du GC à 28 jours.

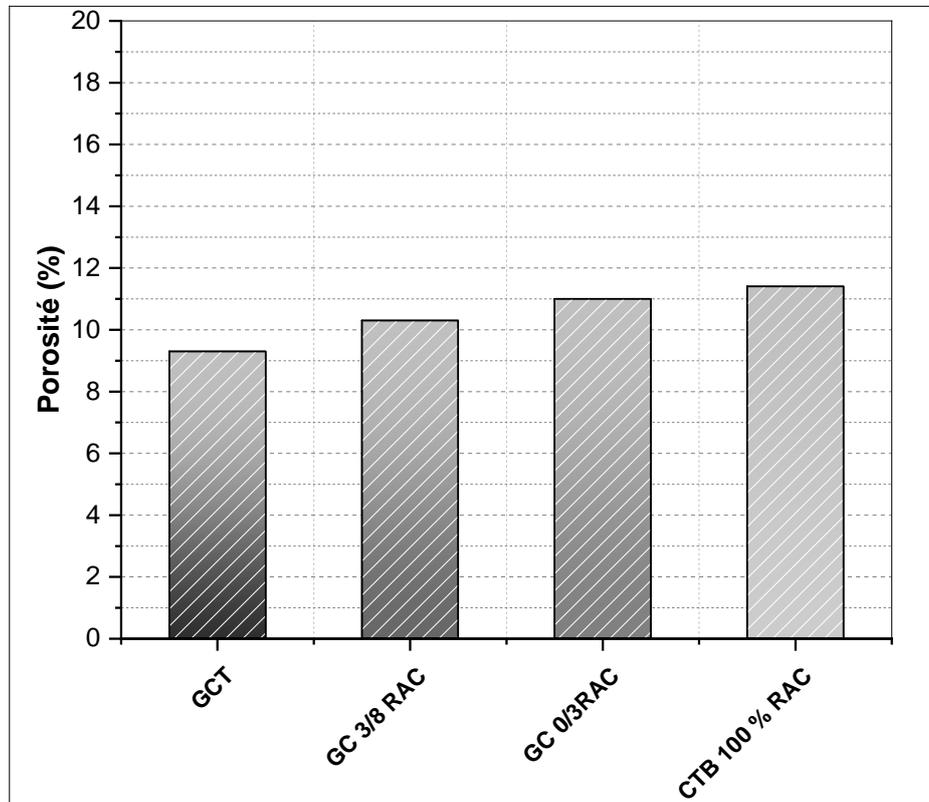


Figure V.25 : la porosité des GC à base de granulats de RAC.

D'après la figure V.25, les valeurs maximales des porosités sont observées pour le GC 100 % RAC et pour le GC 0/3 RAC. Le mélange GC 3/8 RAC, qui se base sur des granulats recyclés de la fraction 3/8 seulement, présente une porosité plus faible par rapport au GC 100 % RAC et au GC 0/3 RAC. Ce comportement est anticipé en raison de la nature poreuse des granulats recyclés, qui contiennent de la pâte cimentaire poreuse, en particulier les sables recyclés qui renferment une proportion significative de fines résultant de l'utilisation d'un concasseur à mâchoires [215, 216].

V.2.9 Conductivité thermique

La figure V.26 présente les résultats du coefficient de conductivité thermique du GC à base de RAC.

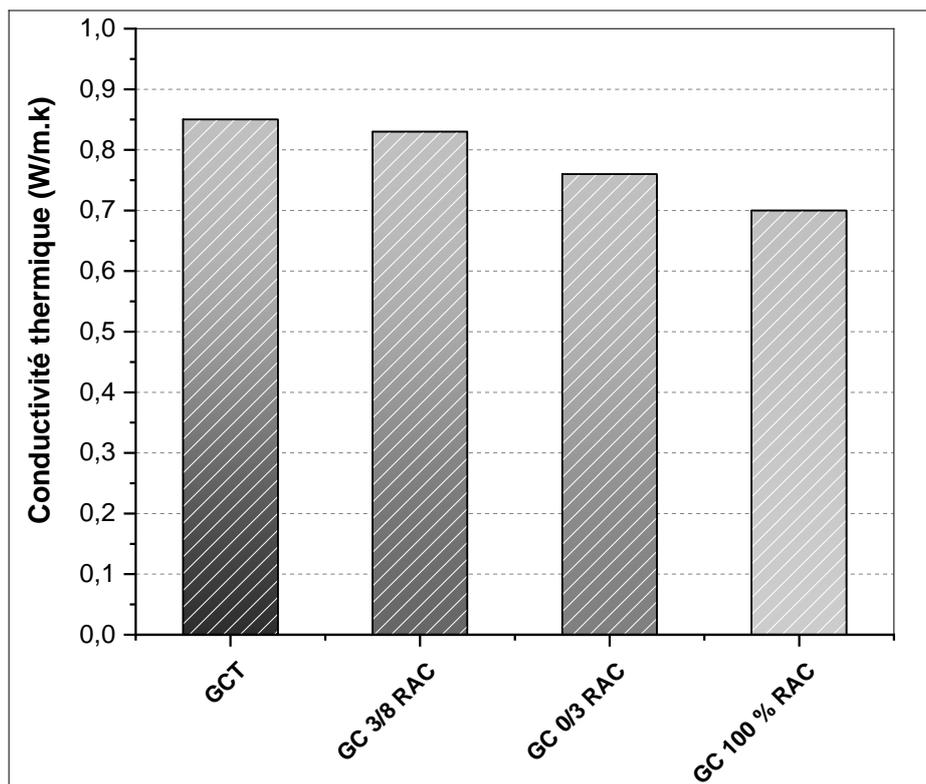


Figure V.26 : Conductivité thermique des GC à base de granulats de RAC.

Les résultats ont indiqué que la conductivité thermique des GC 100 % RAC, GC 0/3 RAC, GC 3/8 RAC et GCT est de 0.70, 0.76, 0.83 et 0.85 W/m.K. La tendance de la conductivité thermique du GC diminuait avec l'incorporation des RAC sous forme de gravier, de sable et de remplacement total des NA par RAC, respectivement en raison de la porosité élevée du RAC.

Fenollera et al [217] ont confirmé que la tendance générale de la conductivité thermique diminue lors de l'utilisation des granulats recyclés. Cependant, outre la teneur en RAC, d'autres facteurs influencent la conductivité thermique, tels que le type et la forme des granulats, la température, la composition du mélange, etc. Ce sont ces facteurs qui expliquent les variations des valeurs de conductivité thermique.

V.2.10 Résistance à l'abrasion

La figure V.27 illustre l'effet de l'incorporation des granulats RAC sur la résistance à l'abrasion de divers mélanges GC après 28 jours de durcissement.

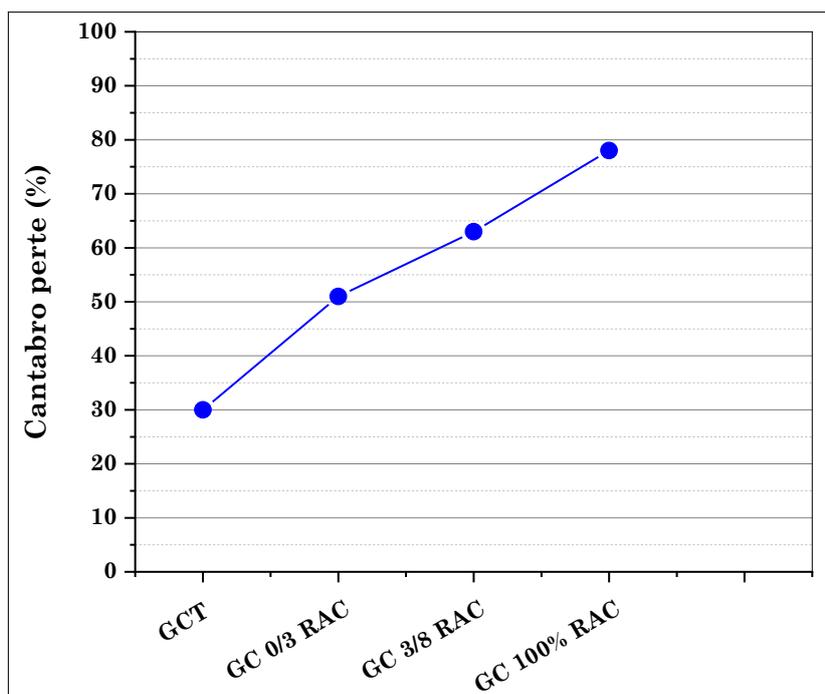


Figure V.27 : la résistance à l'abrasion des GC à base de granulats de RAC.

On observe une augmentation significative de la perte de masse, ce qui traduit une diminution de la résistance à l'abrasion, lors du remplacement du NA par le RCA. Le remplacement complet du NA par le RCA a entraîné la plus faible résistance à l'abrasion et la perte de masse la plus élevée. La réduction de la résistance à l'abrasion du GC 0/3 RAC était d'environ 70 %, tandis que pour le GC 3/8 RAC, la réduction était d'environ 10 % par rapport au GCT.

Kumar et al [218] ont montré que la réduction de la résistance à l'abrasion du béton est probablement principalement attribuable à la qualité relativement inférieure du RCA, ainsi qu'à la qualité relativement médiocre de la matrice de pâte de ciment du béton qui adhère au RCA. Cela se traduit par une augmentation de la porosité, principalement due à la présence de deux zones de transition, de fissures et de pores dans le mortier qui lie les granulats, ainsi qu'à la réduction de la densité du béton.

Mcneil et al [102] ont montré que le comportement du RCA lors des tests d'abrasion met en évidence la fragilité de l'ancien mortier adhérent à la surface. Étant donné que cette couche est la plus susceptible de se détacher, il est prévu que cette pellicule de mortier pourrait également entraîner une faible adhérence au sein du béton.

V.2.11 Gel/dégel

Les résultats des pertes de masse après 300 cycles de gel/dégel des éprouvettes de GC avec les RAC sont illustrés sur la figure V.28.

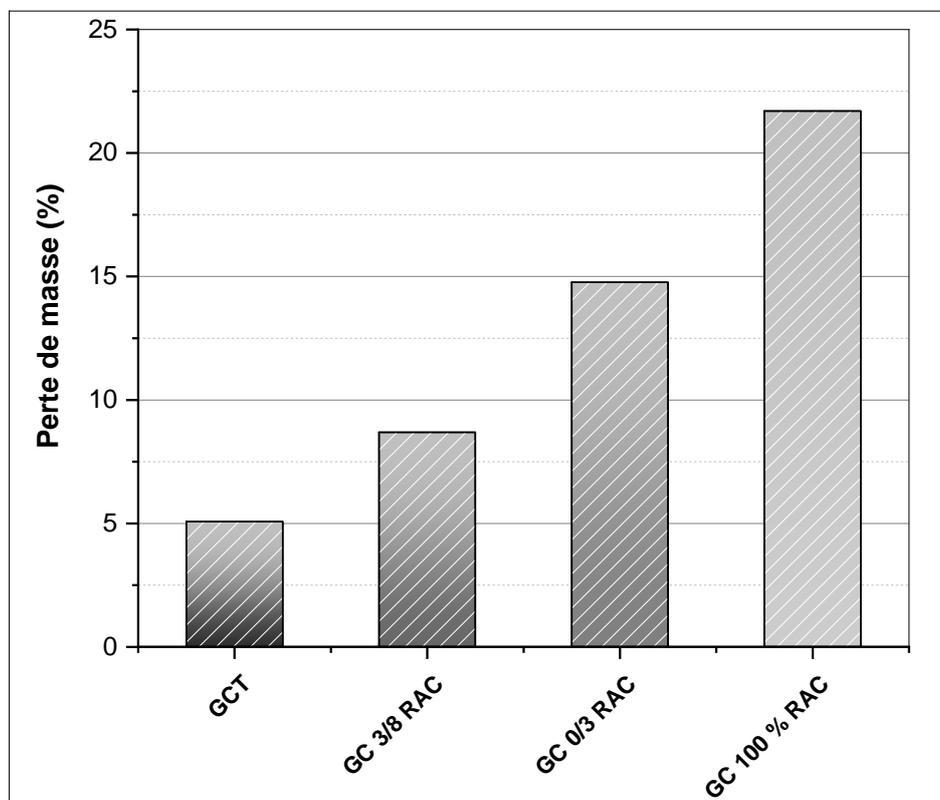


Figure V.28 : Perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAC.

De toute évidence, la perte de masse des GC augmente avec l'incorporation des RAC sous forme de gravier 3/8, de sable et de remplacement total des NA. Les résultats montrent que la perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des GCT, GC 3/8 RAC, GC 0/3 RAC et GC 100 % RAC est respectivement de 5,07 %, 8,69 %, 14,76 % et de 21,7. La perte de masse des GC due à l'eau qui pénètre dans les pores du matériau peut geler et se dilater, exerçant ainsi des pressions internes. Si la perméabilité est élevée en raison de la porosité accrue des granulats de béton recyclé, cela peut conduire à une infiltration d'eau plus importante dans la structure. Lorsque l'eau gelée se dilate dans ces pores, elle peut exercer une pression sur les parois internes, entraînant des dommages tels que des fissures et des dégradations du matériau.

Salem et al. [104] montrent que l'augmentation de la perte de masse était due à l'absorption et à la porosité plus élevées du béton à granulats recyclés avec l'augmentation des niveaux de remplacement du RAC. En raison de cette porosité accrue, l'eau absorbée se sature facilement et, en gelant, elle génère un stress interne. Si cette contrainte dépasse la résistance à la traction des granulats, des microfissures se forment à l'intérieur du béton, entraînant des éclatements et une perte de masse du béton.

Examen visuel des éprouvettes

Les aspects de surface des GC incorporés RAC avant et après 300 cycles gel/dégel ont été donnés sur la figure V.29 et IV.30.

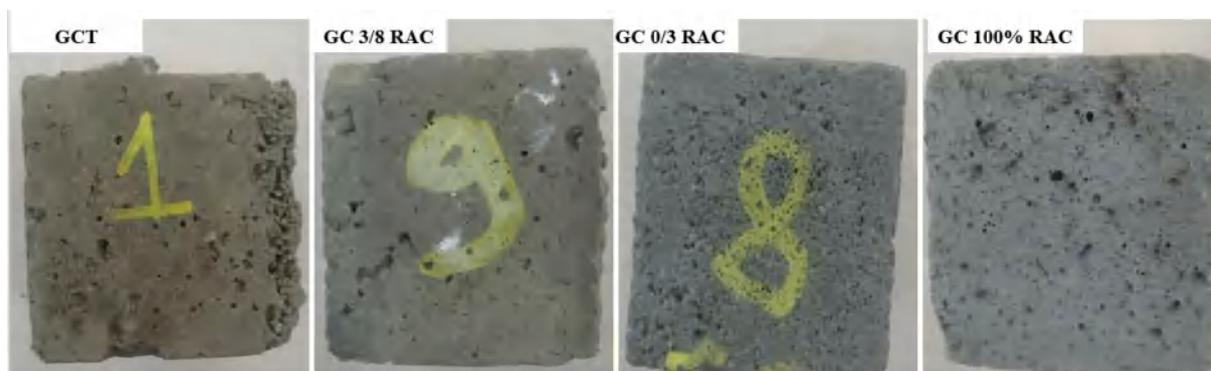


Figure V.29 : Aspect des éprouvettes avant cycle de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAC.

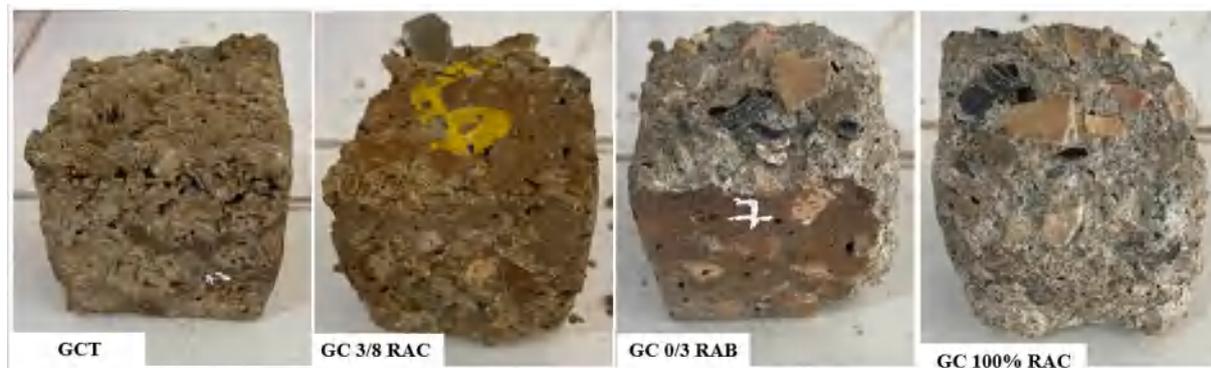


Figure V.30 : Aspect des éprouvettes après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAC.

À partir de la figure V.30, on peut observer une dégradation de surface des spécimens après les 300 cycles de gel/dégel. De nombreuses fissures sont apparues, une grande partie du mélange s'est écaillée et a conduit les granulats à être directement exposés à l'air ambiant. Cette dégradation est importante et à des degrés croissants dans les mélanges GC 0/3 RAC et GC 100 % RAC par rapport au GCT. Cela implique donc une diminution de la masse des échantillons.

V.2.12 Corrélation entre les propriétés du GC à base des RAC

V.2.12.1 Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression

La figure V.31 illustre la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression à travers l'échantillon des GC fabriqués avec les RAC à l'âge de 28 jours.

L'augmentation de la résistance à la compression correspond à une augmentation du module d'élasticité. On peut observer une bonne corrélation linéaire avec $R^2 = 0,95$ entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.

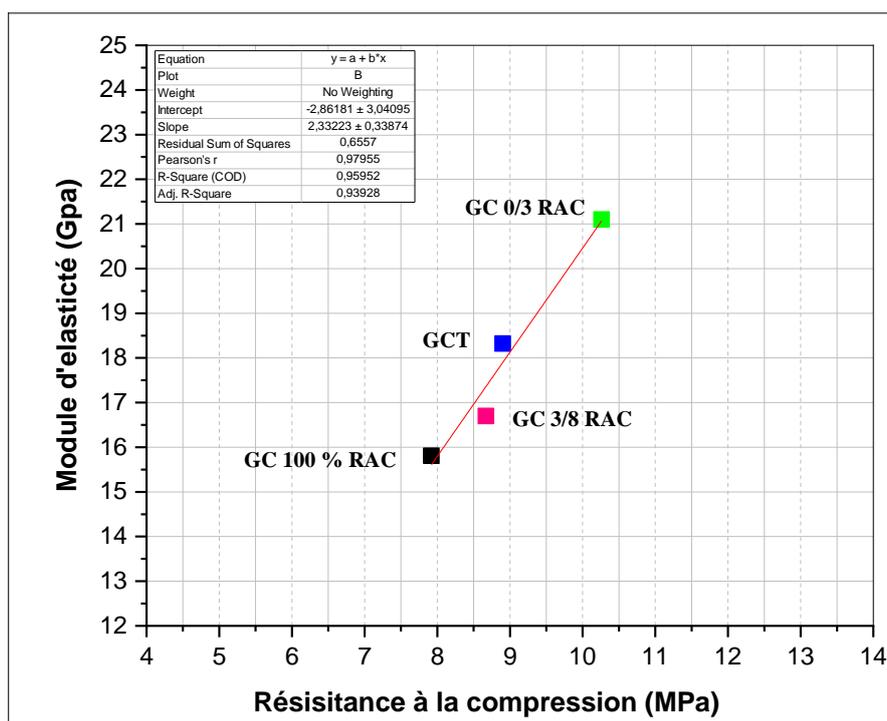


Figure V.31 : Corrélation établie entre le module d'élasticité et la résistance à la compression des GC à base de granulats de RAC.

V.2.12.2 Corrélation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et l'auscultation dynamique

L'auscultation dynamique est représentée en fonction du module d'élasticité et de la résistance à la compression sur la figure V.32. D'après la figure, on observe une très bonne corrélation linéaire entre le module d'élasticité et l'auscultation dynamique et entre la résistance à la compression et l'auscultation dynamique, avec $R^2 = 0,98$ et $R^2 = 0,93$ respectivement. Cette relation suggère que l'augmentation de la vitesse d'auscultation sonique conduit à une augmentation du module d'élasticité et de la résistance à la compression.

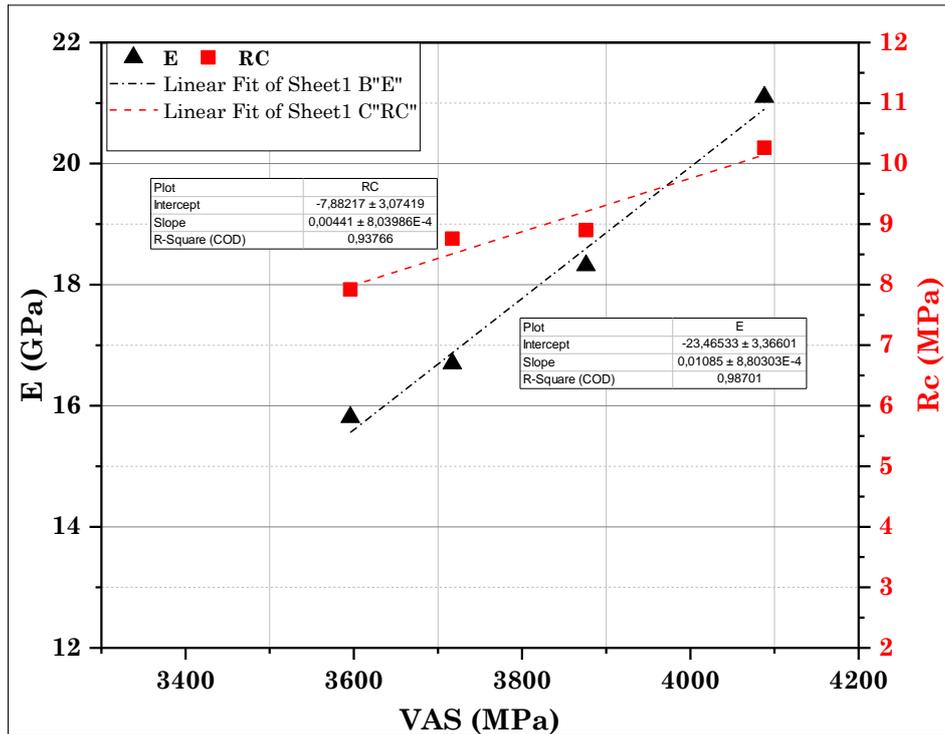


Figure V.32 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et le VAS des GC à base de granulats de RAC.

V.2.12.3 Corrélation entre la conductivité thermique et la porosité

La figure V.33 illustre la relation entre la conductivité thermique et la porosité à travers l'échantillon des GC fabriqués avec les RAC à l'âge de 28 jours. Une forte corrélation a été établie entre la conductivité thermique et la porosité, avec $R^2 = 0.86$. Ce qui nous permet de prédire la conductivité thermique du béton à partir de la mesure de la porosité. Plus la porosité est élevée, plus les valeurs de conductivité thermique sont faibles, et inversement, ce qui suggère une corrélation directe entre les deux.

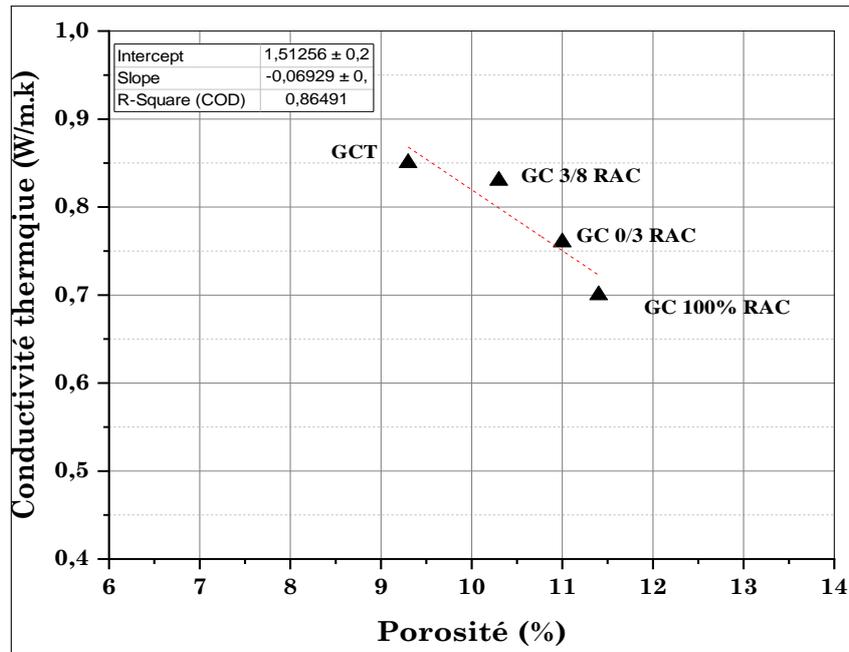


Figure V.33 : Corrélation établie entre la conductivité thermique et la porosité des GC à base de granulats de RAC.

V.2.13 La microstructure

La microstructure du GC produit avec RAC a été examinée par analyse MEB après 90 jours de durcissement et les résultats sont présentés sur la figure V.34.

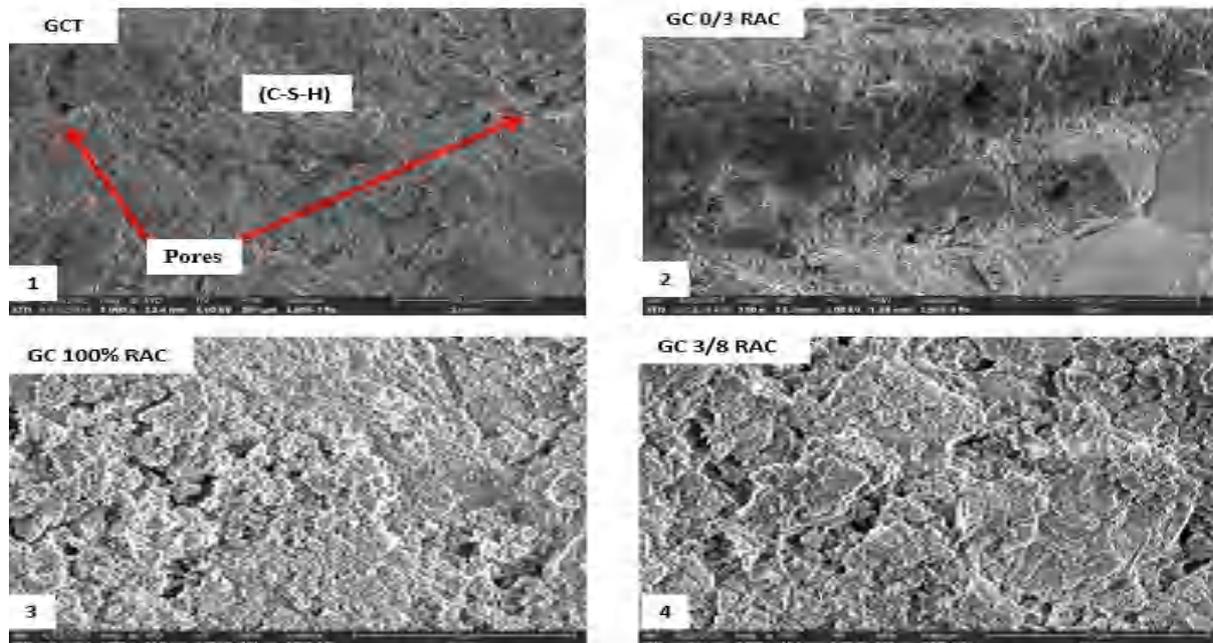


Figure V.34 : Examen au MEB des mélanges GC.

Les résultats démontrent que le mélange GC 0/3 RAP présente une meilleure liaison entre le granulats recyclés (RCA) et la nouvelle pâte de ciment (figure V.27 (1)) par rapport au mélange GCT (figure V.27 (2)) et aux autres mélanges, améliorant ainsi l'adhésion et mettant en évidence la capacité d'auto-cimentation du sable RAP. Ce mélange exhibe également une structure plus compacte et fermée. Ce qui conduit à des propriétés mécaniques améliorées.

Le mélange GC 3/8 RAP et GC 100 % RAP présentant une structure compacte et moins poreuse est comparable avec le mélange GCT, ce qui confirme aux granulats recyclés une meilleure qualité de fonctionnement et la capacité d'auto-cimentation. Ce résultat est cohérent avec les recherches antérieures d'autres chercheurs [63, 95, 110].

V.3 Effet de l'emploi de RAP sur le comportement des GC

V.3.1 Essai Proctor modifié

La figure V.35 représente la teneur en eau et la densité sèche des mélanges GC à base de RAP étudiés.

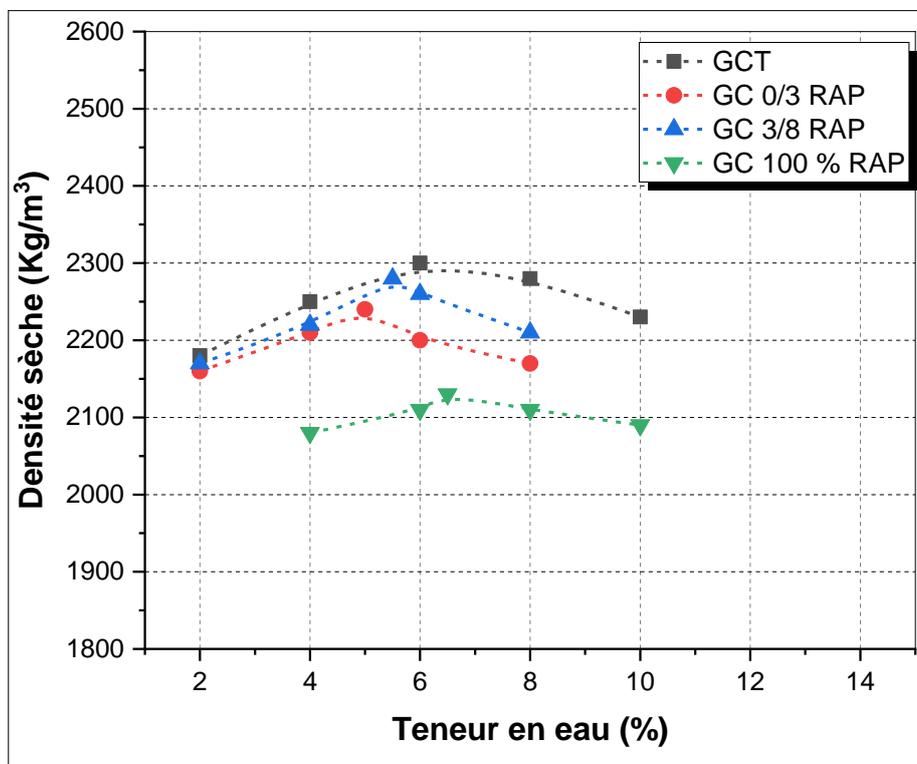


Figure V.35 : Optimisation de la teneur en eau optimale des GC.

On peut constater que l'incorporation de RAP sous forme de gravier et de sable réduit linéairement la teneur en eau et la densité sèche, sauf que la teneur en eau augmente légèrement pour le mélange GC 100 % RAP. Étant donné que les granulats RAP sont recouverts d'une fine couche de bitume vieilli, on peut s'attendre à une diminution de la teneur en eau du mélange avec l'incorporation de RAP. Cette affirmation est en parfaite adéquation avec les résultats des études antérieures portant sur les propriétés des mélanges contenant du RAP [16, 125, 219].

V.3.2 Résistance à la compression

La figure V.36 représente la résistance à la compression des mélanges GC à base de RAP étudiés.

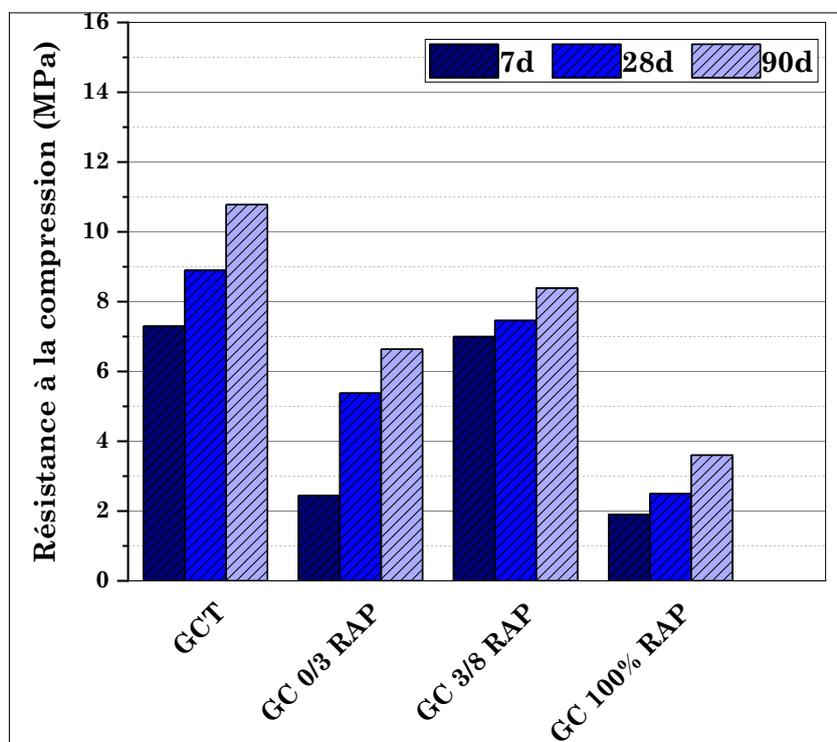


Figure V.36 : Résistance à la compression des GC.

Les résultats indiquent que la résistance en compression des GC recyclés (GCR) ne dépasse pas 7 MPa, comparée à celle de leur GCT qui atteint 9 MPa à 28 jours. À l'âge de 90 jours, la résistance du GC témoin augmente à 11 MPa. Il est notable que l'incorporation de gravier de RAP 3/8 et de sable de RAP 0/3 diminue la résistance à la compression d'environ 22 % et 38 %, respectivement à 90 jours, par rapport au GCT. En outre, les mélange GC 100 % RAP donnent la résistance la plus faible par rapport aux autres mélanges.

Singh et al.[119] ont observé une réduction plus marquée de la résistance à la compression dans le cas des mélanges contenant des granulats FRAP par rapport aux mélanges contenant des granulats CRAP.

Il est en effet probable que la quantité d'ancien bitume qui enrobe les granulats soit la principale cause de cette différence de résistance. Ce résultat est confirmé par [119], [16]. Fedrigo et al.[220] ont confirmé que l'utilisation de granulats d'RAP dans les mélanges de GC entraîne une diminution de la résistance, probablement pour trois raisons :

- a) En raison de leur surface arrondie, les particules de granulats recouvertes de liant bitumineux ont réduit l'emboîtement entre les granulats, permettant ainsi une déformation plus importante ;
- b) Le liant bitumineux recouvrant les particules de granulats réduisait la surface disponible pour être recouverte de ciment, empêchant ainsi la génération de liaisons cimentaires entre le ciment et les granulats ;
- c) Le mastic composé de fines liaisons avec un liant bitumineux avait une résistance et une rigidité inférieures par rapport aux particules d'agrégat uniquement et pourrait avoir échoué sous le chargement.

V.3.3 Résistance à la traction

Les résultats de la résistance à la traction à différents âges (7, 28 et 90 jours) pour les différents mélanges GC sont présentés dans la figure V.37.

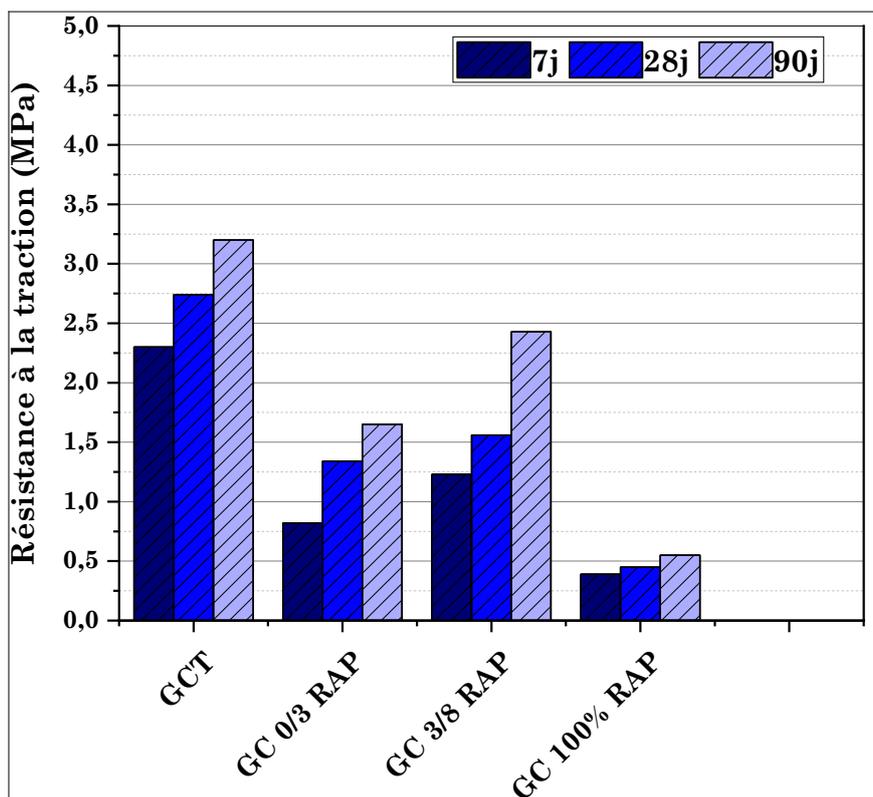


Figure V.37 : Résistance à la traction des GC.

Les résultats démontrent qu'une réduction de la résistance à la traction des GC recyclés par rapport au mélange GCT, à 28 jours, a été notée, que la diminution est d'ordre 24 % et 48 % pour les mélanges GC 3/8 RAP et GC 0/3 RAP, respectivement. Cette forte diminution de la résistance lors de l'incorporation d'agrégats FRAP peut être attribuée à la formation d'une matrice de mortier cimentaire de moindre qualité en raison de la présence substantielle d'asphalte et de poussière dans les agrégats FRAP. Les mélanges GC 100 % RAP donnent la résistance la plus faible par rapport aux autres mélanges. Ce résultat est confirmé par [119], [16].

V.3.4 Indice de CBR

Les figures V.38 représentent les valeurs de l'indice CBR des mélanges GC à base de RAP étudiés.

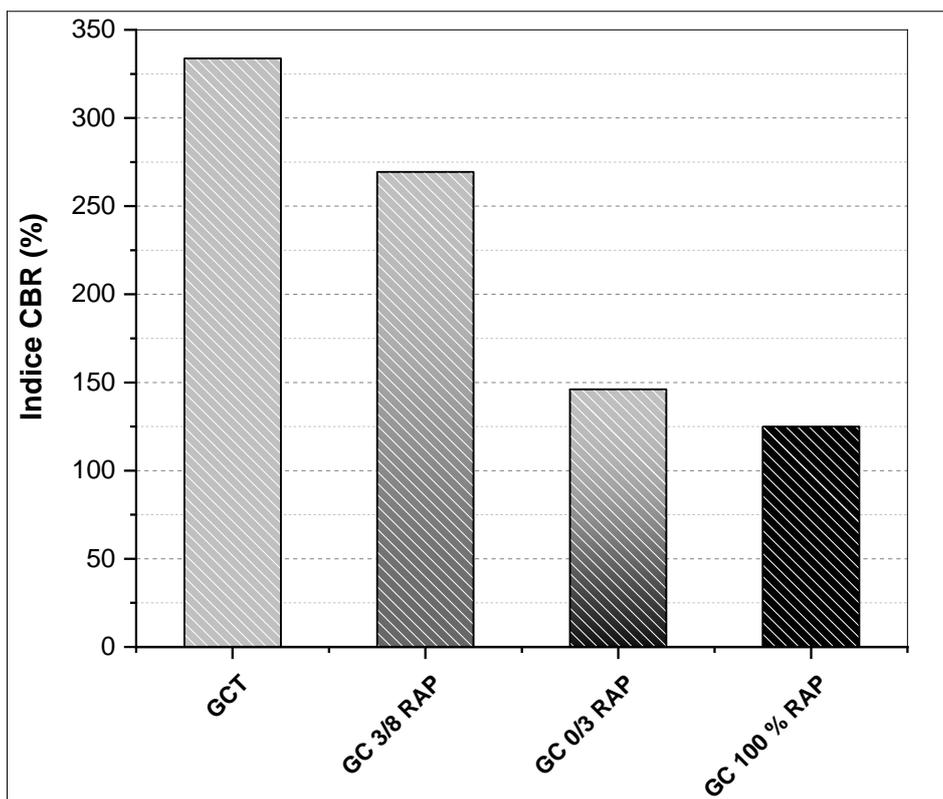


Figure V.38 : Indice de CBR des GC.

La valeur CBR du mélange GCT est de 333 %. De plus, l'incorporation de RAP sous forme de gravier 3/8 (mélange GC 3/8 RAP) entraîne une réduction de la valeur CBR jusqu'à 19 %, à partir d'une valeur CBR du GCT. Cette réduction atteint jusqu'à 56 % lorsque les RAP sont ajoutés sous forme de sable (mélange GC 0/3 RAP). Par ailleurs, le remplacement total de NA par 100 % de RAP (mélange GC 100 % RAP) entraîne également une baisse significative, atteignant environ 63 %.

La présence de l'ancien bitume sur les granulats recyclés semble être la principale raison de cette réduction de l'indice CBR. Cela suggère qu'une adhérence moins efficace entre la nouvelle pâte de ciment et l'ancienne couche de bitume affecte la capacité du béton à résister aux déformations, ce qui se traduit par l'indice CBR plus faible.

Pradhan et al [140] ont montré que la diminution de la valeur CBR due à l'ajout de RAP peut s'expliquer par la densité des granulats RAP qui est inférieure à la NA, ce qui conduit à une diminution de la résistance.

Les valeurs CBR obtenues se situaient entre 124 et 333 %, ce qui satisfaisait aux exigences minimales fixées par les autorités routières locales d'Australie pour un matériau de sous-couche atteignant 80 %.

V.3.5 Module d'élasticité

Le module d'élasticité du GC varie de la même manière que la résistance à la compression et les résultats sont présentés dans la figure V.39.

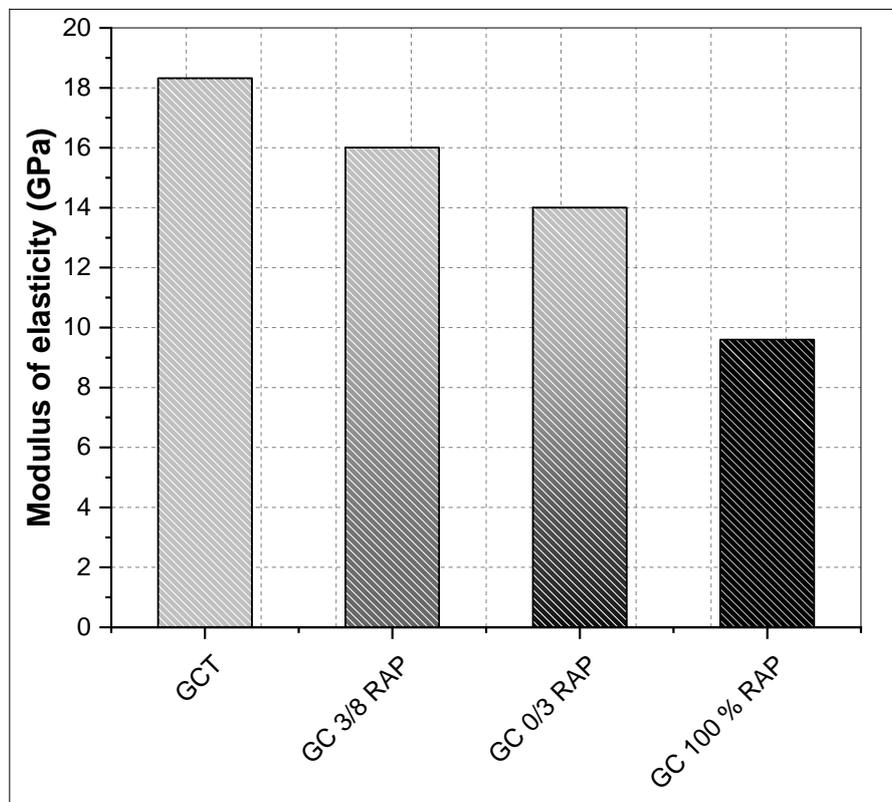


Figure V.39 : Module d'élasticité des GC.

Il est notable qu'il y a une diminution du module d'élasticité lorsqu'on substitue des NA par des RAP. Cette diminution est principalement influencée par le sable recyclé par rapport au gravier recyclé. Le remplacement du sable ordinaire par 100 % de sable recyclé provoque une diminution de 24 %, tandis que le remplacement du gravier ordinaire (fraction 3/8) par 100 % de graviers recyclés bitumineux entraîne également une baisse, atteignant environ 13 %.

Le remplacement total des NA par 100 % des RAP entraîne également une baisse significative, atteignant environ 48 %.

La présence de l'ancien bitume sur les granulats recyclés semble être la principale raison de cette réduction du module d'élasticité. Cela suggère qu'une adhérence moins efficace entre la nouvelle pâte de ciment et l'ancienne couche de bitume affecte la capacité du béton à résister aux déformations, ce qui se traduit par un module d'élasticité plus faible.

Settari et al [16] ont montré qu'il semble que le module d'élasticité soit influencé par la nature des granulats. Lorsque des granulats ordinaires sont utilisés, le béton présente une plus grande rigidité, ce qui se traduit par un module d'élasticité plus élevé. En revanche, lorsque des granulats recyclés sont incorporés, le béton devient plus élastique, présentant ainsi un module d'élasticité plus faible.

V.3.6 Vitesse d'auscultation sonique (VAS)

La figure V.40 représente les différentes valeurs de VAS pour les différents GC à 28 jours d'âge.

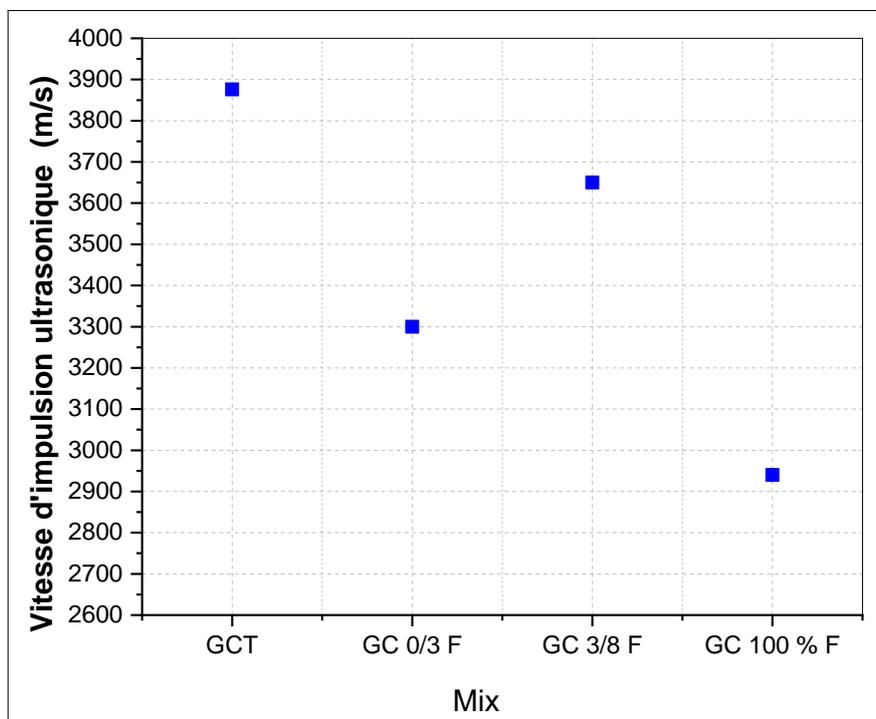


Figure V.40 : Auscultation dynamique des GC.

L'utilisation de RAP sous forme de gravier (3/8), de sable (0/3) ou en remplacement total de NA dans les mélanges GC a entraîné une diminution des valeurs VAS. Les valeurs de l'UPV des mélanges GC ont diminué en raison d'une adhérence réduite. En effet, les RAP peuvent présenter une adhérence moins satisfaisante à la pâte de ciment par rapport aux granulats naturels. Cette situation peut entraîner une réduction de la résistance du béton ainsi qu'une augmentation du phénomène de fissuration. Cette constatation est cohérente avec les recherches antérieures [16].

V.3.7 Porosité

La figure V.41 est représentée de l'effet du RAP sur la porosité pour les différents mélanges du GC à 28 jours.

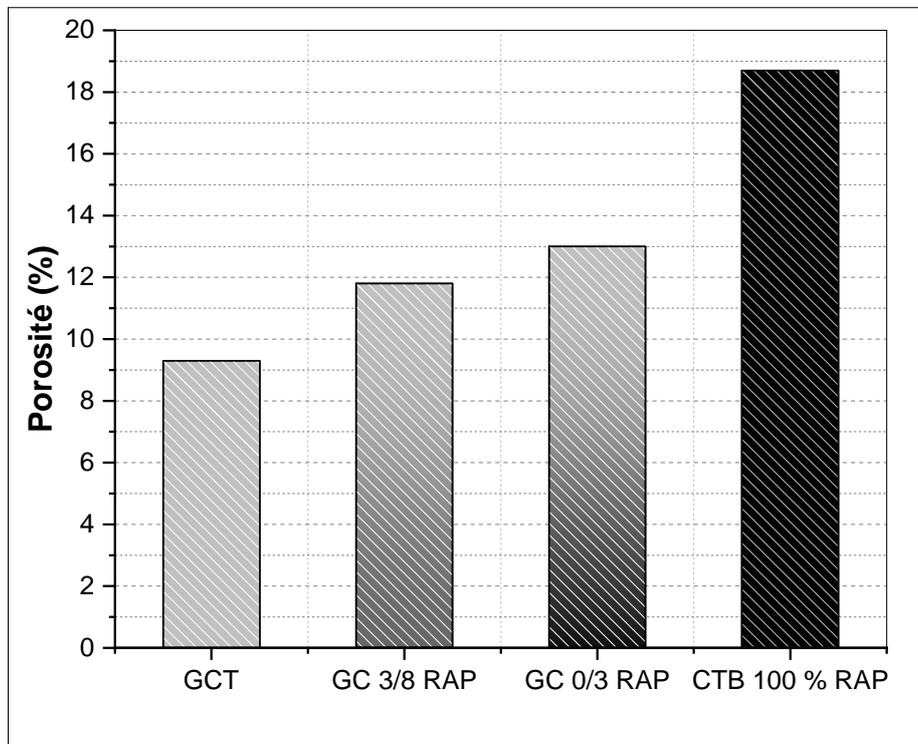


Figure V.41 : la porosité des GC à base de granulats de RAP.

L'incorporation du RAP a un effet négatif sur la porosité des GC. On observe que lorsqu'on intègre le RAP sous forme de gravier (3/8), de sable (0/3), ou en remplacement total des NA dans les mélanges de GC, cela conduit à une augmentation des valeurs de porosité. Cette augmentation de la porosité peut être liée aux caractéristiques intrinsèques du RAP ou à des problèmes d'adhérence entre le RAP et les autres composants du mélange. Ce résultat est confirmé par [16].

V.3.8 Conductivité thermique

La figure V.42 présente les résultats du coefficient de conductivité thermique du GC à base de RAP.

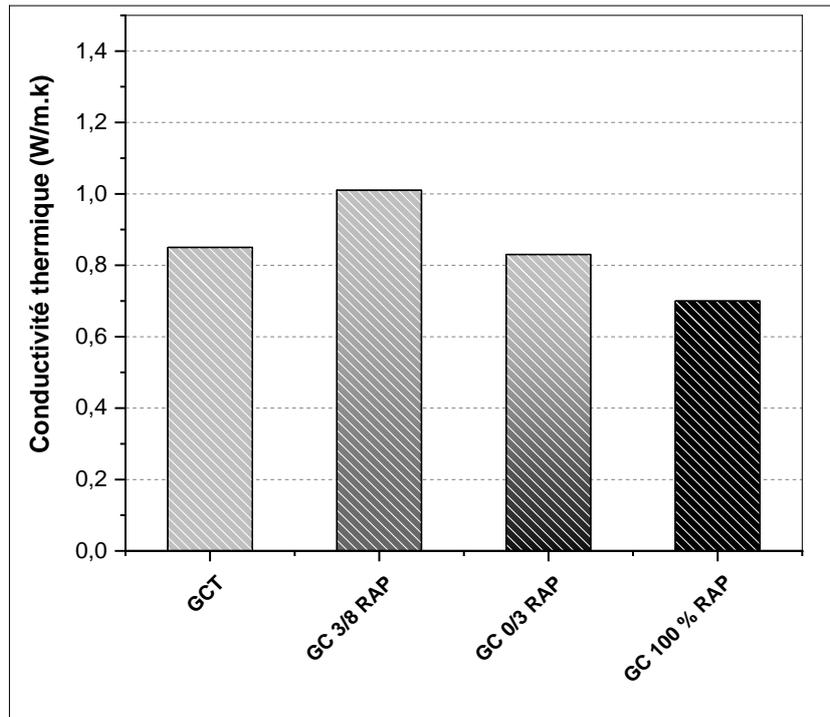


Figure V.42 : Conductivité thermique des GC à base de granulats de RAP.

Les résultats ont indiqué que la conductivité thermique des GC 100 % RAP, GC 0/3 RAP, GC 3/8 RAP et GCT est de 0.73, 0.83, 1.01 et 0.85 W/m.K. La tendance générale observée est que la conductivité thermique du GC diminue avec l'incorporation de RAP sous forme de sable et surtout avec un remplacement total des agrégats naturels (NA) par des RAP. Cependant, l'incorporation de gravier recyclé (3/8 RAP) semble augmenter la valeur de la conductivité thermique. Cette différence peut être due à divers facteurs, tels que la taille des granulats recyclés, leur distribution granulométrique, leur conductivité thermique intrinsèque et d'autres propriétés physiques du matériau.

V.3.9 Absorption par immersion

La figure V.43 illustre l'influence des granulats RAP sur l'absorption d'eau par immersion de divers mélanges GC après 28 jours de durcissement.

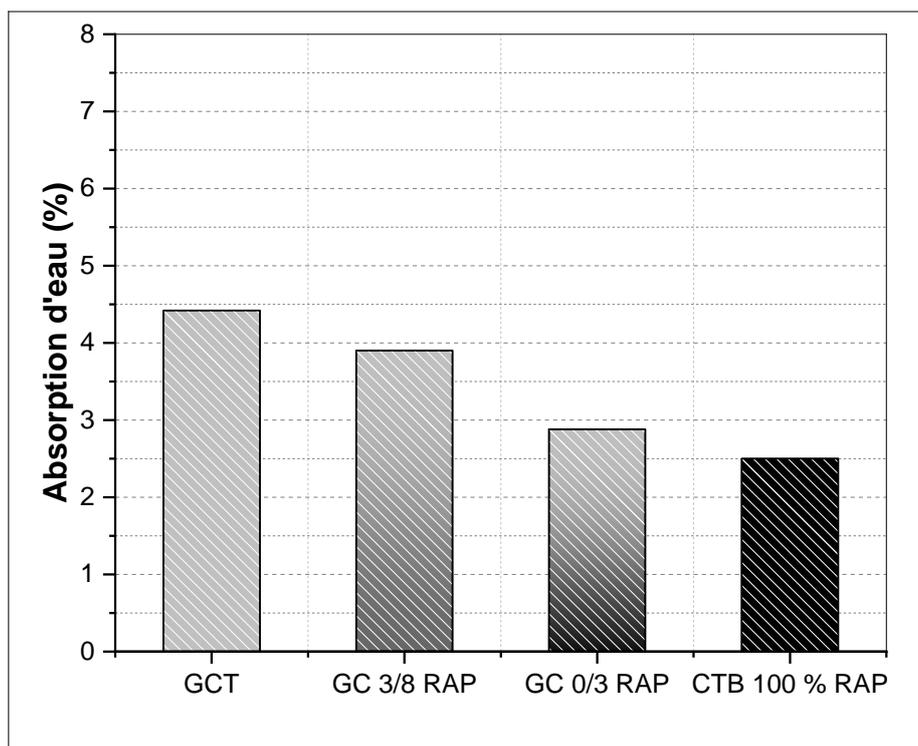


Figure V.43 : Absorption d'eau des GC.

Il est pertinent de noter que l'emploi de granulats RAP réduisait l'absorption d'eau du GC. L'absorption d'eau du mélange GCT était de 4,42 %, mais elle a diminué à 12 % en remplaçant 100 % de granulats naturels grossiers (fraction 3/8 seulement) par des RAP. En incorporant 100 % de sable RAP, la demande en eau a encore baissé, atteignant 35 %. De plus, le remplacement total des NA par des GRAP a réduit l'absorption jusqu'à 43 %. La réduction de l'absorption d'eau lors de l'incorporation de granulats RAP peut être attribuée principalement à la présence d'une couche d'asphalte autour des granulats RAP, plutôt qu'à une absorption intrinsèque inférieure des granulats RAP par rapport aux granulats naturels. Ce résultat est confirmé par [119].

V.3.10 Résistance à l'abrasion

La figure V.44 illustre l'effet de l'incorporation des granulats RAP sur la résistance à l'abrasion de divers mélanges GC après 28 jours de durcissement.

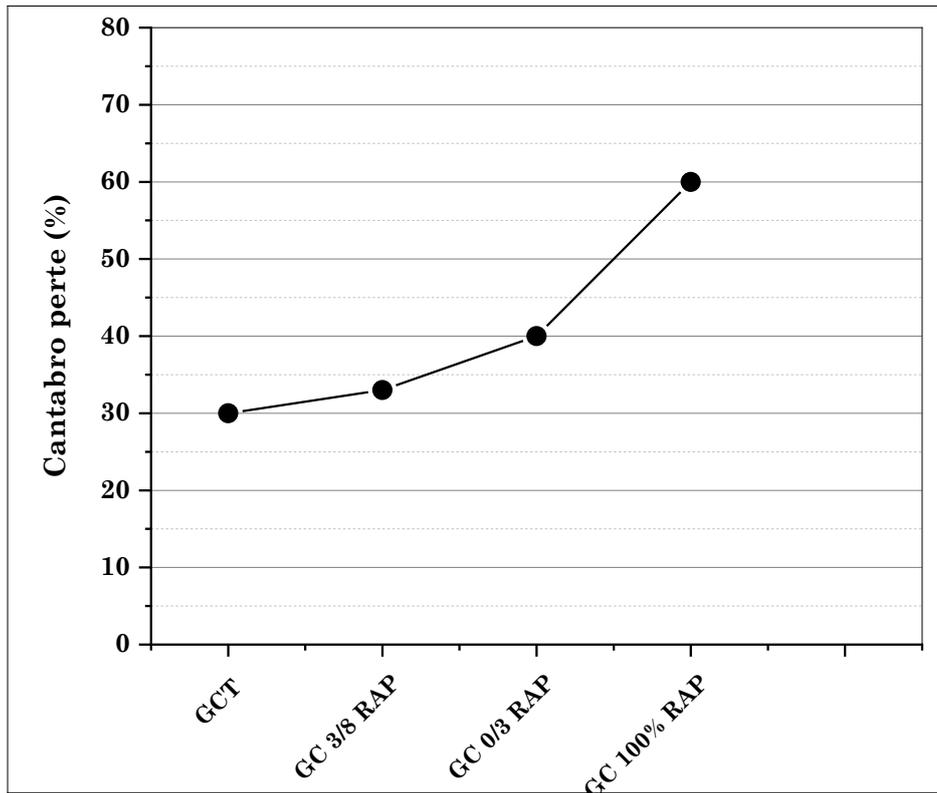


Figure V.44 : La résistance à l'abrasion des GC à base de granulats de RAP.

Comme anticipé, le remplacement des NA par des RAP a provoqué une augmentation de la perte de masse. La perte de masse s'est avérée être plus significative pour les mélanges GC 0/3 RAP que pour les mélanges GC 3/8 RAP. Par exemple, la réduction de la résistance à l'abrasion du GC lors du remplacement complet des fines était de 33 %, tandis que pour le remplacement intégral à 100 % des granulats naturels grossiers (fraction 3/8 seulement) par des granulats CRAP, la réduction était de 10 %. Le remplacement total des NA par des RAP (mélange GC 100 % RAP) entraîne également une réduction significative de la résistance à l'abrasion. La réduction de la résistance à l'abrasion résulte de la présence d'une couche d'asphalte autour des granulats RAP, ce qui engendre une faible adhérence entre les granulats RAP et la matrice cimentaire. Ce résultat est confirmé par d'autres chercheurs [119].

V.3.11 Gel/dégel

Les résultats des pertes de masse après 300 cycles de gel/dégel des éprouvettes de GC avec les RAP sont illustrés sur la figure V.45.

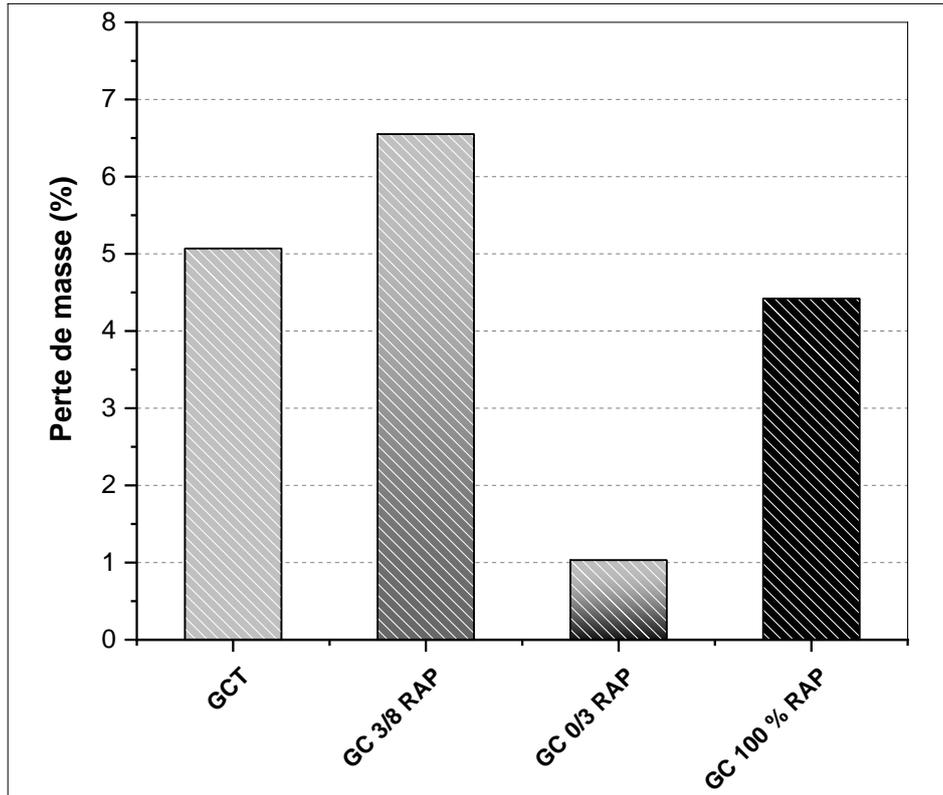


Figure V.45 : Perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAP.

D'après les résultats obtenus, on observe que les valeurs de la perte de masse des GC qui contiennent les RAP sont inférieures à celles des GCT. La perte de masse après 300 cycles de gel/dégel des GCT, GC 3/8 RAP, GC 0/3 RAP et GC 100 % RAP est de l'ordre de 5,07 %, 4,6 %, 1,03 % et 4,42 % respectivement. La perte de poids est maximale pour GC avec des granulats naturels et diminue avec une fraction croissante de granulats grossiers recyclés et de granulats fins recyclés.

Plusieurs chercheurs [144, 221] ont montré que la durabilité au gel et au dégel a eu tendance à s'améliorer considérablement avec l'incorporation de granulats RAP.

Examen visuel des éprouvette

Un examen visuel des éprouvettes des GC avant et après 300 cycles de gel-dégel est présent sur les figures V.47 et IV.48.

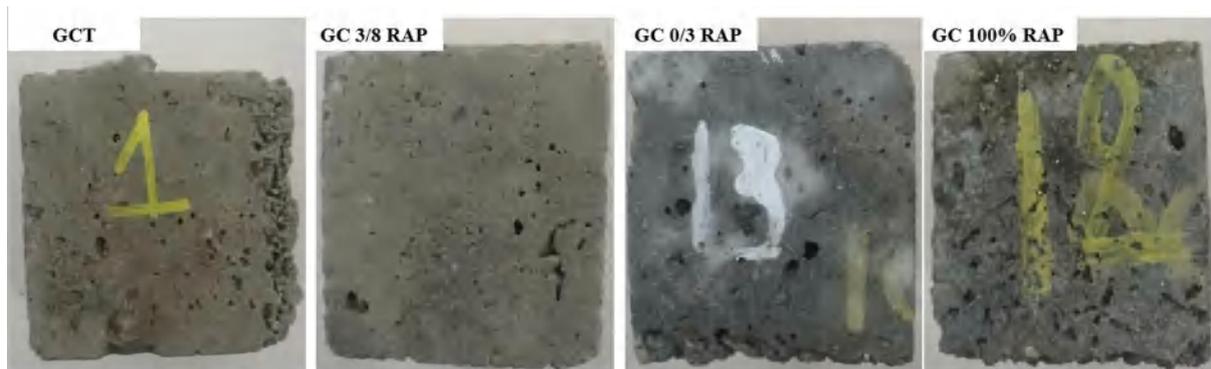


Figure V.46 : Aspect des éprouvettes avant cycle de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAP.

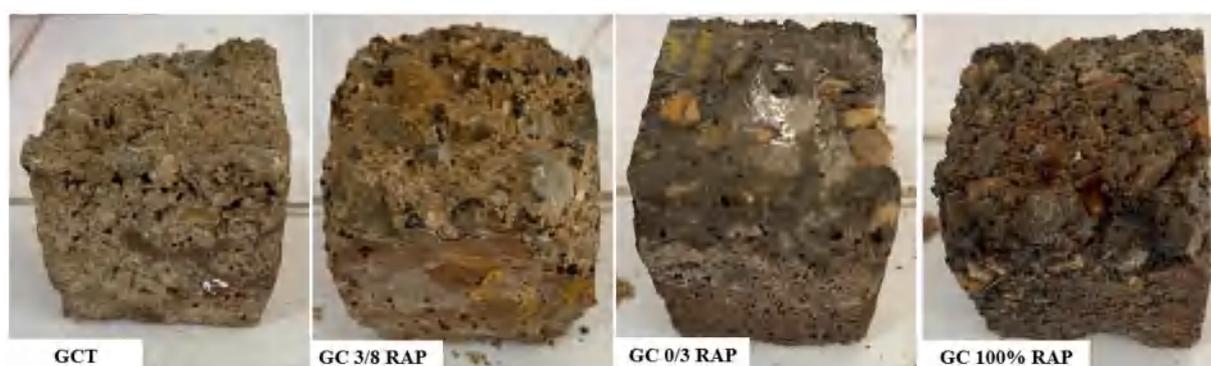


Figure V.47 : Aspect des éprouvettes après 300 cycles de gel/dégel des différents GC à base de granulats de RAP.

On constate que les éprouvettes (GC 3/8 RAP ; GC 0/3 RAP et GC 100 % RAP) ont subi une faible dégradation par rapport aux GCT, à cause de la faible absorption d'eau des RAP par rapport aux NA. On peut conclure que le mélange qui contient les RAP est plus durable vis-à-vis de l'effet cyclique gel/dégel.

V.3.12 Corrélation entre les propriétés du GC

V.3.12.1 Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression

Une corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression a été montrée sur la figure V.49. Le module d'élasticité augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression et vice-versa.

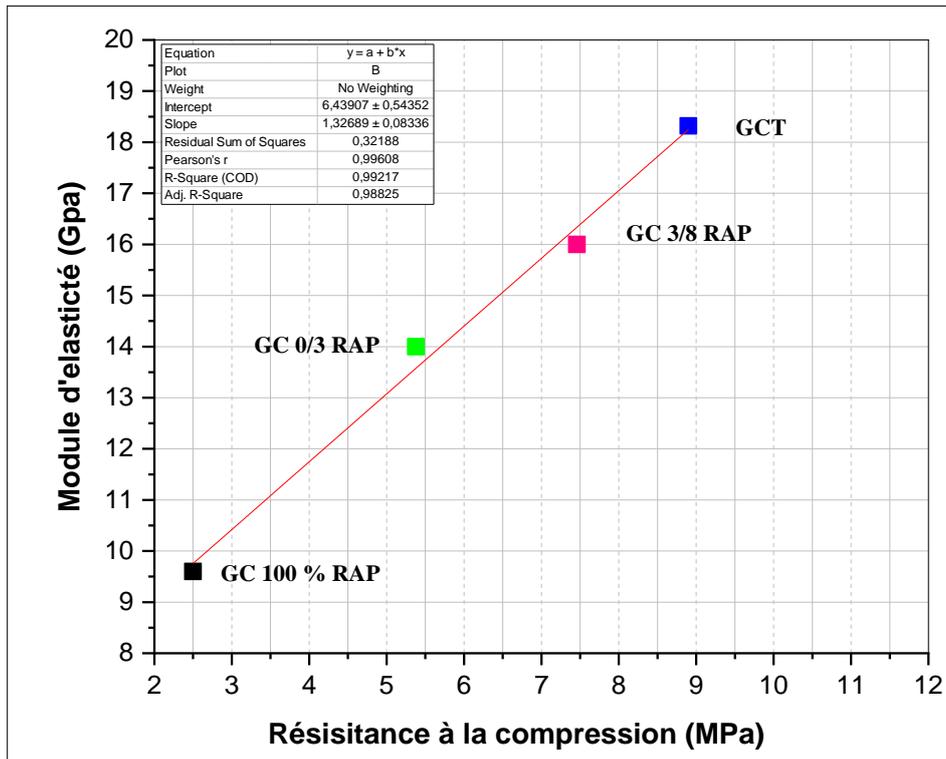


Figure V.48 : Corrélation établie entre le module d'élasticité et la résistance à la compression des GC à base de granulats de RAP.

V.3.12.2 *Corrélation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et l'auscultation dynamique*

L'auscultation dynamique est représentée en fonction du module d'élasticité et de la résistance à la compression sur la figure V.50. D'après la figure, on observe une très bonne corrélation linéaire entre le module d'élasticité et l'auscultation dynamique et entre la résistance à la compression et l'auscultation dynamique, avec $R^2 = 0.97$ et $R^2 = 0.99$ respectivement. Cette relation suggère que l'augmentation de la vitesse d'auscultation sonore conduit à une augmentation du module d'élasticité et de la résistance à la compression.

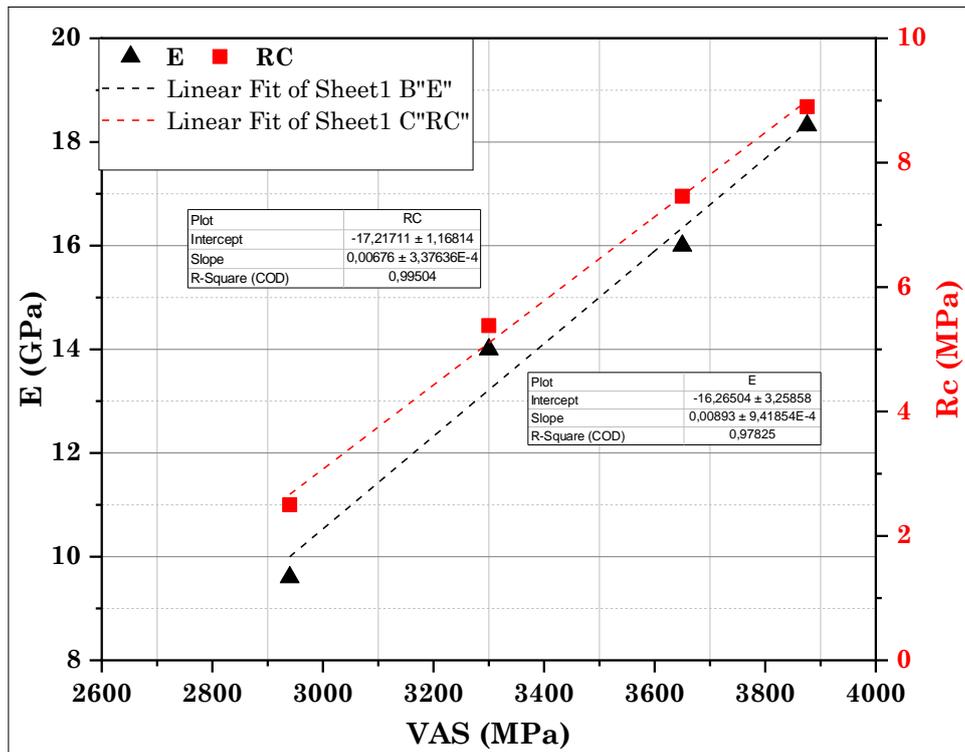


Figure V.49 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et les VAS des GC à base de granulats de RAP.

V.3.12.3 *Corrélation entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la porosité*

La porosité est représentée en fonction du module d'élasticité et de la résistance à la compression sur la figure V.51. D'après la figure, on observe une très bonne corrélation linéaire entre le module d'élasticité et la porosité et entre la résistance à la compression et la porosité, avec $R^2 = 0.98$ et $R^2 = 0.95$ respectivement. Cette relation suggère que l'augmentation de la porosité conduit à une diminution du module d'élasticité et de la résistance à la compression.

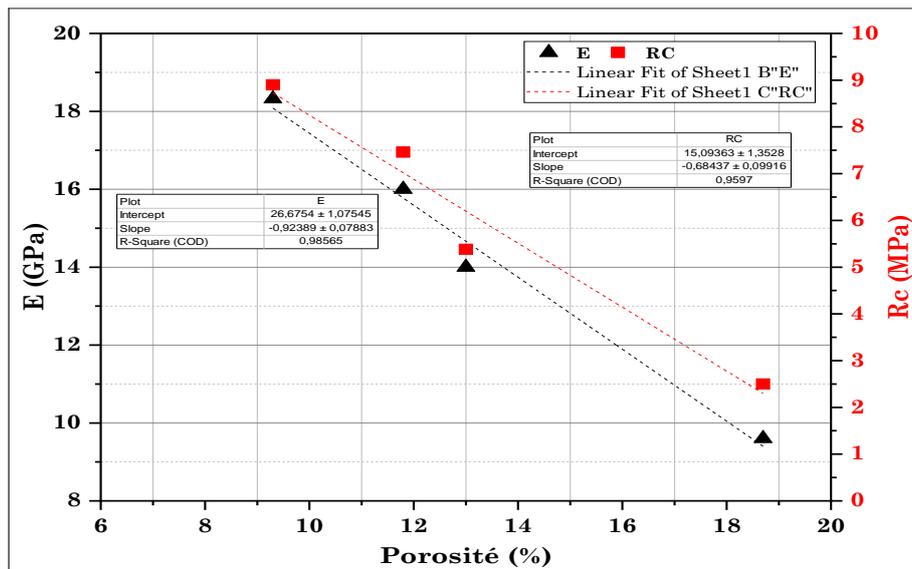


Figure V.50 : Corrélation établie entre le module d'élasticité, la résistance à la compression et la porosité des GC à base de granulats de RAP.

V.3.13 La microstructure

La microstructure du GC produit avec RAP a été examinée par analyse MEB après 90 jours de durcissement et les résultats sont présentés sur la figure V.52.

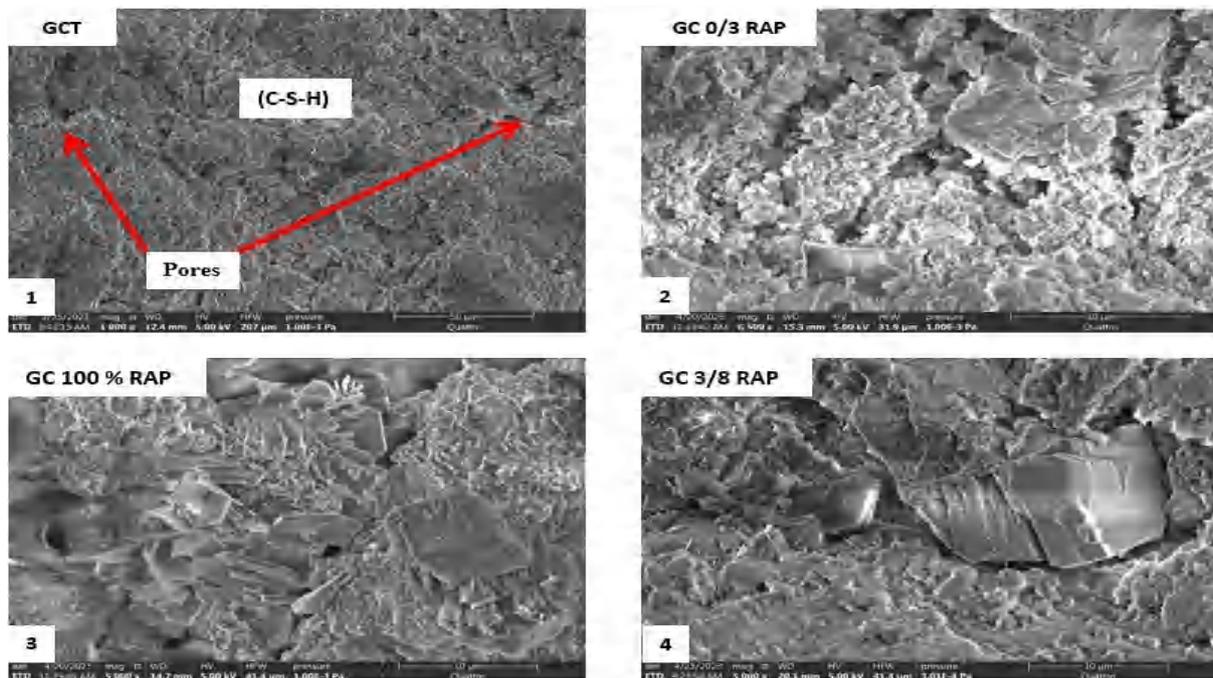


Figure V.51 : Examen au MEB des mélanges GC.

La zone de transition interfaciale (ITZ) entre les granulats naturels et la matrice cimentaire (figure V.52 (1)) s'est avérée plus résistante et plus dense que l'ITZ entre les granulats

CRAP et la matrice cimentaire (figure V.52 (4)) et beaucoup plus résistant que l'ITZ formé entre les granulats grossiers naturels et la matrice fine RAP (figure V.52 (2)). L'ITZ dans le mélange GC 100 % RAP est la plus faible et la moins dense en raison de la faible liaison entre les granulats de RAP et la matrice cimentaire. C'est la principale raison (présence d'un revêtement asphaltique). D'autres chercheurs [118, 119] rapportent que la microstructure du béton RAP grossier était plus dense que celle du béton RAP fin ; suggérant ainsi une interconnexion améliorée des particules et une réduction des vides dans le matériau. Cette caractéristique pourrait entraîner une résistance accrue et une performance globale améliorée. Ces observations sont cohérentes avec les caractéristiques mécaniques des mélanges GC et peuvent être utilisées pour expliquer leurs performances.

V.4 Étude comparative des performances de GC à base des trois types de granulats recyclés

La figure V.52 présente une comparaison des propriétés mécaniques des GC en fonction de la nature des granulats utilisés.

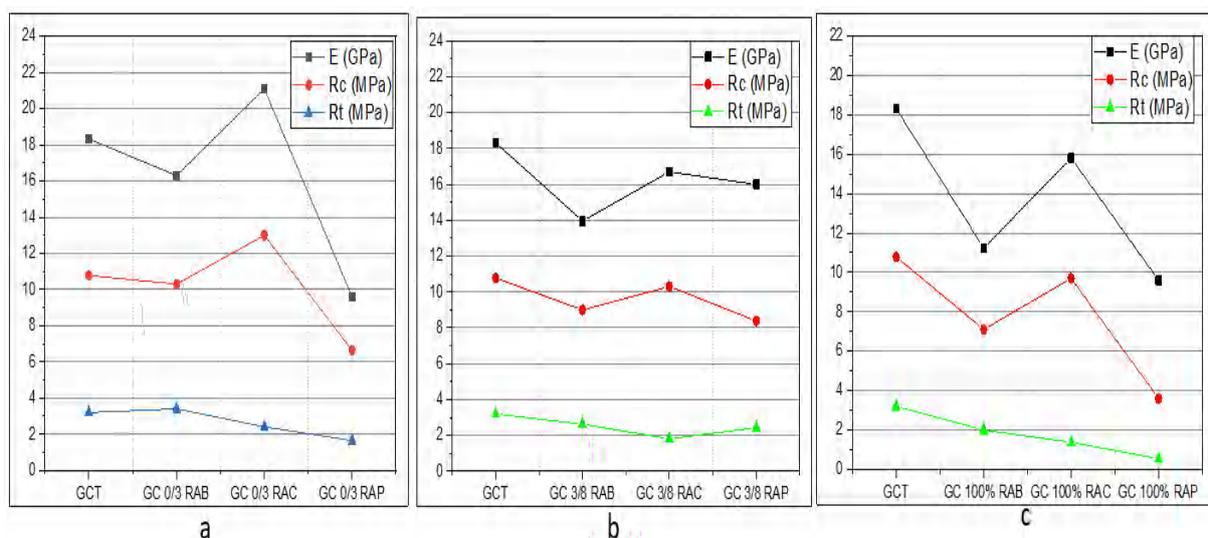


Figure V.52 : Figure V.52 : Comparaison des propriétés mécaniques des GC : (a) variable : sable ; (b) variable : gravier 3/8 ; (c) variable : nature des granulats.

D'après la figure présentée, l'utilisation de granulats de RAC, que ce soit sous forme de sable, de gravier 3/8 ou en remplacement complet, dans les GC confère les meilleures caractéristiques mécaniques en termes de résistance à la compression et de module d'élasticité, comparativement aux autres granulats recyclés tels que les granulats de RAB et les granulats de RAP. En revanche, l'utilisation de granulats de RAB, que ce soit sous forme de sable, de gravier 3/8 ou en

remplacement complet, dans les GC, donne les meilleurs résultats en termes de résistance à la traction par rapport aux autres types de granulats recyclés RAC et RAP.

L'utilisation de granulats recyclés de RAP conduit à une diminution des caractéristiques mécaniques des GC par rapport aux autres granulats recyclés, principalement en raison de la présence de bitume sur ces granulats, ce qui entraîne une faible adhérence entre la pâte de ciment et les granulats.

Les propriétés mécaniques des GC dépendent largement de la nature et de la distribution des agrégats qu'ils contiennent. Lorsque des granulats de RAC sont utilisés dans la fabrication du GC, ils peuvent améliorer sa résistance à la compression pour plusieurs raisons :

1. Effet de remplissage : les granulats recyclés comblent les vides entre les agrégats frais, réduisant ainsi la porosité du GC et améliorant sa densité, renforçant ainsi sa résistance à la compression.
2. Interlock mécanique : les granulats recyclés peuvent avoir des aspérités ou des formes qui s'imbriquent avec le ciment et les autres granulats, renforçant ainsi la structure globale du béton et augmentant sa résistance à la compression.
3. Réaction pouzzolanique : si le RAC contient des particules de ciment hydraté ou des fines, elles peuvent réagir chimiquement avec le ciment frais, formant des produits similaires à ceux de la pouzzolane, ce qui améliore la résistance à long terme du béton.

Quant aux granulats de RAB et à l'amélioration de la résistance à la traction, cela peut être attribué à plusieurs facteurs :

1. Forme et texture : les granulats de RAB peuvent avoir une forme et une texture qui facilitent le transfert des contraintes dans le GC, améliorant ainsi sa résistance à la traction.
2. Adhérence accrue : les granulats de RAB peuvent avoir une meilleure adhérence avec la matrice de ciment que certains autres types de granulats, renforçant ainsi la liaison entre les agrégats et le ciment et améliorant ainsi la résistance à la traction.
3. Moins de défauts : les granulats de RAB peuvent présenter moins de défauts ou de fissures que d'autres types de granulats, réduisant ainsi les points faibles dans la structure du GC et améliorant sa résistance à la traction.

La figure V.53 représente une comparaison des propriétés de durabilité des GC en fonction de la nature des granulats utilisés.

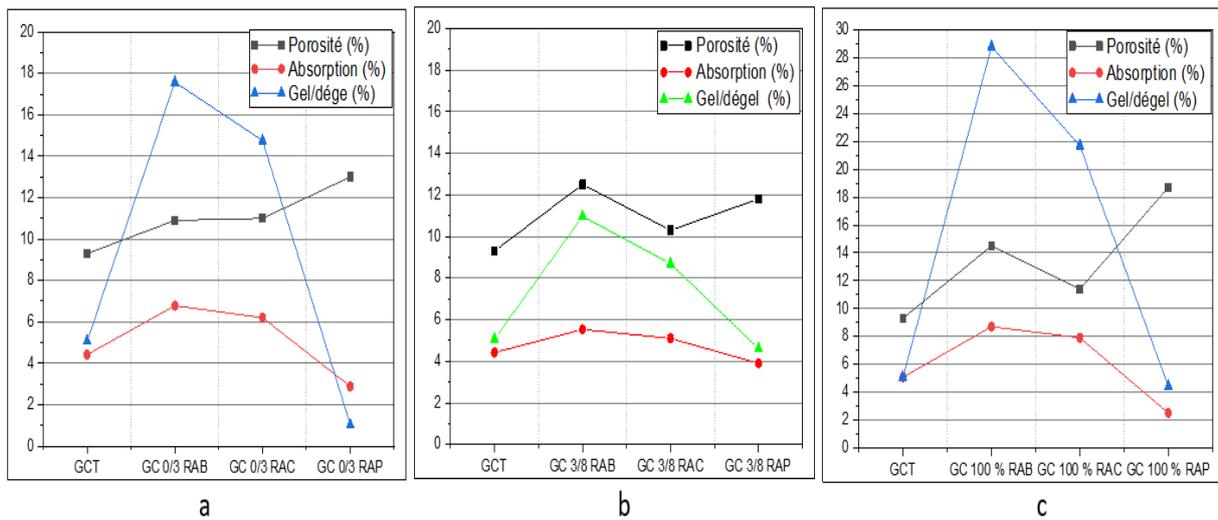


Figure V.53 : Comparaison des propriétés de durabilité des GC : (a) variable : sable ; (b) variable : gravier 3/8 ; (c) variable : nature des granulats.

D'après la figure présentée, l'utilisation de granulats de RAB dans les GC a entraîné une perte de masse significative en raison de l'exposition au gel/dégel, tandis que l'utilisation de granulats de RAP dans les GC a conduit à une meilleure résistance au gel/dégel par rapport aux autres types de granulats.

Une corrélation est observée entre l'absorption d'eau et la résistance au gel-dégel, où une absorption d'eau plus importante par les GC entraîne une perte de masse plus importante lors de l'exposition au gel/dégel.

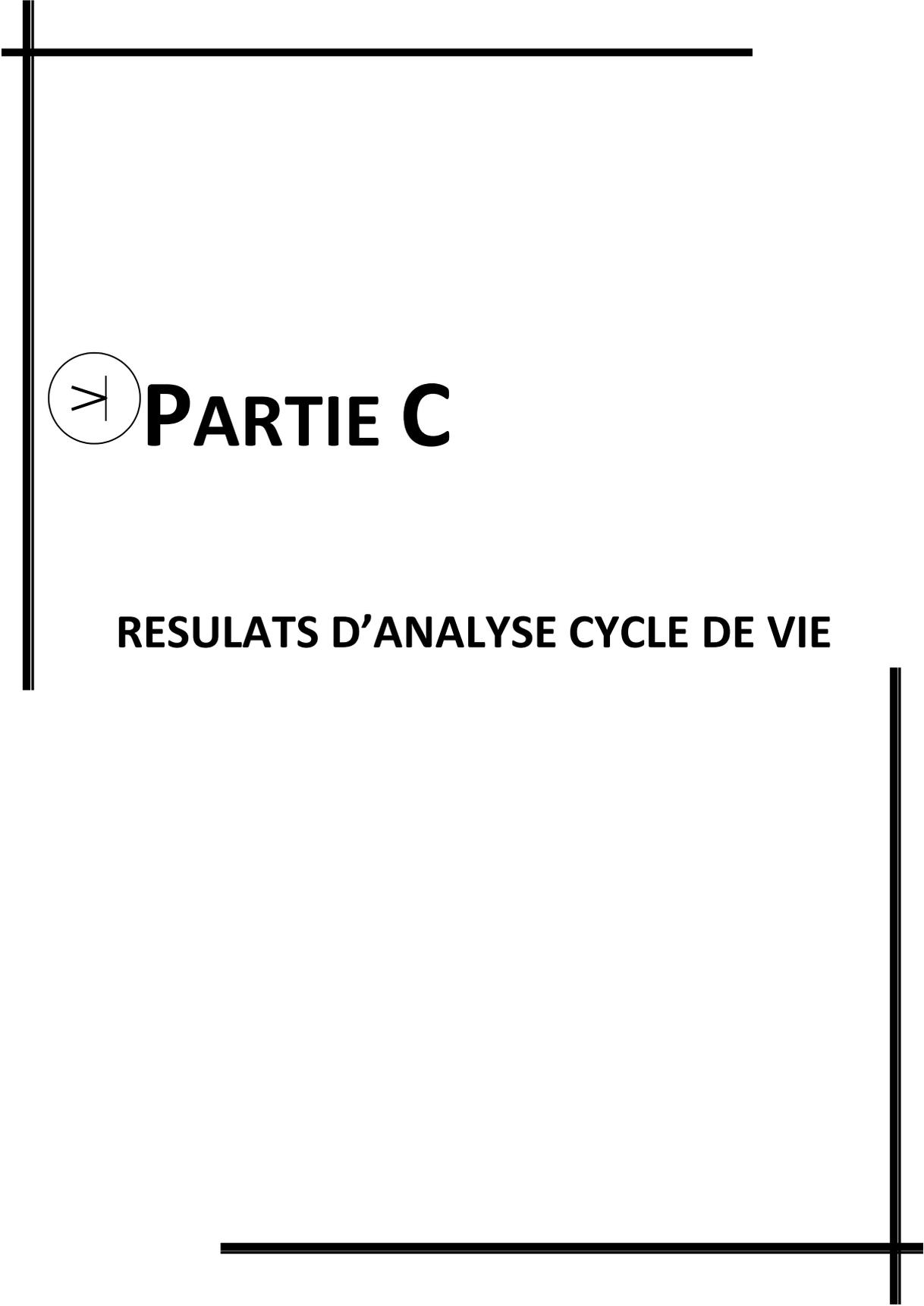
En conclusion, les mélanges contenant des granulats r de RAP semblent être plus durables face à l'effet du gel/dégel.

V.5 Conclusion

Les essais entrepris dans cette partie ont été conçus dans le but d'évaluer l'impact des granulats recyclés (RAB, RAC et RAP) utilisés en substitution du sable et du gravier 3/8, ainsi que leur remplacement total, sur les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des GC. Les résultats obtenus de cette étude expérimentale révèlent plusieurs observations significatives.

Premièrement, il est évident que l'emploi des granulats recyclés RAB et RAC produit des résultats comparables, voire parfois meilleurs, que ceux obtenus avec les granulats naturels en ce qui concerne les caractéristiques mécaniques des GC. En revanche, l'utilisation de granulats RAP entraîne une diminution des performances mécaniques des mélanges. En ce qui concerne la durabilité, l'emploi des granulats recyclés RAB, RAC et RAP montre une influence négative sur la structure poreuse et l'absorption des GC. Cependant, l'utilisation de granulats RAB conduit à une amélioration de la résistance à l'abrasion et de la conductivité thermique des GC. Par ailleurs, une amélioration de la résistance au gel-dégel des GC est observée lors de l'utilisation de granulats de RAP, tandis que l'utilisation de granulats de RAB et RAC entraîne une détérioration significative de cette propriété.

Enfin, les résultats des corrélations entre les propriétés des GC à l'état durci révèlent des relations cohérentes entre les divers paramètres étudiés, avec des coefficients acceptables ayant été obtenus. Ces corrélations renforcent la fiabilité des résultats et contribuent à une meilleure compréhension des interactions entre les différentes caractéristiques des mélanges.



PARTIE C

RESULTATS D'ANALYSE CYCLE DE VIE

VI. Chapitre VI Analyse cycle de vie des GC

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur l'application de l'analyse du cycle de vie (ACV) aux graves-ciments (GC). L'ACV est un outil crucial pour évaluer l'impact environnemental des matériaux de construction, jouant ainsi un rôle essentiel dans la promotion du développement durable dans le domaine de la construction routière. Nous commencerons par décrire le système étudié, en délimitant le champ de l'étude et en précisant l'unité fonctionnelle choisie pour cette analyse. Ensuite, nous passerons à l'inventaire du cycle de vie des GC, en examinant en détail les flux de matières et d'énergie liés à leur fabrication, leur utilisation et leur élimination. Après avoir établi l'inventaire, nous procéderons à une interprétation approfondie des résultats de l'ACV pour les GC à base de granulats de RAB, de RAC et de RAP. Cette analyse comparative nous permettra de mettre en évidence les avantages et les inconvénients environnementaux associés à l'utilisation de ces matériaux recyclés dans les GC. Enfin, nous conclurons en résumant les principales conclusions tirées de notre analyse du cycle de vie des GC, en mettant en lumière les possibilités d'amélioration et les recommandations pour une utilisation plus durable de ces matériaux dans la construction routière.

Sommaire partiel

<u>Sommaire partiel</u>	187
<u>VI.1 Analyse cycle de vie des GC</u>	188
<u>VI.1.1 Description du système</u>	188
<u>VI.1.2 Champ de l'étude</u>	188
<u>VI.1.3 Unité fonctionnelle</u>	189
<u>VI.1.4 L'inventaire du cycle de vie</u>	189
<u>VI.2 Interprétation des résultats</u>	190
<u>VI.2.1 Analyse cycle de vie des GC à base de RAB</u>	190
<u>VI.2.2 Analyse cycle de vie des GC à base de RAC</u>	194
<u>VI.2.3 Analyse cycle de vie des GC à base de RAP</u>	197
<u>VI.2.4 Comparaison des résultats environnementale du GC</u>	200
<u>VI.3 Conclusion partielle</u>	201

VI.1 Analyse cycle de vie des GC

L'évaluation environnementale des matériaux cimentaires est devenue un enjeu majeur ces dernières années, notamment en raison de leur impact sur la durabilité et l'empreinte environnementale des infrastructures routières. Cette évaluation prend en compte non seulement les composants de la grave-ciment elle-même, mais également les matériaux entrant dans les différentes formulations étudiées dans notre processus expérimental. Dans cette section, nous nous attacherons à analyser les effets environnementaux des GC à base de granulats recyclés, en mettant en lumière leur cycle de vie complet, de la production à l'élimination.

VI.1.1 Description du système

Quatre scénarios de formulation des GC à base de GR seront comparés par rapport au GC témoin.

- Scénario 1 : un GC témoins (100 % NA).
- Scénario 2 : un GC 0/3 GR.
- Scénario 3 : un GC 3/8 GR.
- Scénario 4 : un GC 100 % GR.

VI.1.2 Champ de l'étude

Les effets environnementaux d'un GC naturel et de trois GC recyclés créés pendant le processus expérimental sont comparés dans cette étude. Le logiciel Open LCA, spécialisé dans les analyses de cycle de vie, et la base de données EcoInvent ont été utilisés pour modéliser l'étude. Les modules et les données de cette base de données sont associés à la modélisation, mais certains d'entre eux ont été créés ou modifiés pour être le plus proches possible de la réalité.

La figure VI.1 présente le processus de production du GC et illustre la frontière du système considéré.

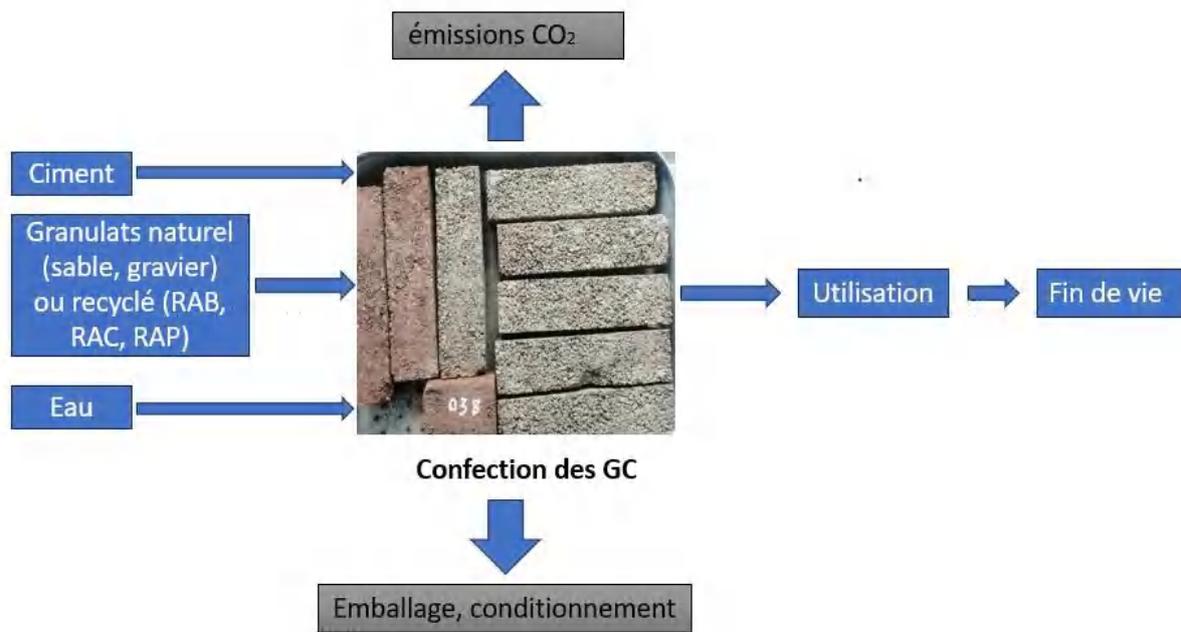


Figure VI.1 : Cycle de vie des échantillons étudiés.

VI.1.3 Unité fonctionnelle

L'élaboration d'une tonne de GC naturel puis recyclée selon quatre scénarios différents sera ce qui servira de base dans cette étude et donc d'unité fonctionnelle.

VI.1.4 L'inventaire du cycle de vie

Pour évaluer l'impact environnemental des échantillons, il est nécessaire de prendre en compte tous les matériaux tels que le ciment, l'eau et les granulats, ainsi que les processus associés à leur élaboration. Dans cette optique, les formulations de GC préalablement détaillées dans les procédures expérimentales seront intégrées dans la modélisation à l'aide d'Open LCA. Les données nécessaires proviennent de la Base de données Ecoinvent.

L'analyse de la production des échantillons se déroule à l'échelle nationale. Par conséquent, les processus ajustables pour s'aligner avec le contexte algérien, tels que le mix énergétique électrique et la production de gaz naturel, seront adaptés en conséquence.

VI.2 Interprétation des résultats

VI.2.1 Analyse cycle de vie des GC à base de RAB

Le tableau VI.1 et la figure VI.2 représentent les résultats du bilan environnemental de la modélisation des quatre scénarios de formulation des GC à base de RAB avec la méthode IMPACT 2002+. On a constaté que les 15 indicateurs d'impact améliorent les impacts environnementaux des GC lorsqu'on utilise le RAB sous forme de gravier (fraction 3/8), de sable et de remplacement total de NA, respectivement par rapport aux GC. Cela indique que l'incorporation de RAB (sable et gravier) dans la formulation du GC est très bénéfique pour sa performance environnementale. À mesure que le pourcentage de RAB augmente par rapport à NA dans la conception du mélange, l'impact environnemental diminue.

Il semble que les résultats de l'étude indiquent une amélioration des impacts environnementaux des matériaux de (GC) lorsque le granulat de RAB est utilisé sous forme de gravier (fraction 3/8), de sable et en remplacement total du granulat naturel. Plus précisément, l'incorporation de granulats de RAB dans la formulation du GC semble avoir des effets positifs sur sa performance environnementale.

L'observation selon laquelle l'impact environnemental diminue à mesure que le pourcentage de granulats de RAB augmente par rapport au granulat naturel suggère que l'utilisation de matériaux recyclés peut contribuer à réduire l'empreinte écologique des GC. Cela pourrait être dû à divers facteurs tels que la réduction de l'extraction de matériaux naturels, la gestion des déchets de RAB ou d'autres avantages liés à l'utilisation de matériaux recyclés.

En résumé, les résultats semblent indiquer que l'incorporation de granulats de RAB dans la conception des GC est une approche bénéfique pour améliorer leur performance environnementale, avec une réduction de l'impact environnemental à mesure que la proportion de ces granulats recyclés augmente par rapport au granulat naturel. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes [222, 223].

Shang et al [224] ont validé que la pollution provenant du processus de collecte des déchets de briques en terre cuite semble plus acceptable. Les granulats de RAB présentent une durabilité remarquable, offrant ainsi une alternative aux granulats classiques pour une production de béton plus écologique. Ce matériau affiche des résultats remarquables en termes d'indices sociaux, environnementaux et économiques, tout en assurant une durabilité supérieure.

Tableau VI.1 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des GC à base de substitution des RAB, selon IMPACT 2002+.

Impact category	Reference unit	GCT	GC 3/8 RAB	GC 0/3 RAB	GC 100% RAB
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,28	0,27	0,18	0,17
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	5028,93	4802,01	2602,47	1997,30
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-limit	0,0072	0,0068	0,0051	0,0040
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,32	0,29	0,23	0,16
Global warming	kg CO2 eq	72,46	71,07	58,73	55,03
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	519,90	508,73	487,74	457,96
Land occupation	m2org.arable	0,98	0,90	0,56	0,36
Mineral extraction	MJ surplus	1,03	0,89	0,77	0,42
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,54	0,50	0,34	0,22
Non-renewable energy	MJ primary	525,65	525,48	410,58	410,12
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	3,33967E-06	3,5418E-06	3,06794E-06	3,60694E-06
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,056	0,058	0,048	0,053
Respiratory organics	kg SO2 eq	0,015	0,015	0,012	0,014
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1,263	1,262	1,001	0,999
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	1639,56	1570,74	895,08	711,56

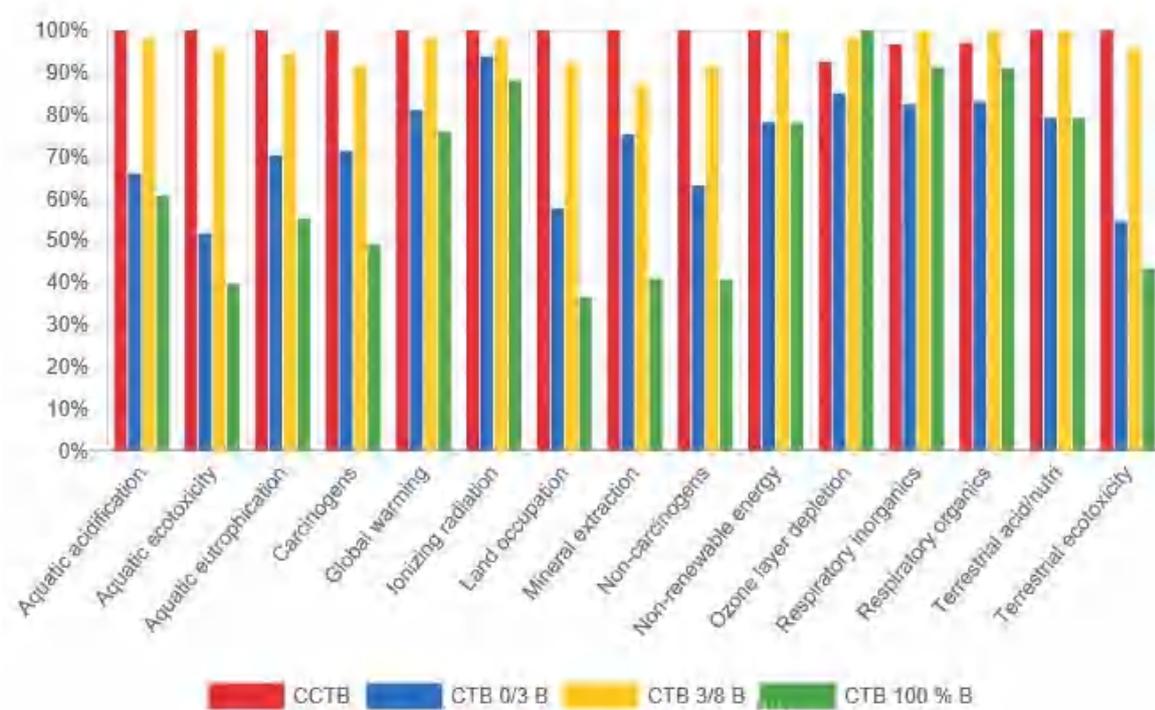


Figure VI.2 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre GC à base des RAB, selon IMPACT 2002+.

La figure VI.3 présente les résultats comparatifs des scores de dommages d'impact des différentes formulations à base de RAB, selon la méthode IMPACT 2002+.

Ces résultats indiquent que l'utilisation de granulats de RAB sous forme de gravier (fraction 3/8), de sable et en remplacement total du granulats naturels dans les GC offre de meilleures performances environnementales.

Plus spécifiquement, les scores de ces GCR sont inférieurs à ceux de la GCT dans les catégories suivantes :

- Santé humaine
- Qualité des écosystèmes
- Changement climatique
- Ressources

Cela suggère que l'utilisation de granulats de RAB dans les GC peut contribuer à réduire les impacts environnementaux, du moins selon les critères évalués par IMPACT 2002+.

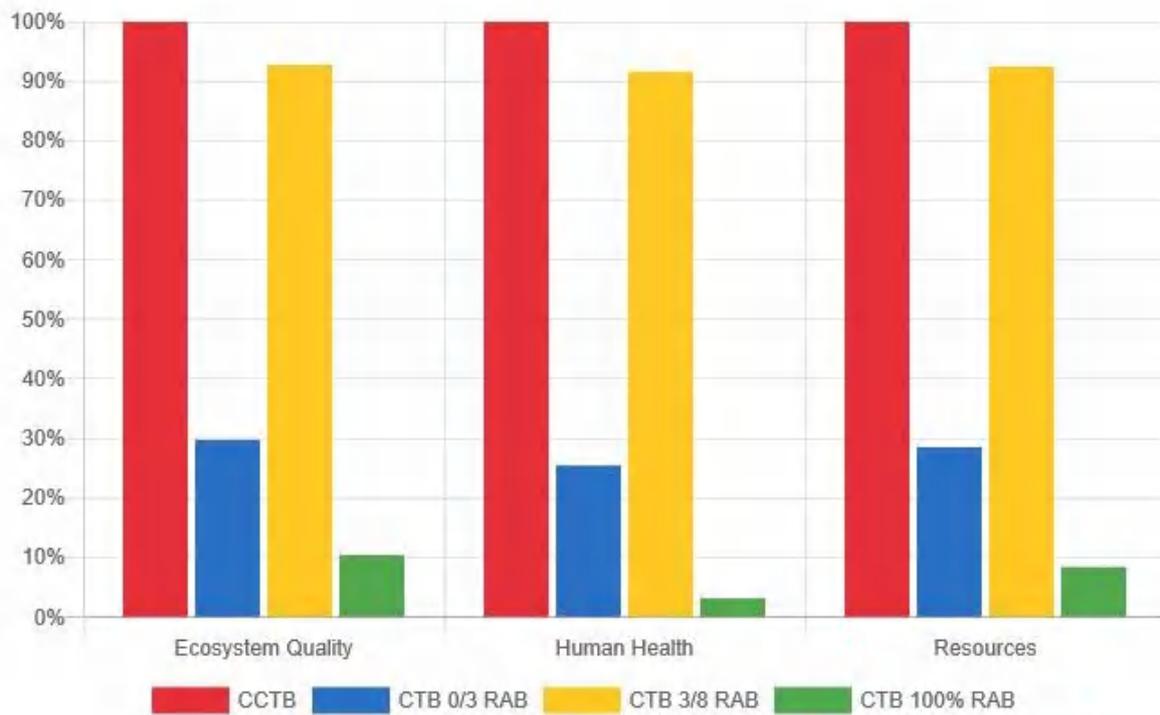


Figure VI.3 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC à base de RAB, selon IMPACT 2002+.

L'utilisation de granulat de RAB dans les GC peut contribuer à réduire les impacts environnementaux selon les critères évalués par IMPACT 2002+ dans différentes catégories pour plusieurs raisons :

1. Santé humaine :

- Réduction des émissions de polluants atmosphériques et de substances toxiques associées à l'extraction et au traitement des granulats naturels. L'utilisation de granulat de brique recyclé peut minimiser les risques pour la santé liés à ces émissions.

2. Qualité des écosystèmes :

- Diminution de l'exploitation des ressources naturelles, telle que l'extraction de granulats naturels, ce qui peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes, y compris la destruction d'habitats naturels, la perturbation de la faune et de la flore et la modification des écosystèmes locaux.
-

3. Changement climatique :

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à l'extraction, au transport et à la transformation des granulats naturels. En utilisant des matériaux recyclés, on peut réduire la demande en énergie et les émissions de CO₂ liées à ces activités, contribuant ainsi à atténuer le changement climatique.

4. Ressources :

- Conservation des ressources naturelles non renouvelables en réutilisant des matériaux existants au lieu d'extraire de nouveaux granulats. Cela contribue à préserver les ressources naturelles, réduisant ainsi la pression sur les écosystèmes et les cycles géologiques.

Il est important de noter que ces avantages dépendent de divers facteurs tels que la qualité du granulat de RAB, les processus de production, le transport, etc. L'évaluation des impacts environnementaux par IMPACT 2002+ prend en compte ces facteurs pour fournir une évaluation globale des performances environnementales des matériaux de construction.

VI.2.2 Analyse cycle de vie des GC à base de RAC

Le tableau VI.2 présente les indicateurs d'impact environnemental des GC à base de RAC avec la méthode IMPACT 2002+.

Tableau VI.2 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des GC à base de substitution des RAC, selon IMPACT 2002+.

Impact category	Reference unit	GCT	GC 3/8 RAC	GC 0/3 RAC	GC 100% RAC
Aquatic acidification	kg SO ₂ eq	0.28	0,26	0,17	0,13
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	5028.93	4770,01	2535,78	1845,45
Aquatic eutrophication	kg PO ₄ P-lim	0,0072	0,0067	0,0049	0,0036
Carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl eq	0,32	0,28	0,21	0,12
Global warming	kg CO ₂ eq	72,46	70,38	57,28	51,76
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	519,90	503,96	477,78	435,30
Land occupation	m ² org.arable	0,98	0,90	0,56	0,35

Mineral extraction	MJ surplus	1,03	0,88	0,75	0,38
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,54	0,49	0,33	0,20
Non-renewable energy	MJ primary	525,65	514,70	388,03	358,84
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	3,33E-06	3,30E-06	2,80E-06	3,08E-06
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,056	0,052	0,036	0,027
Respiratory organics	kg SO2 eq	0,015	0,014	0,010	0,09
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1,263	1,210	0,900	0,780
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	1639,56	1563,00	878,98	674,87

La figure VI.4 montre l'augmentation ou la diminution (en pourcentages) de l'indicateur de catégorie d'impact du GC 3/8 RAC, du GC 0/3 RAC et du GC 100% RAC par rapport aux indicateurs de catégorie d'impact du GCT. Dans cette figure, tous les indicateurs de catégorie de GCT sont présentés sous forme de valeur de 100 %, tandis que les indicateurs de catégorie d'autres types de GC sont calculés sous forme de pourcentages d'augmentation ou de diminution par rapport à GCT.

Le GCT présente les indicateurs les plus élevés pour toutes les catégories d'impact. En comparaison, le GC 3/8 RAC et le GC 0/3 montrent des résultats relativement plus faibles, tandis que le GC 100% RAC présente les indicateurs les plus bas.

Ce résultat traduit le fait que l'intégration de granulats recyclés Sous la forme de gravier (fraction 3/8), le sable et le remplacement total des granulats naturels dans la formulation de GC sont bénéfiques pour les performances environnementales. Cela pourrait signifier que l'utilisation de granulats recyclés contribue à réduire l'impact environnemental associé à la production de GC, probablement en réduisant la dépendance aux ressources naturelles et en favorisant la réutilisation des matériaux.

Ces avantages environnementaux peuvent inclure la réduction de l'extraction de matériaux naturels, la diminution des émissions de carbone liées à la production de béton et potentiellement une gestion plus durable des déchets de construction.

Guo et al [225] démontrent que les impacts environnementaux de la production de blocs RAC sont inférieurs à ceux des blocs de béton normaux.

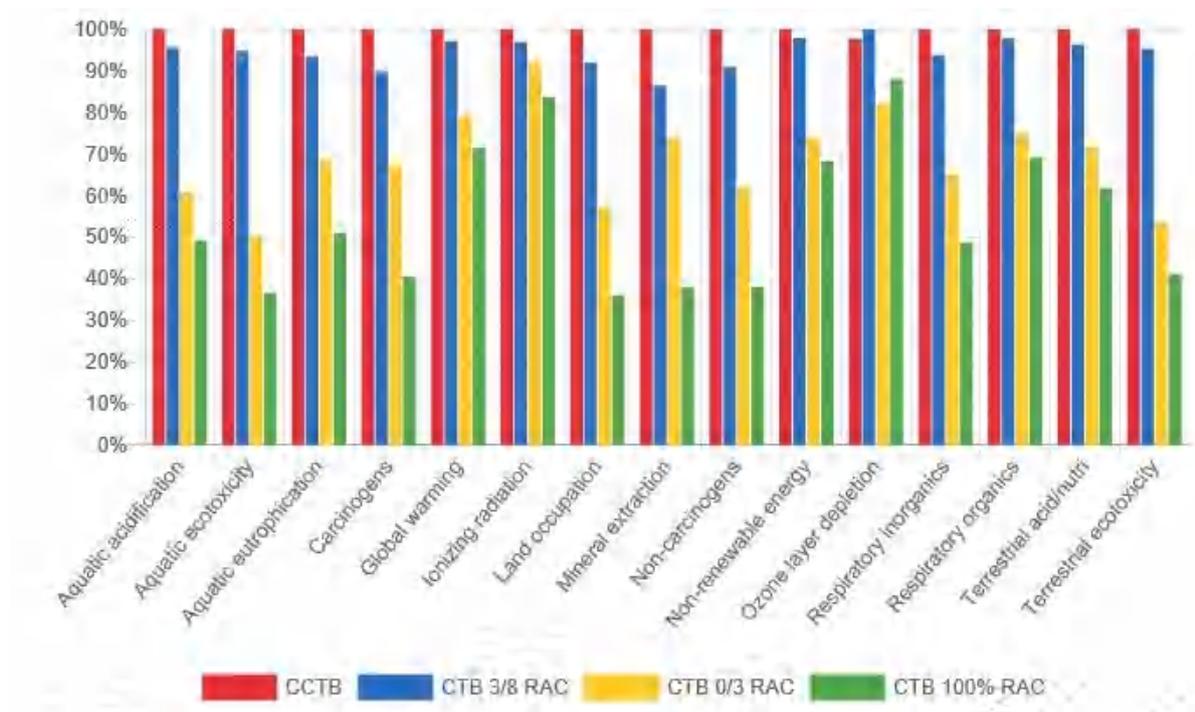


Figure VI.4 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre GC à base des RAC, selon IMPACT 2002+.

La figure VI.5 représente les résultats de comparaison des scores de dommages d'impact des différentes GC à base de RAC, selon IMPACT 2002+.

Il semble que les résultats suggèrent que l'utilisation de granulats de béton recyclé (RAC) sous forme de gravier (fraction 3/8), de sable et en remplacement total du granulats naturels dans le GC présente des avantages en termes de performances environnementales. Plus précisément, cela pourrait entraîner moins d'impacts négatifs sur des indicateurs tels que la santé humaine, la qualité des écosystèmes et l'utilisation des ressources.

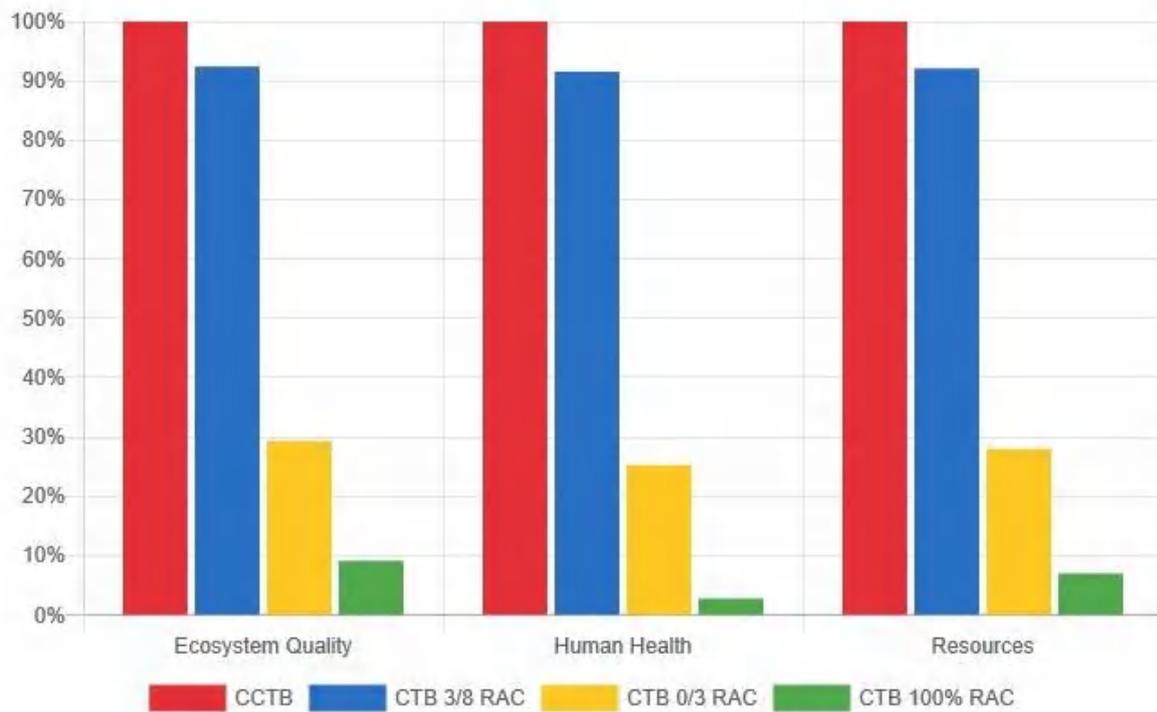


Figure VI.5 : Comparaison des scores de dommages d'impact des MGTLH à base de RAC, selon IMPACT 2002+.

L'utilisation de granulats de béton recyclé est souvent considérée comme une pratique durable, car elle permet de réduire la dépendance aux matériaux vierges et contribue à la gestion des déchets de construction. Le remplacement du granulat naturel par du granulat de béton recyclé peut également réduire l'extraction de nouvelles ressources, ce qui peut avoir des avantages environnementaux significatifs.

Shi et al. [188] ont montré que les chaussées en béton réalisées avec des granulats de béton recyclés sont généralement plus respectueuses de l'environnement et socialement, comparées aux chaussées en béton réalisées avec des granulats vierges.

VI.2.3 Analyse cycle de vie des GC à base de RAP

Les résultats des indicateurs d'impact environnemental avec la méthode IMPACT 2002+ pour la GCT et la GC qui contiennent les RAP sont comparés dans le tableau VI.3. Les indicateurs de la catégorie IMPACT 2002+ comprennent le potentiel de réchauffement climatique, l'acidification de l'air, les particules atmosphériques pour la santé humaine, l'eutrophisation (air et eau), l'appauvrissement de la couche d'ozone dans l'air, le smog

atmosphérique, l'écotoxicité (faible et élevée), le cancer pour la santé humaine (faible et élevé) et le non-cancer pour la santé humaine, D'après les résultats, par rapport à la GC à l'aide de granulats vierges, l'utilisation de RAP pour reconstruire une GC pourrait avoir moins d'impacts négatifs sur les indicateurs. Cela implique que ces impacts négatifs se produisent en grande partie lors des processus d'extraction de granulats vierges, de transport de matériaux et de mise en décharge des RAP. Selon le tableau VI.3, le GC réalisé avec RAP est généralement plus respectueux de l'environnement et socialement comparé au GC réalisé avec des granulats vierges.

Tableau VI.3 : Comparaison des indicateurs d'impacts environnementaux des GC à base de substitution des RAP, selon IMPACT 2002+.

Impact category	Reference unit	GCT	GC 3/8 RAP	GC 0/3 RAP	GC 100% RAP
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0.28	0,20	0,12	0,10
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	5028.93	4302,01	2202,47	1497,30
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0,0072	0,0061	0,0041	0,0030
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,32	0,21	0,19	0,13
Global warming	kg CO2 eq	72,46	68,07	55,73	49,03
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	519,90	500,73	457,74	407,96
Land occupation	m2org.arable	0,98	0,85	0,46	0,26
Mineral extraction	MJ surplus	1,03	0,89	0,77	0, 32
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,54	0,43	0,25	0,16
Non-renewable energy	MJ primary	525,65	523,16	402,28	400,08
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	3,33967E-06	3,2418E-06	2,06794E-06	2,00694E-06
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,056	0,050	0,040	0,043
Respiratory organics	kg SO2 eq	0,015	0,013	0,011	0,012

Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1,263	1,221	1,000	0,959
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	1639,56	1560,74	890,08	701,56

Shi et coll. [19] ont conclu que l'utilisation des chaussées RAP-PCC apporte plusieurs avantages environnementaux et économiques tels que la consommation de granulats vierges, moins de RAP transporté vers la décharge, la consommation de matériaux, moins de CO2 produit, moins d'émissions de gaz à effet de serre, réduction de la toxicité, etc.

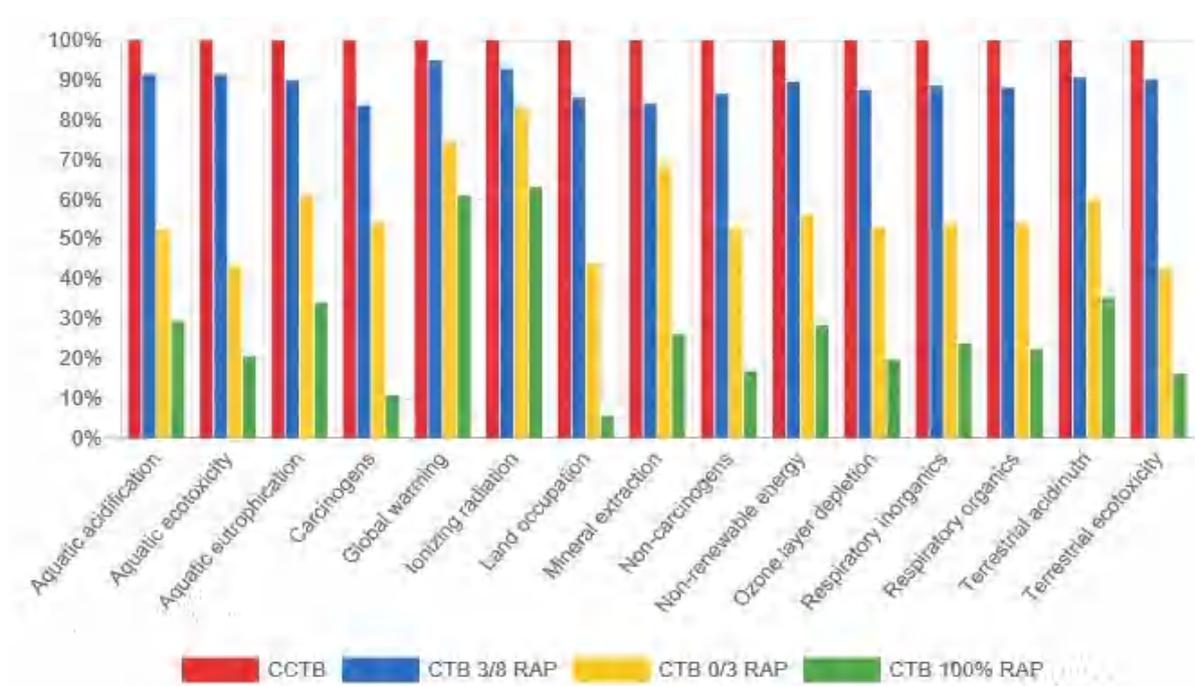


Figure VI.6 : Histogramme de comparaison des impacts sur l'ensemble des indicateurs de la modélisation des quatre GC à base des RAP, selon IMPACT 2002+.

La figure VI.7 présente les résultats totaux des dommages des 15 facteurs d'impact regroupés en trois catégories de dommages : santé humaine, qualité des écosystèmes et ressources. Comme on peut s'y attendre d'après les résultats de la caractérisation, une diminution a été observée lorsque les RAP ont été utilisées dans les GC sous forme gravier 3/8, sable et remplacement totale de NA par rapport au GCT.

Enfin, la réduction d'impact enregistrée pour le CRAP est principalement due à l'utilisation évitée de granulats naturels [180, 226].

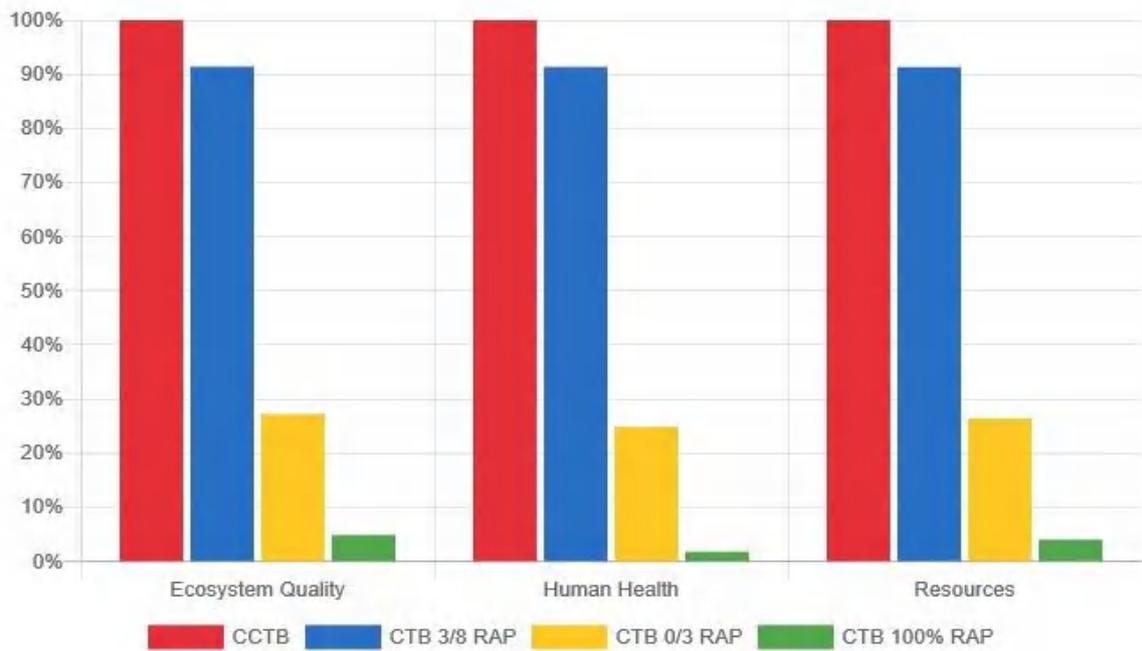


Figure VI.7 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC à base de RAP, selon IMPACT 2002+.

VI.2.4 Comparaison des résultats environnementale du GC

La figure VI.8 représente les résultats de comparaison des scores de dommages d'impact des différentes GC à base de granulats recyclé selon IMPACT 2002+.

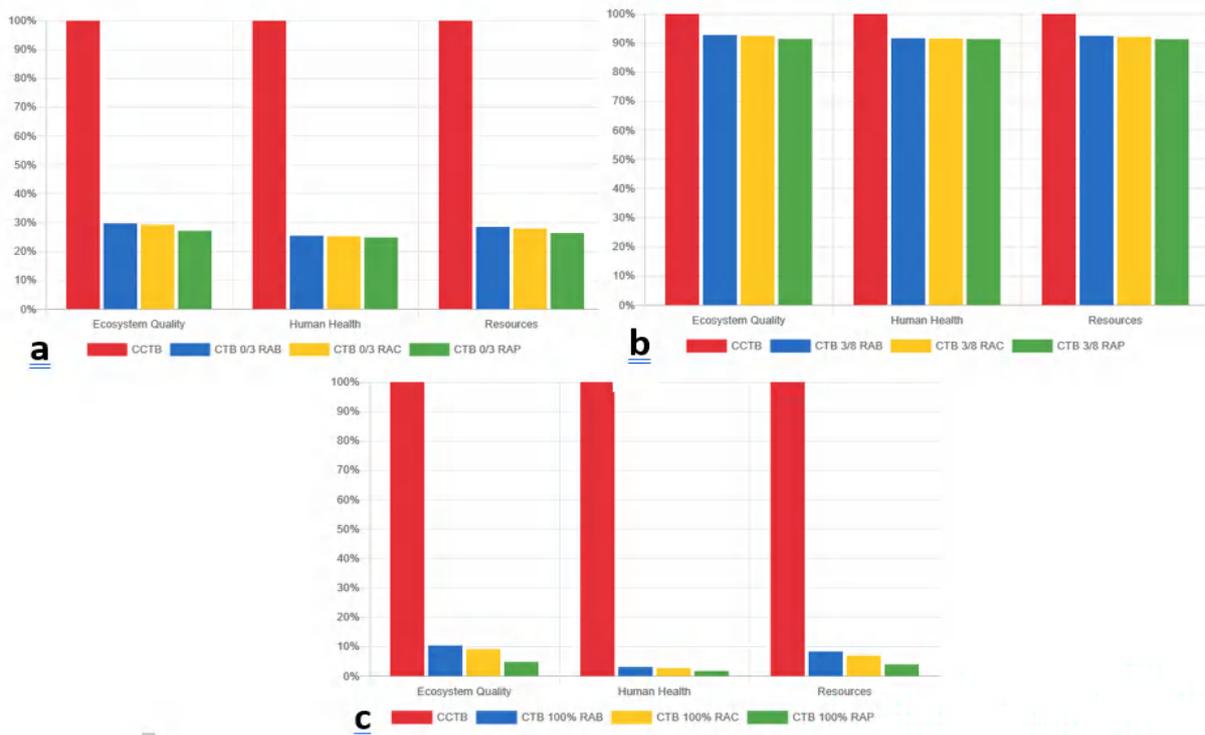


Figure VI.8 : Comparaison des scores de dommages d'impact des GC : (a) le variable le sable ; (b) le variable le gravier 3/8 ; (c) le variable la nature des granulats.

Les résultats obtenus suggèrent que l'utilisation de granulats recyclés (RAB, RAC et RAP) sous forme de sable, de gravier (fraction 3/8) et en remplacement total du granulat naturel dans les graves ciment (GC) offre des avantages notables en termes de performances environnementales. Cette approche pourrait potentiellement réduire les impacts négatifs sur des indicateurs cruciaux tels que la santé humaine, la qualité des écosystèmes et l'utilisation des ressources.

Particulièrement, l'utilisation de granulats de RAP se distingue en offrant les meilleures performances environnementales parmi les trois types de granulats recyclés. Cette distinction découle principalement du processus de recyclage du RAP, qui est généralement moins énergivore et moins émetteur de CO₂ que celui du RAC ou de la RAB. Contrairement au recyclage du RAC et de la RAB, qui peut nécessiter des procédés plus complexes tels que le concassage, le tri et le lavage, le recyclage du RAP implique principalement le broyage de l'asphalte existant pour créer de nouveaux granulats. Ce processus plus direct entraîne une consommation d'énergie et d'eau moindre, contribuant ainsi à des performances environnementales plus favorables.

VI.3 Conclusion partielle

L'intérêt croissant pour la valorisation des granulats recyclés répond à une série de préoccupations environnementales et économiques, notamment en termes de réduction des décharges, de diminution de l'empreinte écologique associée à leur entreposage, et de développement de matériaux de construction plus durables. Les résultats de notre étude expérimentale confirment que l'utilisation de granulats recyclés (RAB, RAC et RAP) dans le GC offre des avantages environnementaux significatifs, notamment en termes de santé humaine, de qualité des écosystèmes et d'utilisation des ressources, par rapport à l'utilisation de granulats naturels.

À travers l'analyse des performances mécaniques et environnementales des différents types de graves ciments contenant des granulats recyclés, nous constatons que les trois types de granulats présentent des performances environnementales supérieures, bien que leurs performances mécaniques puissent varier. Sur cette base, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés présentent des propriétés techniques satisfaisantes tout en ayant un impact environnemental limité, en particulier le grave ciment à base de RAC.

Les tableaux de comparaison des propriétés des GC, en fonction de la nature des granulats utilisés, mettent en évidence les différences et les similitudes entre les différents scénarios étudiés. Ces résultats fournissent une base solide pour recommander l'utilisation de granulats recyclés dans la production de GC, contribuant ainsi à la promotion de pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

VI.4 Synthèse des Performances des Granulats Recyclés dans les GC

L'intérêt de la valorisation des granulats recyclés répond à l'élimination des zones de rejet, réduire le stockage des déchets de construction, ainsi que diminuer les surfaces dédiées à leur entreposage et l'empreinte écologique associée à ces sites. Les scénarios étudiés ont porté sur le développement d'un type de matériaux de construction à impact environnemental limité.

L'évaluation environnementale du processus expérimental a démontré que l'utilisation de granulats recyclés (RAB, RAC, et RAP) dans les graves-ciment offre des performances environnementales supérieures dans les domaines de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes et de l'utilisation des ressources par rapport à l'utilisation de granulats naturels.

À travers ces résultats, et afin de garantir l'atteinte de l'objectif de cette thèse, qui est de développer un matériau de construction respectueux de l'environnement tout en présentant des propriétés mécaniques acceptables, les tableaux IV.4, IV.5 et IV.6 comparent les principaux effets observés parmi les divers GC. Sachant que la variable est la nature des granulats.

Tableau VI.4 Comparaison des propriétés des GC Sachant que la variable est la nature du sable.

	GC 0/3 RAB	GC 0/3 RAC	GC 0/3 RAP
	Effet	Effet	Effet
Rc	↓	↑ ↑	↓ ↓
Rt	↑	↓ ↓	↓ ↓ ↓
E	↓	↑ ↑	↓ ↓
CBR	↓	↓ ↓	↓ ↓ ↓
VAS	↓	↑ ↑	↓ ↓
P	↓	↓	↓ ↓
Ab	↓ ↓ ↓	↓ ↓	↑ ↑
Co	↑ ↑ ↑	↑ ↑	↑
Ab	↑	↓ ↓ ↓	↓ ↓
Gel/dégel	↓ ↓ ↓	↓ ↓	↑ ↑ ↑
ACV	↑	↑ ↑	↑ ↑ ↑

Tableau VI.5 : Comparaison des propriétés des GC Sachant que la variable est la nature du gravier (3/8)

	GC 3/8 RAB	GC 3/8 RAC	GC 3/8 RAP
--	------------	------------	------------

	Effet	Effet	Effet
Rc	↓	↑	↓↓
Rt	↓	↓↓↓	↓↓
E	↓↓	↓	↓
CBR	↓↓	↓	↓
VAS	↓↓	↓	↓↓
P	↓↓	↓	↓↓
Ab	↓↓	↓	↑
Co	↑	↑	↓
Ab	↑	↓↓↓	↓
Gel/dégel	↓↓↓	↓↓	↑
ACV	↑	↑↑	↑↑↑

Tableau VI.6 : Comparaison des propriétés des GC Sachant que la variable est st la nature des granulats

	GC 100% RAB	GC 100% RAC	GC 100% RAP
	Effet	Effet	Effet
Rc	↓↓	↓	↓↓↓
Rt	↓	↓↓	↓↓↓
E	↓↓	↓	↓↓↓
CBR	↓↓	↓	↓↓↓
VAS	↓	↓	↓↓
P	↓↓	↓	↓↓↓
Ab	↓↓↓	↓↓	↑↑
Co	↑↑↑	↑	↑
A	↑↑	↓↓↓	↓↓
Gel/dégel	↓↓↓	↓↓	↑
ACV	↑	↑↑	↑↑↑

Notes : ↑ Faible effet positif, ↑↑ moyen, ↑↑↑ excellent

↓ Faible effet négative, ↓↓ moyen, ↓↓↓ mauvaise

Rc : Résistance à la compression, Rt : Résistance à la traction, P : Porosité, Ab : absorption, Co : conductivité thermique, A : Résistance à l'abrasion, ACV : Analyse cycle de vie.

En se basant sur l'analyse des performances mécaniques et environnementales de divers types de GC contenant des granulats recyclés (RAB, RAC, et RAP), nous pouvons constater que les trois types de granulats donnent meilleures performances environnementales,

alors que leurs performances mécaniques varient. Sur cette analyse, nous pouvons conclure que les matériaux recyclés qui présentent des performances techniques satisfaisantes tout en ayant un impact environnemental limité sont à base de granulats de RAC.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude exhaustive s'est penchée sur l'évaluation de l'impact des granulats recyclés (RAB, RAC et RAP) sur les propriétés physico-mécaniques, la durabilité et l'empreinte environnementale des GC. Son objectif principal était de contribuer au développement de

matériaux de construction présentant des performances techniques satisfaisantes tout en minimisant leur impact environnemental. Pour atteindre ces objectifs, un programme expérimental complet a été élaboré afin de répondre aux questions de recherche posées.

Les résultats obtenus ont révélé des variations significatives dans les performances des GC en fonction des granulats recyclés utilisés.

✓ **Granulats de Brique Recyclés (RAB)**

Les analyses des propriétés physiques et chimiques ont montré que les granulats de RAB présentent une absorption plus élevée et une densité plus faible par rapport aux granulats naturels. Bien que leur utilisation ait généralement conduit à une diminution des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression, le module d'élasticité et l'indice CBR, l'utilisation de RAB sous forme de sable a amélioré la résistance à la traction à long terme. Cependant, des compromis doivent être pris en compte en termes de résistance au gel-dégel et de durabilité.

✓ **Granulats de Béton Recyclés (RAC)**

Les granulats de RAC se sont distingués par une absorption plus élevée et une densité moindre que les granulats naturels. Bien que leur utilisation ait entraîné une diminution globale des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression et à l'abrasion, l'utilisation de RAC sous forme de sable a amélioré ces propriétés. Cependant, des préoccupations persistent quant à leur impact sur la durabilité, en particulier en ce qui concerne la résistance au gel-dégel.

✓ **Granulats de Fraisât Routier Recyclés (RAP)**

Les granulats de RAP présentent une diminution des caractéristiques physiques et mécaniques par rapport aux granulats naturels, principalement en raison de la présence de bitume. Cependant, ils ont montré une meilleure résistance au gel-dégel et une empreinte environnementale réduite. Malgré une diminution des propriétés mécaniques, l'utilisation de RAP peut être bénéfique dans certains contextes, notamment en termes de durabilité et d'impact environnemental.

Les analyses du cycle de vie (ACV) ont constitué un volet crucial de cette étude, fournissant des informations essentielles sur l'impact environnemental global des matériaux de

construction étudiés. Les résultats de l'ACV ont montré que, malgré certaines diminutions dans les performances mécaniques des GC lors de l'utilisation de granulats recyclés, les avantages environnementaux associés à cette pratique étaient significatifs. En effet, l'intégration de granulats recyclés dans les GC a permis de réduire de manière substantielle l'empreinte carbone et la consommation de ressources naturelles par rapport à l'utilisation exclusive de granulats naturels. Cette constatation souligne l'importance de considérer non seulement les performances techniques, mais également les aspects environnementaux dans le choix des matériaux de construction, en alignant ainsi les pratiques de construction avec les impératifs de durabilité et de protection de l'environnement.

En conclusion, l'utilisation de granulats recyclés dans les GC offre des opportunités significatives pour améliorer la durabilité de l'industrie de la construction tout en répondant aux exigences croissantes en matière de développement durable. Toutefois, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour relever les défis techniques et réglementaires associés à cette pratique, notamment en ce qui concerne la standardisation des processus de production, la certification des matériaux recyclés et la sensibilisation des parties prenantes de l'industrie. En adoptant une approche holistique basée sur les principes de l'économie circulaire et de la durabilité, il est possible de promouvoir une transition vers des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement et socialement responsables.

PERSPECTIVES

En prolongement des recherches entreprises au cours de cette thèse de doctorat et en se fondant sur les résultats significatifs obtenus, plusieurs perspectives émergent pour approfondir la compréhension des matériaux de construction à base de granulats recyclés. Les axes suivants pourraient être explorés pour étendre les connaissances et les applications pratiques :

1. Impact de l'Environnement sur les Propriétés Mécaniques et la Durabilité :

Il serait pertinent d'étudier l'effet de l'environnement, notamment dans des climats chauds comme ceux du sud de l'Algérie, sur les propriétés mécaniques et la durabilité des graves de ciment à base de granulats recyclés. Les variations climatiques peuvent avoir un impact significatif sur la performance à long terme de ces matériaux, ce qui nécessite une analyse approfondie pour garantir leur résistance et leur durabilité.

2. Exploration de Nouvelles Propriétés Mécaniques :

En plus des propriétés mécaniques examinées dans cette thèse, il serait intéressant de déterminer d'autres caractéristiques telles que l'essai de fatigue, le retrait et la fusion des graves ciments. Ces paramètres peuvent fournir des informations cruciales sur la stabilité et la résistance des matériaux dans des conditions d'utilisation réelles, élargissant ainsi la portée de l'évaluation des performances des GC.

3. Dimensionnement des Chaussées basé sur les Résultats des GC :

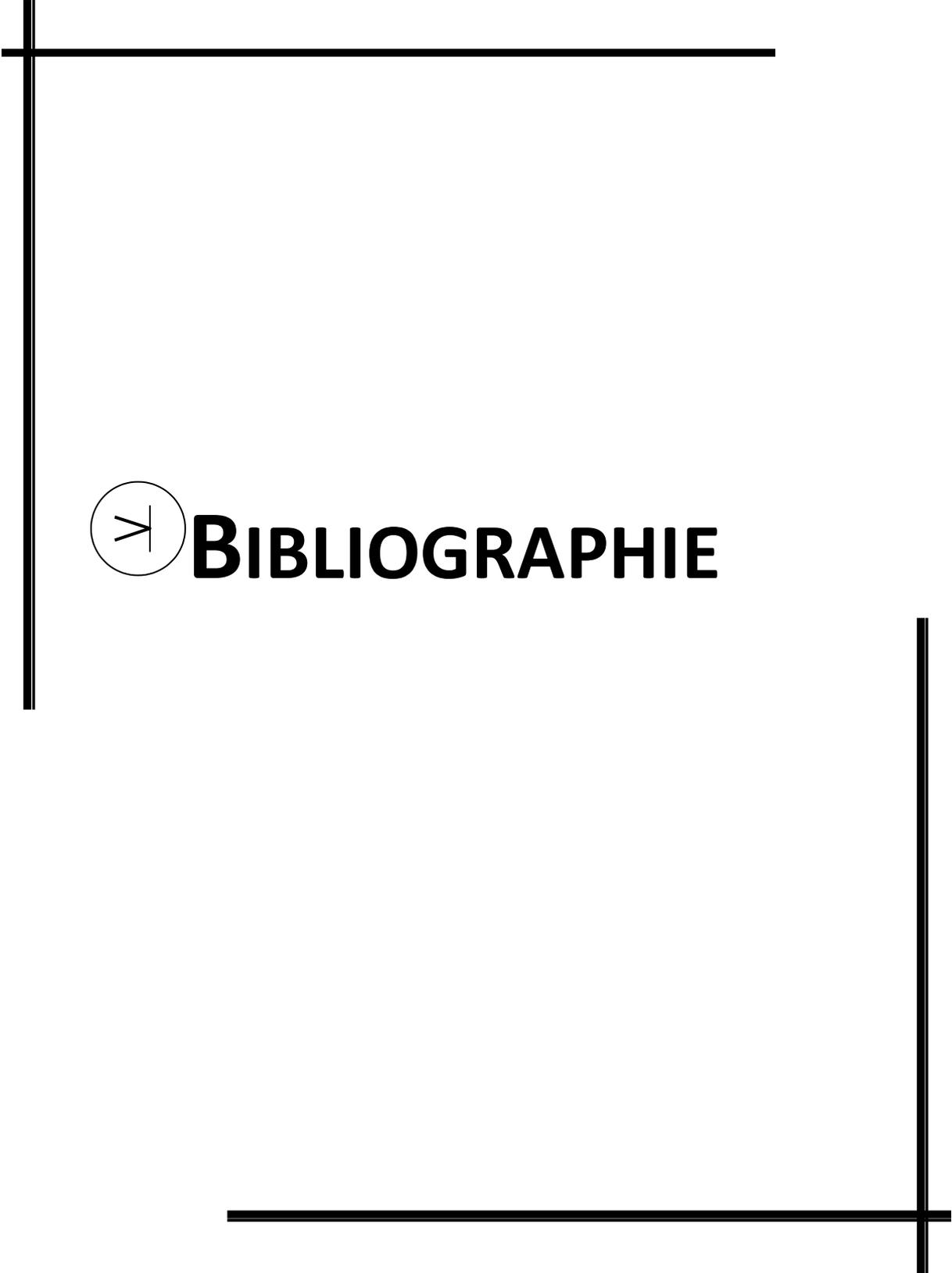
Une perspective importante serait d'explorer comment les résultats obtenus à partir des études des graves cimentées à base de granulats recyclés pourraient être appliqués dans le dimensionnement des chaussées. Une analyse approfondie de la capacité portante et de la durabilité des GC permettrait d'optimiser la conception des infrastructures routières, en tenant compte à la fois des performances techniques et de l'impact environnemental.

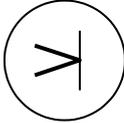
4. Utilisation de Déchets de Briques et de Béton comme Ajout Cimentaire :

Une autre piste de recherche intéressante consisterait à évaluer l'effet de l'incorporation de déchets de briques et de béton comme ajout cimentaire sur les propriétés mécaniques et la durabilité des graves cimentées. Cette approche pourrait offrir une solution innovante

pour valoriser les déchets de construction tout en améliorant les performances des matériaux de construction, contribuant ainsi à la durabilité de l'industrie de la construction.

En explorant ces perspectives, il est possible de renforcer les connaissances dans le domaine des matériaux de construction durables et de développer des solutions innovantes pour répondre aux défis actuels en matière de durabilité et d'efficacité des infrastructures.



 **BIBLIOGRAPHIE**

1. Garber, S., R.O. Rasmussen, and D. Harrington, *Guide to cement-based integrated pavement solutions*. 2011.
2. Mezhoud, S., *Compréhension des mécanismes d'apparition et de remontée des fissures dans les chaussées à structure incorporant des matériaux traités aux liants hydrauliques*, in *Institut des Sciences et technologie* 2016, Université 20 Août 1955-Skikda.
3. Miao, Y., et al., *Influences of clay brick particles on the performance of cement stabilized recycled aggregate as pavement base*. *Sustainability*, 2018. **10**(10): p. 3505.
4. Debieb, F. and S. Kenai, *The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete*. *Construction and building materials*, 2008. **22**(5): p. 886-893.
5. Arsenie, I.M., *Etude et modélisation des renforcements de chaussées à l'aide de grilles en fibre de verre sous sollicitations de fatigue*, 2013, Université de Strasbourg.
6. SETRA, L., *Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme*. Guides du LCPC, 2000.
7. LCPC, S., *Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide Technique*. France, de'cembre, 1994.
8. Sétra, L., *Catalogue des structures types de chaussées neuves*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, Paris, 1998.
9. Randrianandrasana, N., *Étude d'impacts environnementaux de plateforme routière intégrant les paramètres géotechniques par l'analyse de cycle de vie: cas de Madagascar*, 2020, Université d'Antananarivo.
10. Chebrek, D., *Etude du phenomene de l'ornierage des chaussée bitumineuses*, 2012, Tizi-Ouzou.
11. Settari, C., *Caracterisation et comportement du béton a base de déchets de routes (beton bitumineux) : application dans le domaine routier.*, in *Institut des Sciences et technologie* (2016), Université Yahia Farès de Médéa.
12. Guide, C., *CEBTP guide–Pavement Design for Tropical Countries*. 1984.
13. SAUTEREY, R. and J. BONNOT, *LES GRAVES TRAITÉES AUX LIANTS HYDRAULIQUES (ET POUZZOLANIQUES)*. *REV. GEN. ROUT. AERODR.(RECYCLAGE FASC. 3)*, 1972(474).
14. Nguyen, T.B., *Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL (r) dans des matériaux d'assises de chaussée. Comportement mécanique et environnemental*, 2008, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
15. Halsted, G.E., D.R. Luhr, and W.S. Adaska, *Guide to cement-treated base (CTB)* 2006.
16. Settari, C., et al., *Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete*. *Construction and Building Materials*, 2015. **101**: p. 617-621.
17. Ouldkaoua, Y., *Développement des eco-betons autoplaçants a base des co-produits et déchets: caractérisation et performance*, 2020, Thèse de doctorat, Université Amar Telidji Laghouat-Algérie.
18. Guendouz, M., et al., *Use of plastic waste in sand concrete*. *J. Mater. Environ. Sci*, 2016. **7**(2): p. 382-389.
19. LAHMADI, A., L. ZEGHICHI, and Z. BENGHAZI, *L'influence de la substitution des granulats naturels par les déchets de brique sur le comportement mécanique du béton*, 2012, ACMA. Fès, Maroc.
20. Harbi, R., *Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchet de briques*, 2009.
21. Li, H., et al., *Study on utilization of red brick waste powder in the production of cement-based red decorative plaster for walls*. *Journal of Cleaner Production*, 2016. **133**: p. 1017-1026.
22. Begum, R.A., et al., *A benefit–cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimisation: The case of Malaysia*. *Resources, conservation and recycling*, 2006. **48**(1): p. 86-98.
23. Asaari, F.A., H.B.A. Halim, and M.H. Isa, *A study on construction and demolition wastes from buildings in Seberang Perai*. 2004.

24. Agarwal, M. and A. Krishan, *Reusability of construction & demolition waste in bricks*. International research journal of engineering and technology, 2017. **4**: p. 148-151.
25. Lin, K.-L., et al., *Recycling waste brick from construction and demolition of buildings as pozzolanic materials*. Waste management & research, 2010. **28**(7): p. 653-659.
26. Khatib, J.M., *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. Cement and concrete research, 2005. **35**(4): p. 763-769.
27. Arulrajah, A., et al., *Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011. **23**(10): p. 1444-1452.
28. Cavalline, T.L. and D.C. Weggel, *Recycled brick masonry aggregate concrete: Use of brick masonry from construction and demolition waste as recycled aggregate in concrete*. Structural survey, 2013. **31**(3): p. 160-180.
29. Arulrajah, A., et al., *Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013. **25**(8): p. 1077-1088.
30. Mohammed, T.U., et al., *Recycling of brick aggregate concrete as coarse aggregate*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015. **27**(7): p. B4014005.
31. Aliabdo, A.A., A.-E.M. Abd-Elmoaty, and H.H. Hassan, *Utilization of crushed clay brick in concrete industry*. Alexandria Engineering Journal, 2014. **53**(1): p. 151-168.
32. Vieira, T., et al., *Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware*. Materials & design, 2016. **90**: p. 767-776.
33. Zhao, Y., et al., *Utilization of waste clay bricks as coarse and fine aggregates for the preparation of lightweight aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, 2018. **201**: p. 706-715.
34. Li, Z., et al., *Study on Pavement Performance of Cement Stabilized Recycled Brick Aggregate Base with Basalt Fiber*. Advances in Materials Science and Engineering, 2022. **2022**.
35. Adamson, M., A. Razmjoo, and A. Poursaee, *Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate*. Construction and Building Materials, 2015. **94**: p. 426-432.
36. Dang, J. and J. Zhao, *Influence of waste clay bricks as fine aggregate on the mechanical and microstructural properties of concrete*. Construction and Building Materials, 2019. **228**: p. 116757.
37. Ge, P., et al., *Mix proportion design method of recycled brick aggregate concrete based on aggregate skeleton theory*. Construction and Building Materials, 2021. **304**: p. 124584.
38. Sharma, A. and N. Shrivastava, *Geotechnical assessment and large scale direct shear testing on recycled brick aggregates*. Materials Today: Proceedings, 2022. **65**: p. 815-823.
39. Sharma, A., N. Shrivastava, and J. Lohar, *Assessment of Geotechnical and Geoenvironmental Behaviour of Recycled Concrete Aggregates, Recycled Brick Aggregates and Their Blends*. Cleaner Materials, 2023: p. 100171.
40. Kong, D., et al., *Influences of interlock-dense gradation designed by discrete element method on properties of cement-stabilized recycled brick-concrete aggregates*. Construction and Building Materials, 2023. **368**: p. 130494.
41. Disfani, M.M., et al., *Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials, 2014. **68**: p. 667-676.
42. Poon, C.S. and D. Chan, *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base*. Construction and building materials, 2006. **20**(8): p. 578-585.
43. Hu, L., J. Hao, and L. Wang, *Laboratory evaluation of cement treated aggregate containing crushed clay brick*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2014. **1**(5): p. 371-382.
44. Atyia, M.M., M.G. Mahdy, and M. Abd Elrahman, *Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks*. Construction and Building Materials, 2021. **304**: p. 124655.
45. Tavakoli, D., P. Fakharian, and J. de Brito, *Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume*. Road Materials and Pavement Design, 2022. **23**(8): p. 1793-1814.

46. Zhang, S. and L. Zong, *Properties of concrete made with recycled coarse aggregate from waste brick*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2014. **33**(4): p. 1283-1289.
47. Lonth, C.F., J. Thomas, and N. Joseph. *Mechanical Properties of Concrete Containing Brick Chips*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
48. Sharma, N., P. Sharma, and A.K. Parashar, *Use of waste glass and demolished brick as coarse aggregate in production of sustainable concrete*. Materials Today: Proceedings, 2022. **62**: p. 4030-4035.
49. Wong, C.L., et al., *Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review*. Journal of cleaner production, 2018. **195**: p. 226-239.
50. Padmini, A., K. Ramamurthy, and M. Mathews, *Relative moisture movement through recycled aggregate concrete*. Magazine of concrete research, 2002. **54**(5): p. 377-384.
51. Akhtaruzzaman, A.A. and A. Hasnat, *Properties of concrete using crushed brick as aggregate*. Concrete International, 1983. **5**(2): p. 58-63.
52. Alves, A., et al., *Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates*. Construction and Building Materials, 2014. **64**: p. 103-113.
53. Chen, H.-J., T. Yen, and K.-H. Chen, *Use of building rubbles as recycled aggregates*. Cement and concrete research, 2003. **33**(1): p. 125-132.
54. Aatheesan, T., et al., *Crushed brick blends with crushed concrete for pavement sub-base and drainage applications*. Australian Geomechanics, 2009. **44**(2): p. 65.
55. Hou, Y., et al., *Performance of cement-stabilised crushed brick aggregates in asphalt pavement base and subbase applications*. Road Materials and Pavement Design, 2016. **17**(1): p. 120-135.
56. Wang, B., et al., *A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete*. Resources, conservation and recycling, 2021. **171**: p. 105565.
57. Nedeljković, M., et al., *Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review*. Journal of Building Engineering, 2021. **38**: p. 102196.
58. Marinković, S., et al., *Environmental assessment of green concretes for structural use*. Journal of Cleaner Production, 2017. **154**: p. 633-649.
59. Pedro, D., J. De Brito, and L. Evangelista, *Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete*. Construction and Building Materials, 2014. **71**: p. 141-151.
60. LAHMAR, N., *Propriétés physico-mécaniques et durabilité des bétons à base de granulats recyclés*, 2021, Bensaid BOULEKBACHE/El-Hadj MEZIANE.
61. Sadati, S. and K.H. Khayat, *Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate*. Construction and Building Materials, 2016. **126**: p. 691-700.
62. Pérez, P., et al., *Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain*. Construction and Building Materials, 2013. **44**: p. 593-599.
63. Zhang, J., et al., *Performance evaluation of cement stabilized recycled mixture with recycled concrete aggregate and crushed brick*. Construction and Building Materials, 2021. **296**: p. 123596.
64. Li, W., et al., *Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading*. Materials & Design, 2016. **112**: p. 58-66.
65. Zhang, M., et al., *Mechanical properties of recycled aggregate concrete prepared from waste concrete treated at high temperature*. Journal of Building Engineering, 2023: p. 107045.
66. Verian, K.P., W. Ashraf, and Y. Cao, *Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production*. Resources, conservation and recycling, 2018. **133**: p. 30-49.
67. Fanijo, E.O., et al., *A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: properties, performance, and sustainability*. Cleaner Materials, 2023: p. 100199.
68. Katz, A., *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and concrete research, 2003. **33**(5): p. 703-711.
69. Yang, S. and Y. Lim, *Mechanical strength and drying shrinkage properties of RCA concretes produced from old railway concrete sleepers using by a modified EMV method*. Construction and Building Materials, 2018. **185**: p. 499-507.

70. Moreno-Pérez, E., et al., *Chemical and mineralogical characterization of recycled aggregates from construction and demolition waste from Mexico City*. Minerals, 2018. **8**(6): p. 237.
71. Sohail, M.G., et al., *Sustainable alternative aggregates: Characterization and influence on mechanical behavior of basalt fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **255**: p. 119365.
72. Bui, N.K., T. Satomi, and H. Takahashi, *Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate*. Construction and Building Materials, 2017. **148**: p. 376-385.
73. Hansen, T.C., *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985*. Materials and structures, 1986. **19**(3): p. 201-246.
74. Eckert, M. and M. Oliveira, *Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology*. Construction and Building Materials, 2017. **133**: p. 416-424.
75. Bennert, T., et al., *Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications*. Transportation research record, 2000. **1714**(1): p. 33-39.
76. Arulrajah, A., et al., *Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications*. Geotechnical Testing Journal, 2012. **35**(5): p. 743-751.
77. Behiry, A.E.A.E.-M., *Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt*. Ain Shams Engineering Journal, 2013. **4**(4): p. 661-673.
78. Haider, I., et al. *Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers*. in *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*. 2014.
79. da Conceição Leite, F., et al., *Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(6): p. 2972-2979.
80. Barbudo, A., et al., *Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications*. Construction and Building Materials, 2012. **28**(1): p. 129-138.
81. Dapena, E., et al., *Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011. **23**(4): p. 414-422.
82. Panda, B., N.T. Imran, and K. Samal, *A study on replacement of coarse aggregate with recycled concrete aggregate (RCA) in road construction*, in *Recent Developments in Sustainable Infrastructure: Select Proceedings of ICRDSI 2019/2020*, Springer. p. 1097-1106.
83. Folino, P. and H. Xargay, *Recycled aggregate concrete–Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression*. Construction and Building Materials, 2014. **56**: p. 21-31.
84. Ayob, A., et al. *Engineering behavior of concrete with recycled aggregate*. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
85. Tu, T.-Y., Y.-Y. Chen, and C.-L. Hwang, *Properties of HPC with recycled aggregates*. Cement and concrete research, 2006. **36**(5): p. 943-950.
86. Kenai, S. and F. Debieb, *Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés*. Materials and structures, 2011. **44**(4): p. 815-824.
87. Yan, K., et al., *Performance assessments of open-graded cement stabilized macadam containing recycled aggregate*. Construction and Building Materials, 2020. **233**: p. 117326.
88. Poon, C.S., et al., *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete*. Cement and concrete research, 2004. **34**(1): p. 31-36.
89. Nwakaire, C.M., et al., *Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review*. Construction and Building Materials, 2020. **235**: p. 117444.
90. Duan, Z., et al., *Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **254**: p. 119323.
91. Kumar, P. and N. Singh, *Influence of recycled concrete aggregates and Coal Bottom Ash on various properties of high volume fly ash-self compacting concrete*. Journal of Building Engineering, 2020. **32**: p. 101491.
92. Majhi, R., A. Nayak, and B. Mukharjee, *Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag*. Construction and Building Materials, 2018. **159**: p. 417-430.

93. Andal, J., M. Shehata, and P. Zacarias, *Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality*. Construction and Building Materials, 2016. **125**: p. 842-855.
94. Daniyal, M. and S.K. Singh, *Partial Replacement of Coarse Aggregates with Demolition Waste In Construction*.
95. Thomas, C., et al., *Durability of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2013. **40**: p. 1054-1065.
96. Gesoglu, M., et al., *Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates*. Construction and Building Materials, 2015. **98**: p. 334-344.
97. Kou, S.-C. and C.-S. Poon, *Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources*. Magazine of Concrete Research, 2008. **60**(1): p. 57-64.
98. Xiao, J., J. Li, and C. Zhang, *Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading*. Cement and concrete research, 2005. **35**(6): p. 1187-1194.
99. Etxeberria, M., et al., *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and concrete research, 2007. **37**(5): p. 735-742.
100. Ajdukiewicz, A. and A. Kliszczewicz, *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*. Cement and Concrete Composites, 2002. **24**(2): p. 269-279.
101. Afroughsabet, V., L. Biolzi, and T. Ozbakkaloglu, *Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete*. Composite Structures, 2017. **181**: p. 273-284.
102. McNeil, K. and T.H.-K. Kang, *Recycled concrete aggregates: A review*. International journal of concrete structures and materials, 2013. **7**: p. 61-69.
103. Kox, S., et al., *Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete aggregates and their application in concrete road pavement construction*. Case Studies in Construction Materials, 2019. **11**: p. e00282.
104. Salem, R.M., E.G. Burdette, and N.M. Jackson, *Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete*. Materials Journal, 2003. **100**(3): p. 216-221.
105. Verian, K.P., *Using recycled concrete as coarse aggregate in pavement concrete*, 2012, Purdue University.
106. Gokce, A., et al., *Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(5): p. 799-806.
107. Bogas, J.A., J. De Brito, and D. Ramos, *Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates*. Journal of Cleaner Production, 2016. **115**: p. 294-306.
108. de Oliveira, M.B. and E. Vazquez, *The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete*. Waste management, 1996. **16**(1-3): p. 113-117.
109. Martinez-Echevarria, M., et al., *Crushing treatment on recycled aggregates to improve their mechanical behaviour for use in unbound road layers*. Construction and Building Materials, 2020. **263**: p. 120517.
110. Medina, C., M. Frías, and M.S. De Rojas, *Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate*. Construction and Building Materials, 2012. **31**: p. 112-118.
111. Xiao, F., et al., *A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement*. Construction and Building Materials, 2018. **180**: p. 579-604.
112. Wei, M., et al., *Environmental impact on VOCs emission of a recycled asphalt mixture with a high percentage of RAP*. Materials, 2021. **14**(4): p. 947.
113. Xiao, F., et al., *Recent applications and developments of reclaimed asphalt pavement in China, 2010–2021*. Sustainable Materials and Technologies, 2023: p. e00697.
114. Milad, A., et al., *A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications*. J. Teknol, 2020. **82**(3): p. 35-44.
115. DOT, U., *A Study of the Use of Recycled Paving Material: Report to Congress*. US Department of Transportation (US DOT) and Federal Highway Administration (FHWA), Report No. FHWA-RD-93-147, 1993.

116. Song, W., B. Huang, and X. Shu, *Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement*. Journal of Cleaner Production, 2018. **192**: p. 191-198.
117. Ghazy, M.F., M.A.A. Abd Elaty, and M.T. Abo-Elenain, *Characteristics and optimization of cement concrete mixes with recycled asphalt pavement aggregates*. Innovative Infrastructure Solutions, 2022. **7**: p. 1-15.
118. Debbarma, S., G. Ransinchung, and S. Singh, *Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement*. Construction and Building Materials, 2019. **199**: p. 508-525.
119. Singh, S., et al., *Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes*. Journal of Cleaner Production, 2018. **174**: p. 42-52.
120. Abedalqader, A., et al., *Influence of temperature on mechanical properties of recycled asphalt pavement aggregate and recycled coarse aggregate concrete*. Construction and Building Materials, 2021. **269**: p. 121285.
121. Soltanabadi, R. and K. Behfarnia, *Shear strength of reinforced concrete deep beams containing recycled concrete aggregate and recycled asphalt pavement*. Construction and Building Materials, 2022. **314**: p. 125597.
122. Paluri, Y., M. Heeralal, and P.R. Kumar, *A study on the use of reclaimed asphalt pavement aggregates in pavement quality concrete*. CEMENT WAPNO BETON, 2019. **24**(6): p. 421-+.
123. Singh, S., G. Ransinchung RN, and P. Kumar, *Laboratory investigation of concrete pavements containing fine RAP aggregates*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. **30**(2): p. 04017279.
124. Chyne, J., H.K. Sepuri, and H. Thejas, *A review on recycled asphalt pavement in cement concrete*. Int. J. Latest Eng. Res. Appl, 2019. **4**(2): p. 9-18.
125. Plati, C., M. Tsakoumaki, and K. Gkyrtis, *Physical and Mechanical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Incorporated into Unbound Pavement Layers*. Applied Sciences, 2022. **13**(1): p. 362.
126. Huang, B., X. Shu, and G. Li, *Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements*. Cement and Concrete Research, 2005. **35**(10): p. 2008-2013.
127. Mahdavi, A., A.M. Moghaddam, and M. Dareyni, *Durability and Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Containing Coarse Reclaimed Asphalt Pavement*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2021. **16**(3): p. 82-110.
128. Coppola, L., P. Kara, and S. Lorenzi, *Concrete manufactured with crushed asphalt as partial replacement of natural aggregates*. Materiales de construcción, 2016. **66**(324): p. e101-e101.
129. Andrew, B., et al., *Investigation on the use of reclaimed asphalt pavement along with steel fibers in concrete*. Case Studies in Construction Materials, 2022. **17**: p. e01356.
130. Soltanabadi, R. and K. Behfarnia, *Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate and Recycled Asphalt Pavement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022. **34**(12): p. 04022348.
131. Nandi, S. and G. Ransinchung, *Performance evaluation and sustainability assessment of precast concrete paver blocks containing coarse and fine RAP fractions: A comprehensive comparative study*. Construction and Building Materials, 2021. **300**: p. 124042.
132. Paluri, Y., et al., *Flexural fatigue behavior of steel fiber-reinforced reclaimed asphalt pavement-based concrete: An experimental study*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2021. **26**(1): p. 04020053.
133. Paluri, Y., et al., *A study on the influence of steel fibers on the performance of Fine Reclaimed Asphalt Pavement (FRAP) in pavement quality concrete*. Materials Today: Proceedings, 2020. **32**: p. 657-662.
134. Hassan, K., J. Brooks, and M. Erdman, *The use of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates in concrete*, in *Waste management series2000*, Elsevier. p. 121-128.
135. Hossiney, N., M. Tia, and M.J. Bergin, *Concrete containing RAP for use in concrete pavement*. International Journal of Pavement Research and Technology, 2010. **3**(5): p. 251.

136. Modarres, A. and Z. Hosseini, *Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material*. *Materials & Design*, 2014. **64**: p. 227-236.
137. Jaawani, S., et al., *Limitations on the use of recycled asphalt pavement in structural concrete*. *Applied Sciences*, 2021. **11**(22): p. 10901.
138. Okafor, F.O., *Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete*. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2010. **17**(9): p. 47-58.
139. Taha, R., et al., *Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases*. *Transportation Research Record*, 1999. **1652**(1): p. 264-269.
140. Pradhan, S.K. and G. Biswal, *Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) as granular sub-base material in road construction*. *Materials Today: Proceedings*, 2022. **60**: p. 288-293.
141. Brand, A.S., et al., *Fractionated reclaimed asphalt pavement (FRAP) as a coarse aggregate replacement in a ternary blended concrete pavement*. *ICT-12-008*, 2012.
142. Berry, M., et al., *Feasibility of reclaimed asphalt pavement as aggregate in portland cement concrete*, 2013, Montana Department of Transportation Helena, MT, USA.
143. Chafika, S., I. Ilyes, and D. Farid. *The Effect of Freeze-Thaw Cycles on Properties of Concrete with Recycling Aggregate Pavements*. in *Advances in Green Energies and Materials Technology: Selected Articles from the Algerian Symposium on Renewable Energy and Materials (ASREM-2020)*. 2021. Springer.
144. Thomas, R., A.J. Fellows, and A.D. Sorensen, *Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018. **30**(5): p. 04018061.
145. Sahdeo, S.K., et al., *Reclaimed asphalt pavement as a substitution to natural coarse aggregate for the production of sustainable pervious concrete pavement mixes*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021. **33**(2): p. 04020469.
146. Daneti, S.B. and C.T. Tam, *Sustainability of Concrete Constructions: The Role of Materials and Practices*, in *Emerging Trends in Civil Engineering 2020*, Springer. p. 381-395.
147. Lu, J.-X., et al., *Synergetic recycling of waste glass and recycled aggregates in cement mortars: Physical, durability and microstructure performance*. *Cement and Concrete Composites*, 2020. **113**: p. 103632.
148. Jesse, A., *Sand mining at Poyang Lake, using landsat data from the US Geological Survey*. *NASA Earth Observ*, 2016.
149. Boudali, S., S. Godbout, and J. Palacios, *INVESTIGATING POTENTIAL IMPLEMENTATION OF DIFFERENT AGRO-WASTES IN CONCRETE*. 2019.
150. Meddah, M.S. *Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact*. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
151. Boustead, I.J.T.I.J.o.L.C.A., *LCA—how it came about*. 1996. **1**(3): p. 147-150.
152. Hunt, R.G., W.E. Franklin, and R.J.T.i.j.o.l.c.a. Hunt, *LCA—How it came about*. 1996. **1**(1): p. 4-7.
153. Svoboda, S.J.E.m.R. and cases, *Note on life cycle analysis*. 1999: p. 217-227.
154. Leontief, W., *Input-output economics* 1986: Oxford University Press.
155. Science, S.J.E. and P. Research, *Guidelines for Life-Cycle Assessment*. 1994. **1**(1): p. 55.
156. Guinee, J.B., *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002. **7**(5): p. 311.
157. Hauschild, M.Z. and H. Wenzel, *Environmental assessment of products, Volume 2: Scientific background*. 1998.
158. Hendrickson, C.T., L.B. Lave, and H.S. Matthews, *Environmental life cycle assessment of goods and services: an input-output approach* 2010: Routledge.
159. Jolliet, O., M. Saadé, and P. Crettaz, *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. Vol. 23. 2010: PPUR Presses polytechniques.
160. Thorn, M.J., J.L. Kraus, and D.R.J.E.q.m. Parker, *Life-cycle assessment as a sustainability management tool: Strengths, weaknesses, and other considerations*. 2011. **20**(3): p. 1-10.
161. Rogers, K., T. Seager, and I. Linkov, *Multicriteria decision analysis and life cycle assessment*, in *Real-Time and Deliberative Decision Making* 2008, Springer. p. 305-314.

162. Benoît-Norris, C., et al., *Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA*. 2011. **16**(7): p. 682-690.
163. Laratte, B., *Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d'une analyse de cycle de vie*, 2013, Troyes.
164. HADJ SADOK, R., *Analyse du Cycle de vie des Sédiments de Dragage*, 2019, Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis.
165. Côté, C. and R. Gouvinhas, *Evaluation comparative de deux méthodes d'analyse de cycle de vie simplifiée dans un contexte de conception de produit au sein de PME*. Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA), 2004.
166. Mistri, A., et al., *Environmental implications of the use of bio-cement treated recycled aggregate in concrete*. Resources, conservation and recycling, 2021. **167**: p. 105436.
167. Boubaker, L., N. Gondran, and M.J.D.S.e.T. Djebabra, *Vers une combinaison ACV/AMDEC-E en vue de l'analyse environnementale d'une cimenterie algérienne*. 2008. **52**: p. 24-28.
168. Serres, N., S. Braymand, and F. Feugeas. *Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie*. in *Conférence Matériaux 2014-Colloque Ecomatériau*. 2014.
169. Chevalier, J.J.T.d.l.i.E., *Analyse du cycle de vie: Utilisation dans le secteur de la construction*. 2009. **1**(G5880).
170. Guo, M., *Life cycle assessment (LCA) of light-weight eco-composites* 2013: Springer Science & Business Media.
171. Khelifa, M.-R., et al., *Compared environmental impact analysis of alfa and polypropylene fibre-reinforced concrete*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021. **45**(3): p. 1511-1522.
172. TO, D.O.N., *Analysis of Recycling of Asphalt Shingles in Pavement Mixes from a Life Cycle Perspective*. 2013.
173. Mroueh, U.-M., P. Eskola, and J. Laine-Ylijoki, *Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction*. Waste management, 2001. **21**(3): p. 271-277.
174. Chiu, C.-T., T.-H. Hsu, and W.-F. Yang, *Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements*. Resources, conservation and recycling, 2008. **52**(3): p. 545-556.
175. Mladenovič, A., et al., *Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses*. Journal of Cleaner Production, 2015. **87**: p. 683-691.
176. Tait, M.W. and W.M. Cheung, *A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016. **21**(6): p. 847-860.
177. Carpenter, A., et al., *Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction*. Waste Management, 2007. **27**(10): p. 1458-1464.
178. Guignone, G., et al., *Life Cycle Assessment of Waste Glass Powder Incorporation on Concrete: A Bridge Retrofit Study Case*. Applied Sciences, 2022. **12**(7): p. 3353.
179. Sudarno, S., P. Purwanto, and P. Pratikso, *Life Cycle Assessment on cement treated recycling base (CTRB) construction*. Waste Technology, 2014. **2**(2): p. 31-40.
180. Masi, G., et al., *Performance and environmental analysis of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) concrete produced in industrial environment*, in *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems* 2023, CRC Press. p. 2831-2838.
181. Singh, S., et al., *Laboratory investigation of RAP aggregates for dry lean concrete mixes*. Construction and Building Materials, 2018. **166**: p. 808-816.
182. Shi, X., A. Mukhopadhyay, and D. Zollinger, *Sustainability assessment for portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates*. Journal of Cleaner Production, 2018. **192**: p. 569-581.
183. Hasan, U., A. Whyte, and H. Al Jassmi, *Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach*. Journal of Cleaner Production, 2020. **257**: p. 120531.
184. Aurangzeb, Q., et al., *Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content*. Resources, conservation and recycling, 2014. **83**: p. 77-86.

185. Yang, R., et al., *Environmental and economic analyses of recycled asphalt concrete mixtures based on material production and potential performance*. Resources, conservation and recycling, 2015. **104**: p. 141-151.
186. Li, X., et al., *Cost, energy, and greenhouse gas analysis of fly ash stabilised cold in-place recycled asphalt pavement*. Road Materials and Pavement Design, 2013. **14**(3): p. 537-550.
187. Sayagh, S., et al., *Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures*. Resources, conservation and recycling, 2010. **54**(6): p. 348-358.
188. Shi, X., et al., *Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate*. Journal of Cleaner Production, 2019. **225**: p. 414-425.
189. EN, B., *197-1: 2000, Cement: Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*”, British Standards Institute, 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL, 2000.
190. AFNOR: *NF EN 14227-1. Mélanges traités aux liants hydrauliques-Partie 1: Mélanges granulaires traités au ciment*, (2005)
191. Soil, A.C.D.-o. and Rock, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 Ft-Lbf/Ft³ (2,700 KN-M/M³))* 12009: ASTM international.
192. EN, N., *196-1, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques*. French Standard, 2006.
193. Standard, A., *C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014: p. 1-5.
194. !!! INVALID CITATION !!!
195. Astm, C., *597, Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
196. NF, P., *P 18-459, Béton-Essai pour béton durci-Essai de porosité et de masse volumique*. Mars, 2010.
197. ASTM, I. *ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. 2001. ASTM Philadelphia^ ePA PA.
198. EN, N., *993-15- 'Méthodes d'Essai pour Produits Réfractaires Façonnés Denses-Partie 15: Détermination de la Conductivité Thermique par la Méthode du Fil Chaud'*, 2005, Octobre.
199. NLT-352/86, “*Caracterización de mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste*”, Normas NLT I.-Ensayos de carreteras, 1986.
200. Testing, A.S.f., M.C.C.-o. Concrete, and C. Aggregates, *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing*2008: ASTM international.
201. Shrapnel, B., *Scoping Study to Investigate Measures for Improving the Environmental Sustainability of Building Materials*. 2006.
202. Christen, H., G. van Zijl, and W. de Villiers, *The incorporation of recycled brick aggregate in 3D printed concrete*. Cleaner Materials, 2022. **4**: p. 100090.
203. Bwayo, E. and S. Obwoya, *Thermal Conductivity of insulation brick developed from sawdust and selected Uganda clays*. International journal of research in Engineering and Technology, 2014. **3**(9): p. 282-285.
204. Dang, J., J. Xiao, and Z. Duan, *Effect of pore structure and morphological characteristics of recycled fine aggregates from clay bricks on mechanical properties of concrete*. Construction and Building Materials, 2022. **358**: p. 129455.
205. Lim, S. and D.G. Zollinger, *Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials*. Transportation Research Record, 2003. **1837**(1): p. 30-38.
206. Salem, R.M. and E.G. Burdette, *Role of chemical and mineral admixtures on the physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete*. Materials Journal, 1998. **95**(5): p. 558-563.
207. Poon, C.-S., X. Qiao, and D. Chan, *The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base*. Waste Management, 2006. **26**(10): p. 1166-1172.

208. Angulo, S.C., et al., *Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil*. *Waste Management*, 2009. **29**(2): p. 721-730.
209. Kou, S.-C., C.-S. Poon, and M. Etxeberria, *Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2011. **33**(2): p. 286-291.
210. Matias, D., et al., *Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates–Influence of the use of superplasticizers*. *Construction and Building Materials*, 2013. **44**: p. 101-109.
211. Kenai, S. and F. Debieb, *Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates*. *Materials and Structures*, 2011. **44**: p. 815-824.
212. Poongodi, K., et al., *Mechanical properties of pavement quality concrete using recycled aggregate*. *Int J Innov Technol Explor Eng*, 2019. **9**: p. 33-38.
213. Bravo, M., et al., *Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition*. *Construction and Building Materials*, 2018. **168**: p. 818-830.
214. Debieb, F., et al., *Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, 2010. **32**(6): p. 421-426.
215. Berredjem, L., N. Arabi, and L. Molez. *Contribution à l'étude des indicateurs de durabilité des bétons à base des granulats recyclés*. in *Rencontres Universitaires de Génie Civil*. 2015.
216. Quebaud, M., *Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats*, 1996, Artois.
217. Fenollera, M., et al., *Experimental study on thermal conductivity of self-compacting concrete with recycled aggregate*. *Materials*, 2015. **8**(7): p. 4457-4478.
218. Kumar, R., *Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete*. *Construction and Building Materials*, 2017. **142**: p. 248-255.
219. Melese, E., et al., *Characterisation of full-depth reclaimed pavement materials treated with hydraulic road binders*. *Construction and Building Materials*, 2019. **226**: p. 778-792.
220. Fedrigo, W., et al., *Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials*. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2017. **10**(5): p. 393-402.
221. Jain, J., et al., *Durability of pavement concretes made with recycled concrete aggregates*. *Transportation research record*, 2012. **2290**(1): p. 44-51.
222. Raza, I.A., et al., *Comparative life cycle assessment of recycled soil-stabilized bricks and traditional bricks*. *Materials Today: Proceedings*, 2023. **80**: p. 532-537.
223. Qiao, L., et al., *Life cycle assessment of three typical recycled products from construction and demolition waste*. *Journal of Cleaner Production*, 2022. **376**: p. 134139.
224. Shang, X., et al., *Life cycle sustainable assessment of natural vs artificial lightweight aggregates*. *Journal of Cleaner Production*, 2022. **367**: p. 133064.
225. Guo, Z., et al., *Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates*. *Journal of Cleaner Production*, 2018. **199**: p. 136-149.
226. Pantini, S., G. Borghi, and L. Rigamonti, *Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology*. *Waste Management*, 2018. **80**: p. 423-434.



Youcef TOUMI

Valorisation des déchets et sous-produits en techniques routières : « développement de nouveaux matériaux à valeur ajoutée et analyse cycle de vie multicritère »

Thèse

En vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat troisième cycle
Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux innovants pour la construction durable

Résumé

Le monde assiste à des avancées qualitatives dans le domaine de la construction et des routes, contribuant à l'amélioration de la qualité des infrastructures. Ces progrès s'accompagnent d'une attention particulière à la durabilité environnementale, nécessitant la recherche de matériaux de construction respectueux de l'environnement. L'industrie des routes et de la construction nécessite d'importantes sources de matériaux naturels, générant simultanément d'importantes quantités de déchets. Ainsi, l'utilisation des déchets de construction et de voirie est considérée comme une solution durable. L'objectif de cette thèse est d'examiner l'emploi des déchets de briques recyclées (RAB), les déchets de béton recyclé (RAC), et les déchets de béton bitumineux (RAP), en tant que substitution complète au sable concassé (0/3 mm) et aux graviers (3/8 mm), ainsi qu'en tant que graves concassées (GC) 0/20 reconstituées, largement utilisées dans la couche de base et/ou de fondation des routes. Ceci vise à obtenir des graves ciment (GC) écologiques et économiques. Dans cette optique, nous avons analysé le cycle de vie des mélanges confectionnés. Les résultats montrent que l'utilisation des RAB et des RAC en remplacement du sable donne des résultats satisfaisants pour les propriétés mécaniques requises de la couche de base traitée aux liants hydrauliques des routes à long terme. En revanche, l'emploi des RAP conduit à une diminution des propriétés mécaniques de la couche de base des routes, notamment lorsqu'ils sont utilisés sous forme de sable. Concernant la durabilité de la couche de base traitée, les propriétés ont été améliorées lors de l'utilisation des RAB, telles que la résistance à l'abrasion et la conductivité thermique, en comparaison avec les autres types de déchets. En revanche, l'utilisation des RAP a amélioré la résistance au gel par rapport aux autres types de déchets. L'évaluation environnementale à travers l'analyse du cycle de vie a démontré que l'utilisation de granulats recyclés (RAB, RAC, et RAP) dans les graves traitées offre des performances environnementales supérieures, notamment dans les domaines de la protection de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes, et de l'utilisation des ressources, par rapport à l'utilisation de granulats naturels. Les résultats obtenus de cette thèse nous permettent d'aboutir à des matériaux de construction respectueux de l'environnement à travers l'emploi d'une évaluation environnementale quantitative, tout en présentant des propriétés mécaniques acceptables.

Mots-clés : Grave Ciment, Déchets de Briques Recyclés, Déchets de Béton Recyclé, Déchets de béton bitumineux, Propriétés Mécaniques, Durabilité, Analyse du Cycle de Vie.

Directeur de thèse : Mezhoud Samy -Université : Constantine 1 Frère Mentouri

Co-Directeur de thèse : Otmane Boukendakdji -Université : Médéa

Année Universitaire :2024-2025